

## Aptitud combinatoria en maíz con divergencia genética en el Altiplano mexicano\*

### Combining ability in maize with genetic divergence in the Mexican Plateau

Gilberto Esquivel Esquivel<sup>1§</sup>, Fernando Castillo González<sup>2</sup>, Juan Manuel Hernández Casillas<sup>1</sup>, Amalio Santacruz Varela<sup>2</sup>, Gabino García de los Santos<sup>2</sup> y Jorge A. Acosta Gallegos<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Programa de Recursos Genéticos, Campo Experimental Valle de México, INIFAP. Carretera Los Reyes-Texcoco km 13.5. Coatlinchán, Texcoco, Estado de México. C. P. 56250. México. Tel: 01 595 92 1 26 57, 92 1 27 15 y 92 1 27 21 Ext. 182. (jmhe58@hotmail.com). <sup>2</sup>Postgrado en Recursos Genéticos y Productividad, Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco km 36.5. Montecillo, Texcoco, Estado de México. C. P. 56230. (fcastill@colpos.mx), (asvarela@colpos.mx), (garcia@colpos.mx). <sup>3</sup>Programa de Frijol. Campo Experimental Bajío, INIFAP. Carretera Celaya-San Miguel de Allende, km. 6.5. Celaya, Guanajuato. México. (jamk@prodigy.net.mx). <sup>§</sup>Autor para correspondencia: esquivil@hotmail.com.

#### Resumen

Para estimar los efectos de aptitud combinatoria general (ACG) y aptitud combinatoria específica (ACE), se evaluaron en campo 15 poblaciones progenitoras de la raza de maíz Chalqueño y sus 105 cruzamientos dialélicos bajo el diseño II de Griffing. La siembra se realizó durante el ciclo agrícola primavera-verano 2006 en Zotoluca y Mixquiahuala, Hidalgo y en Texcoco, Estado de México, bajo un diseño experimental látice 12 x 12 con tres repeticiones. Se analizaron ocho características, encontrándose diferencias altamente significativas ( $p \leq 0.01$ ) entre localidades, grupos y poblaciones dentro de grupos para las variables rendimiento (REN), índice de grano (IG), mazorcas por planta (MP), diámetro de mazorca (DM), longitud de grano (LGr), número de hileras por mazorca (NH), días a floración masculina (DFM) y altura de planta (AP). En los efectos de ACG y ACE se observaron diferencias altamente significativas para las ocho variables consideradas, siendo mayor la variación de la ACG que la de ACE. Al considerar los valores *per se* y efectos positivos de ACG para las variables evaluadas, las poblaciones Gto-142, Col-03-64, Col-6784, FHCH-129Fn, Zac-66, Tlax-151 y VS-22 presentaron la mejor expresión en el rendimiento, morfología y fenología; también se identificaron cruces con

#### Abstract

In order to estimate the effects of the general combining ability (GCA) and the specific combining ability (SCA), 15 progenitor populations of maize race Chalqueño and 105 diallell crosses were evaluated in field under Griffing's design II. Sowing was done during the spring-summer season, 2006 in Zotoluca and Mixquiahuala, Hidalgo and Texcoco, State of Mexico, under a lattice experimental design 12 x 12 with three replications. Eight characteristics were analyzed, obtaining highly significant differences ( $p \leq 0.01$ ) between the localities, groups and populations within groups for yielding variables (REN), grain index (GI), ears per plant (MP), ear diameter (DM), grain length (LGR), number of rows per ear (NH), days to male flowering (DFM) and plant height (AP). For GCA and SCA there were highly significant differences observed for the eight variables, with a greater variation in GCA than in SCA. Considering the values *per se* and positive effects of SCA for the evaluated variables, the populations Gto-142, Col-03-64, Col-6784, FHCH-129Fn, Zac-66, Tlax-151 and VS-22 presented the best expression in yield, morphology and phenology; we also identified crosses with high SCA effects for REN, IG,

efectos de ACE altos para REN, IG, MP, DM, LGr, NHM, DFM y AP. Con base en los efectos registrados, se detectaron poblaciones sobresalientes, destacando por su potencial genético las de la raza Chalqueño, dando como resultado interacciones importantes entre las poblaciones progenitoras de diferente origen geográfico, así como patrones heteróticos sobresalientes factibles de considerar para los programas de mejoramiento genético de maíz.

**Palabras clave:** *Zea mays* L., Chalqueño; aptitud combinatoria, cruzas, dialélicas.

## Introducción

El mejoramiento genético del maíz, es un proceso continuo para la formación de híbridos y variedades. Al mejorar un cultivo, es importante conocer el componente genético de los materiales usados como progenitores. En todo programa de mejoramiento genético, la elección de germoplasma progenitor es una de las decisiones más importantes que se deben tomar. Al respecto, Gutiérrez *et al.* (2004) y Castañón *et al.* (2005) mencionan que conocer la aptitud combinatoria de los progenitores, mejora la eficiencia de un programa de mejoramiento. Esto permite seleccionar progenitores con buen comportamiento promedio en una serie de cruzamientos, e identificar combinaciones específicas con un comportamiento superior a lo esperado.

La evaluación de la ACG y ACE mediante cruzamientos dialélicos es eficiente en la clasificación de progenitores, e identifica fuentes de germoplasma útiles en programas de mejoramiento genético (Castañón *et al.*, 2005). La estimación de parámetros genéticos se obtiene por medio del análisis de diseños dialélicos propuestos por Griffing (1956). La ACG determina el desempeño promedio de una línea en sus combinaciones híbridas, mientras que la ACE separa las combinaciones híbridas específicas que resulten mejor o peor de lo que se esperaría en relación con la media de la ACG de las dos líneas progenitoras (Sprague y Tatum, 1942). Con relación al tipo de acción génica que determina la aptitud combinatoria de las líneas, se considera que la ACG indica la porción aditiva de los efectos genéticos, en tanto que la ACE, los efectos no aditivos, esto es, la acción génica de dominancia y epistasis (Poehlman y Allen, 2003).

Los diseños dos y cuatro de Griffing han sido utilizados para estimar los efectos de aptitud combinatoria general (ACG) y específica (ACE) a partir de sus componentes de varianza

MP, DM, LGR NHM, DFM and AP. Based on the reported effects, outstanding populations were detected, highlighted by their genetic potential of Chalqueño race, resulting in significant interactions between the parent populations from different geographic origins and outstanding heterotic patterns considered feasible for maize breeding programs maize.

**Key words:** *Zea mays* L., Chalqueño, combining ability, cross, diallel.

## Introduction

Maize breeding is a continuous process for the formation of hybrids and varieties. By improving a crop, it is important to know the genetic component of the materials used as parents. In any breeding program, the choice of germplasm parent is one of the most important decisions to make. In this regard, Gutiérrez *et al.* (2004) and Castañón-Nájera *et al.* (2005) mentioned that, by knowing the combining ability of the parents, improves the efficiency of a breeding program. This enables to select good performance-average progenitors in a series of crosses, and identify specific combinations with a higher behavior than expected.

The evaluation of GCA and SCA through diallel crosses is quite efficient for ranking parents, and identifies useful sources of germplasm in breeding programs (Castañón-Nájera *et al.*, 2005). The estimation of genetic parameters is obtained through diallel analysis proposed by Griffing (1956). GCA determines the average performance of a line in hybrid combinations, while SCA separates specific hybrid combinations that are better or worse than expected in relation to the average of GCA of both parent lines (Sprague and Tatum, 1942). Regarding the type of gene action which determines the combining ability of the lines, it is considered that GCA indicates the additive portion of the genetic effects, whereas SCA, the non-additive effects, *i.e.* the dominant gene action and epistasis (Poehlman and Allen, 2003).

Griffing's designs, two and four have been used to estimate the effects of general combining ability (GCA) and specific (SCA) from components of variance (Montesinos *et al.*, 2005). In this regard, Preciado *et al.* (2005) indicated that greater effects detected in general combining ability, it

(Montesinos *et al.*, 2005). Al respecto, Preciado *et al.* (2005) señalan que al detectarse efectos mayores en la aptitud combinatoria general, es factible explotar la proporción aditiva de la varianza genética, mediante cualquier variante de selección recurrente; por el contrario, en cruzamientos donde se registra mayor aptitud combinatoria específica, puede implementarse un programa de selección recurrente recíproca o de hibridación.

El mejoramiento genético de maíz para Valles Altos ha centrado su atención en la obtención de híbridos con líneas derivadas de poblaciones nativas, como Mich-21, Qro-10, Tlax-151, Tlax-208, Méx-37, Méx-39, Hgo-4, Pue-75 y Chapingo II (Gómez *et al.*, 1996), siendo pocas las poblaciones nativas que han sido incorporadas de manera dinámica en los programas de mejoramiento, a pesar de que se han detectado algunas de ellas con características agronómicas deseables y alto potencial de rendimiento (Ortega *et al.*, 1991; Balderrama *et al.*, 1997; Romero *et al.*, 2002; Herrera *et al.*, 2004); en este contexto, el aprovechamiento de la diversidad del maíz en una región determinada debe enfocarse tanto a detectar poblaciones para enriquecer la variación usada en los programas de mejoramiento como a evitar la pérdida de la diversidad útil que han generado y conservado los agricultores (Márquez, 1994); además, las poblaciones mencionadas son originarias principalmente de los estados del centro del país, mientras que la distribución de la raza Chalqueño va desde Oaxaca en el sur hasta Zacatecas y Durango en el Norte. Con base en lo anterior, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar la capacidad de combinación entre un grupo de poblaciones progenitoras divergentes de maíces de Valles Altos, mediante estimaciones de la aptitud combinatoria.

## Material y métodos

**Material genético.** En el estudio se consideraron poblaciones con los criterios siguientes: a) sobresaliente en estudios previos; b) Que su origen geográfico fuera 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 para explorar su respuesta heterótica; c) bajo nivel de mejoramiento genético; aunque por falta de semilla de algunas poblaciones se incluyeron sus versiones (germoplasma derivado de la población original y similar genéticamente) con cierto grado de mejoramiento, como el caso de VS-22 (Mich-21) y F<sub>HC</sub>H-129F<sub>n</sub>; y d) que provinieran de diferentes áreas de

is possible to exploit the proportion of additive genetic variance, using any variant of recurrent selection, on the contrary, in crossings where there is a greater specific combining ability can be implemented one reciprocal recurrent selection program or hybridization.

Maize breeding for the Highlands has been focused on obtaining hybrid lines derived from native populations, as Mich-21, Qro-10, Tlax-151, Tlax-208, Méx-37, Méx-39, Hgo-4, Pue-75 and Chapingo II (Gómez *et al.*, 1996), with few native populations that have been dynamically incorporated into breeding programs, although some with desirable agronomic traits and high yield potential have been detected (Ortega *et al.*, 1991; Balderrama *et al.*, 1997; Romero *et al.*, 2002; Herrera *et al.*, 2004), in this context, the use of maize diversity in a given region should focus both populations to enrich detect variation used in breeding programs as to avoid loss of useful diversity that have generated and preserved farmers (Márquez, 1994), also referred populations originated mainly from the states of the central country, while the distribution of Chalqueño goes from Oaxaca in the south to Zacatecas and Durango in the north. Based on that, the present research aimed to evaluate the ability of combination among a group of divergent progenitor populations of Highland corns through combining ability estimates.

## Materials and methods

**Genetic material.** Were considered in the study populations with the following criteria: a) outstanding in previous studies; b) geographical origin outside the high valleys of Mexico, plus two contrasting populations, from Uruguay (Urg-II) and Argentina (Arg-III), belonging to the race Cateto Sulino to explore its heterotic response; c) low level of genetic improvement; although for the lack of seeds, populations included some of their versions (germplasm derived from the original population and similar genetically) with some degree of improvement, such is the case of VS-22 (Mich.-21) and F<sub>HC</sub>H-129F<sub>n</sub>; and d) that came from different ranges of Chalqueño or were variants of this (Chalqueño-Celaya or Chalqueño-Taper), and a population that shares Ancho race with race acreage Chalqueño in southeastern Mexico State. So, the genetic material consisted of 15 maize populations and their 105 possible direct single crosses.

distribución de la raza Chalqueño o que fueran variantes de ésta (Chalqueño-Celaya o Chalqueño-Cónico), así como una población de la raza Ancho que comparte área cultivada con la raza Chalqueño en el sureste del Estado de México. Por lo que el material genético estuvo constituido por 15 poblaciones de maíz y sus 105 cruzas simples directas posibles.

Además se incluyeron 14 cruzas simples adicionales, cuatro poblaciones progenitoras adicionales y seis híbridos comerciales como testigos (Cuadro 1). 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 Ciencias Agrícolas.

**Cuadro 1. Poblaciones progenitoras, cruzas adicionales e híbridos comerciales incluidos en el estudio de heterosis entre poblaciones del Altiplano Mexicano. Primavera-verano, 2006.**

**Table 1. Progenitor populations, additional crosses and commercial hybrids included in the study of heterosis among populations of the Mexican Plateau. Spring-summer, 2006.**

Población	Edo/País	Municipio	Lat.	Long.	Alt.	Raza	Referencias	
Hgo-4	Hgo.					Chalqueño	Gámez <i>et al.</i> , 1996	
Dgo-189	Dgo.	El Mezquital	23° 28'	104° 22'	1 440	Chalqueño	LAMP, 1991	
Gto-208	Gto.	León	21° 16'	101° 34'	2 419	Chalq-Celaya	Romero <i>et al.</i> , 2002	
Gto-142	Gto.	SM Allende	20° 55'	100° 45'	1 990	Chalq-Celaya	Romero <i>et al.</i> , 2002	
Méx-633	E. Méx.	T. del Aire	19° 09'	98° 01'	2 410	Chalqueño	Romero <i>et al.</i> , 2002	
Col-03-64	E. Méx.	Tepetlixpa	19° 16'	98° 49'	2 393	Ancho		
Col-6784	E. Méx.	Chalco	19° 16'	98° 54'	2 240	Chalqueño	Herrera <i>et al.</i> , 2004	
F <sub>HC</sub> H-129F <sub>n</sub>	E. Méx.	Texcoco	19° 29'	98° 53'	2 250	Chalqueño	Romero <i>et al.</i> , 2002	
Zac-66	Zac.	Jerez	22° 38'	102° 58'	1 900	Chalq-Cónico	LAMP, 1991	
Oax-814	Oax.					Chalq-Cónico	LAMP, 1991	
Jal-335	Jal.	Lagos de M.	21° 22'	101° 55'	2 130	Chalq-Celaya		
Tlax-151	Tlax.	Cuapiaxtla	19° 18'	97° 45'	2 483	Chalq-Cónico	Gámez <i>et al.</i> , 1996	
Urg-II	Uruguay					Cateto Sulino	Castillo y Goodman, 1989	
VS-22	Mich.	Zacapu	19° 31'	98° 53'	2 353	Chalq-Cónico	Romero <i>et al.</i> , 2002	
Arg-III	Argentina					Cateto Sulino	Castillo y Goodman, 1989	
Progenitores		Cruzas adicionales					Híbridos	
Qro-46	Qro-46 x Hgo-4		Méx-581 x Col-6784				H-28	
Méx-581	Dgo-189 x Qro-46		Zac-66 x Méx-581				H-33	
Pob-85 C4	Gto-142 x Qro-46		Pob-85 C4 x Zac-66				H-40	
Pob-800 C5	Méx-633 x Qro-46		VS-22 x Pob-85 C4				H-52	
	Qro-46 x Oax-814		Pob-800 C5 x Méx-581				H-64-E	
	Méx-581 x Dgo-189		Pob-800 C5 x Tlax-151				H-66-E	
	Méx-581 x Gto-208		Pob-800 C5 x Oax-708					

Lat= latitud; Long= longitud; Alt= altitud (metros). Fuente: García (1988).

**Obtención y evaluación de la F<sub>1</sub>.** Los cruzamientos dialélicos se realizaron en el ciclo agrícola primavera-verano 2006 en el Valle de México y otoño-invierno 2006-2007 en Iguala, Guerrero, mientras que la evaluación de las cruzas se realizó

It also included 14 additional single crosses, four additional progenitor populations and six commercial hybrids as controls (Table 1). Additional germplasm material is adapted to the high valleys of Mexico whose heterotic patterns are already established.

**Collection and evaluation of the F<sub>1</sub>.** Diallel crosses were made in the spring-summer crop season, 2006 in the Valley of Mexico and, autumn-winter, 2006-2007 in Iguala, Guerrero, while the evaluation of crosses were made in the spring-summer crop season, 2006 in Zotoluca, Apan, Hidalgo, Mixquiahuala, Hidalgo and Santa Lucía, Texcoco, State of Mexico (Table 2).

In the first two locations were planted in farmers' fields and in the third one, on the grounds of the Experimental Field Valley of Mexico, INIFAP. At all three locations

we used a lattice experimental design 12x12 with three replications. Planting dates were 5, 9 and 10 of May, 2006 in Zotoluca, Mixquiahuala, and Santa Lucía respectively.

en el ciclo agrícola primavera-verano 2006 en las localidades de Zotoluca, Apan, Hidalgo, Mixquiahuala, Hidalgo y Santa Lucía, Texcoco, Estado de México (Cuadro 2).

In the towns of Mixquiahuala and Santa Lucía, the experimental plot consisted of a row of 5.5 m long and 0.8 m wide, while in Zotoluca, was 4.5 m long and 0.8 m wide.

**Cuadro 2. Ubicación geográfica y características climatológicas de las localidades donde se realizó el estudio.**  
**Table 2. Geographical location and climatic characteristics of the locations where the study was conducted.**

Localidad	Ubicación		Altitud (msnm)	Temp. Prom. (°C)	Precip. (mm)	Clima
	Lat.	Long.				
Zotoluca	19° 37'	98° 31'	2599	14.4	622.0	Subhúmedo templado
Mixquiahuala	20° 14'	99° 12'	2050	17.0	509.0	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 del INIFAP. En las tres localidades se utilizó un diseño experimental látice 12 x 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 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 mil plantas por hectárea. En las tres localidades se sembró y se desarrolló el cultivo bajo condiciones de temporal, se fertilizó usando la dosis 140-40-00, y el manejo del cultivo se realizó de acuerdo a las recomendaciones hechas para cada región.

**Variabes evaluadas.** Se midieron y registraron 21 variables; de estas, se eligió 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) como las de mayor relevancia. Mediante un análisis de componentes principales. Dicho análisis no se incluyó debido a que sólo sirvió para seleccionar las variables que más aportaron a la explicación de la variación del cultivo.

**Análisis estadísticos.** Se utilizó el paquete SAS (SAS Institute, 1999) para realizar análisis de varianza y calcular los efectos de ACG y ACE (Griffing, 1956). En el análisis de varianza, la variación entre los tratamientos se dividió en grupos (dialélico, progenitores, cruza adicionales, progenitores adicionales e híbridos comerciales como testigos) y tratamientos dentro de grupo, haciendo lo correspondiente para la interacción

At planting time, three seeds were placed every 0.5 m, to finally leave two plants, and thus establish a population density of 50 000 plants per hectare. In all three locations was planted and grew the crop under rainfed conditions, the dose was fertilized using 140-40-00, and crop management was performed according to the recommendations for each region.

**Variabes evaluadas.** 21 variables were measured and recorded; of these, we chose grain yield (REN), grain index (GI), ears per plant (MP), ear diameter (DM), grain length (LGR), number of rows per ear (NHM), days to male flowering (DFM) and plant height (AP) as the most relevant.

**Statistical analysis.** SAS Package was used (SAS Institute, 1999) for analysis of variance and calculating the effects of GCA and SCA (Griffing, 1956). In the analysis of variance, the variation between treatments was divided into groups (diallel, parents, additional crosses, additional commercial hybrids and parents as controls) and, treatments within the group, making it appropriate for locality-treatment interaction. With the information from the diallel crosses (105) and their parents (15), a diallel analysis was performed using Griffing's method II with fixed effects; also estimating GCA and SCA effects based on the following statistical model:

$Y_{ijk} = \mu + g_i + g_j + s_{ij} + l_k + gl_{ik} + gl_{jk} + sl_{ijk} + e_{ijk}$ , where:  $i, j = 1, 2, \dots, p$  parents,  $k = 1, 2, \dots, l$  locality,  $Y_{ijk}$  = phenotypic value of the  $ij$ -th crosses the locality  $K$ ;  $\mu$  = average of the population,  $g_i, g_j$  = GCA effect of the parents  $i$  and  $j$ ;  $s_{ij}$  = effect of SCA for the combination of the  $i$ -th with the  $j$ -th parent;  $gl_{ik}, gl_{jk}$  = GCA interaction effect with the locality;  $sl_{ijk}$  = interaction effect of SCA with the locality;  $e_{ijk}$  = random environmental effect corresponding to the observation  $i, j, k, r$ .

localidad-tratamiento. Con la información de las cruzas dialélicas (105) y de sus progenitores (15) se realizó el análisis dialélico usando el método II de Griffing con efectos fijos; además se estimaron los efectos de ACG y ACE con base en el modelo estadístico siguiente:

$Y_{ijk} = \mu + g_i + g_j + s_{ij} + l_k + gl_{ik} + gl_{jk} + sl_{ijk} + e_{ijk}$ ; donde:  $i, j = 1, 2, \dots, p$  progenitores;  $k = 1, 2, \dots, l$  localidad,  $Y_{ijk}$  = Valor fenotípico de la  $ij$ -ésima cruce en la localidad  $k$ ;  $\mu$  = Media de la población;  $g_i, g_j$  = Efecto de ACG de los progenitores  $i$  y  $j$ ;  $s_{ij}$  = Efecto de ACE para la combinación del  $i$ -ésimo con el  $j$ -ésimo progenitores;  $gl_{ik}, gl_{jk}$  = interacción del efecto de ACG con la localidad;  $sl_{ijk}$  = interacción del efecto de ACE con la localidad;  $e_{ijk}$  = efecto ambiental aleatorio correspondiente a la observación  $i, j, k, r$ .

## Resultados y discusión

**Análisis global.** En el Cuadro 3, se muestran los cuadrados medios del análisis de varianza combinado observándose 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  $loc \times grupo$  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 para todas las variables, y su interacción con localidad ( $loc \times trat$ ) mostró alta significancia 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.

Al analizar los tratamientos dentro de cada grupo, se detectaron diferencias para siete de las ocho 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 cruzas del arreglo dialélico y entre progenitores adicionales para rendimiento de grano, mazorcas por planta, diámetro de mazorca y largo de grano entre las cruzas del arreglo dialélico 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. Este comportamiento se debe a la diversidad genética de los progenitores; al respecto, Guillén *et al.* (2009) encontraron

## Results and discussion

**Global analysis.** Table 3 shows the mean squares of the combined analysis of variance observing highly significant differences ( $p \leq 0.01$ ) between locations, between groups and between populations (treatments) within groups for the variables, while the  $loc \times group$  interaction was highly significant only for grain yield and ears per plant, and significant ( $p \leq 0.05$ ) for ear diameter and plant height. Among the populations within the groups was highly significant for all the variables, and their interaction with the locality ( $loc \times trat$ ) showed high significance for the variables grain yield, ears per plant, ear diameter, grain length and days to male flowering and significant for plant height.

Analyzing the treatments within each group, differences were detected for seven out of the eight variables considered, while ears per plant in the hybrid group showed no significance at all. The differences between the treatments within each group, considering the interaction with the locality were significant and highly significant for days to male flowering variables among diallel crosses arrangement between parents and additional grain yield, ears per plant, ear diameter and long grain arrangement between diallel crosses and between parents of such arrangement, for grain index and grain length between additional crosses; and for plant height only between parent diallel arrangement. This behavior is due to the genetic diversity of the parents, in this regard, Guillén-De la Cruz *et al.* (2009) found that, by increasing the genetic diversity of the parents, it also increases the differences between their crosses, both agronomic and physiological characteristics.

When analyzing the sources of variation in GCA and SCA crosses, differences were highly significant for the eight variables considered, with a greater variation in GCA than in SCA. The statistical significance of GCA and SCA indicated that additive genetic effects and dominance are involved in the yield and its components as well as the morphology and phenology of the plant, as reported by De la Rosa *et al.*, 2000 in papers on heterosis, combining ability and genetic diversity in commercial maize hybrids. The relative proportion of GCA and SCA effects determined by the mean squares indicates the type of gene action (Antuña *et al.*, 2003).

que a medida que se incrementa la diversidad genética de los progenitores, se incrementan las diferencias entre sus cruzas, tanto en características agronómicas como fisiológicas.

Overall, the mean square analysis shows that additive genetic effects (GCA) presented a greater expression in the variables, and indicates the relative importance of

**Cuadro 3. Cuadrados medios del análisis de varianza combinado de la evaluación de cruzas entre poblaciones nativas del Altiplano de México para ocho variables. Tres localidades de Valles Altos de México. Primavera-verano, 2006.**  
**Table 3. Mean squares of the combined analysis of variance of the evaluation of the crosses between native populations of the Mexican Plateau for eight variables. Three localities in Mexico Highlands. Spring-summer 2006.**

FV	GL	REN (t ha <sup>-1</sup> )	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**	4.80**	0.51**	130.64**	758.50**	2.13**
Trat (grupo)	139	7.12**	23.63**	0.10**	1.02**	0.20**	20.94**	192.75**	0.32**
Trat (dial.)	104	6.42**	17.20**	0.10**	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 (cruzas adic.)	13	4.50**	18.99**	0.07**	0.73**	0.20**	10.61**	311.28**	0.23**
Trat (prog. adic.)	3	12.72**	50.62**	0.09*	2.04**	0.66**	4.48*	834.32**	1.30**
Trat (hib.)	5	3.18*	16.85**	0.05	0.30**	0.12**	10.74**	48.70**	0.28**
Trat (dialélico II)	119	9.02**	24.18**	0.11**	1.10**	0.20**	22.76**	170.69**	0.31**
ACG	14	28.63**	145.19**	0.47**	6.53**	1.23**	162.37**	964.24**	1.57**
ACE	105	6.40**	8.04**	0.06**	0.37**	0.06**	4.14**	64.88**	0.14**
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**	3.60	0.04**	0.12**	0.02**	1.60	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 (hib)	10	0.59	3.14	0.03	0.02	0.02	0.86	17.12*	0.03
Loc*trat (dial. II)	238	2.80**	3.88*	0.04**	0.13**	0.02**	1.56	13.07**	0.04**
Loc*ACG	28	10.46**	9.54**	0.10**	0.33**	0.06**	1.97	37.63**	0.06**
Loc*ACE	210	1.78**	3.13	0.04**	0.10	0.02	1.50	9.79	0.04*
Error	858	1.25	3.57	0.03	0.09	0.02	1.62	9.31	0.03
Total	1295								
CV		19.60	2.10	16.00	5.80	10.70	8.60	3.40	7.10

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; Loc= localidad; Rep= repetición; Trat= tratamientos; dial.= dialélico; prog.= progenitor; cr. adic.= cruzas adicionales; prog. Adic.= progenitores adicionales; hib.= Híbridos; ACG= aptitud combinatoria general; ACE= aptitud combinatoria específica; \*= indica la interacción.

Al desglosar las fuentes de variación cruzas en ACG y ACE, se presentaron diferencias altamente significativas para las ocho variables consideradas, siendo mayor la variación en ACG que en ACE. La significancia estadística de ACG y ACE indican que los efectos genéticos aditivos y de dominancia están involucrados en el rendimiento y sus componentes, así

additive gene action on non-additive effects (Pswarayi and Vivek, 2008) in contrast; non-additive gene action was less relevant. In the interaction of these effects with local significance was detected for seven of the eight variables considered, except for the number of rows per ear that was not significant.

como en la morfología y fenología de la planta, tal como lo reportaron De la Rosa *et al.*, 2000 en su trabajo sobre heterosis, habilidad combinatoria y diversidad genética en híbridos comerciales de maíz. La proporción relativa de los efectos de ACG y ACE determinada por los cuadrados medios, indica el tipo de acción génica (Antuna *et al.*, 2003).

En general, el análisis de los cuadrados medios muestra, que los efectos genéticos aditivos (ACG) fueron de mayor expresión en las ocho variables, e indica la importancia relativa de la acción génica aditiva sobre los efectos no aditivos (Pswarayi y Vivek, 2008), en cambio, la acción génica no aditiva tuvo menor relevancia. En la interacción de tales efectos con la localidad se detectó significancia para siete de las ocho variables consideradas, excepto para número de hileras por mazorca que resultó no significativa.

**Análisis por grupos.** En promedio de las tres localidades, el grupo de los híbridos comerciales fue superior para seis de las ocho características, mientras que para días a floración masculina y altura de planta la mayor expresión correspondió al grupo de cruza dialélicas y al de sus progenitores (Cuadro 4).

**Cuadro 4. Valores medios por grupo de poblaciones del Altiplano mexicano y sus cruzamientos para las ocho características consideradas. Primavera-verano, 2006.**

**Table 4. Average values per group of Mexican Plateau populations and their crosses for the eight characteristics. Spring-summer 2006.**

Grupo	REN (t ha <sup>-1</sup> )	IG (%)	MP (Núm.)	DM (cm)	LGr (cm)	NHM (Núm.)	DFM (días)	AP (m)
Cruzas Dialélicas	5.90b	88.10a	1.05a	5.16b	1.27a	14.65c	89.83b	2.56a
Prog. de Cruzas Dialélicas	4.50c	87.29b	0.96b	4.95c	1.20b	14.49c	91.45a	2.48a
Cruzas Adicionales	5.72b	88.20a	1.01a	5.16b	1.28a	15.77b	87.83c	2.43b
Prog. de Cruzas Adicionales	3.73d	86.14c	0.95b	4.69d	1.07c	15.41b	88.19c	2.26c
Híbridos Comerciales	6.79a	88.44a	1.08a	5.49a	1.30a	17.40a	83.41d	2.27c
DSH <sub>(0.05)</sub>	0.87	0.82	0.07	0.13	0.06	0.55	3.00	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 cruza dialélicas y el de cruza 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 cruza dialélicas con el de sus progenitores, se observó superioridad del primero con respecto al segundo en la expresión de todas las variables.

**Análisis por localidad y grupo.** En promedio de los 144 genotipos, siete de las ocho variables sobresalieron en Santa Lucía, mientras que de acuerdo con la floración

**Analysis by groups.** An average of the three locations, the group of commercial hybrids was higher for six of the eight characteristics, while for days to male flowering and plant height increased expression corresponded to the group of diallel crosses and their parents (Table 4).

The group of diallel crosses and the additional crosses followed in order of importance in the expression of the variables, while the groups of parents and additional parents had the lowest expression of them all. When comparing the group of diallel crosses with that of their parents, it was observed superiority of the former to the latter in the expression of all the variables.

**Analysis by location and group.** On average of the 144 genotypes, seven variables excelled in St. Lucia, while according to male flowering, genotypes were late in Zotoluca. In loc x group interaction, grain yield and ears per plant were highly significant so, in order to analyze the means per group in each locality, we observed that the group of commercial hybrids reached yields of 7.5, 6.8 and

6.0 t ha<sup>-1</sup>, while the diallel crosses was 6.9, 5.5 and 5.3 t ha<sup>-1</sup> in the localities of Santa Lucía, Mixquiahuala and Zotoluca, respectively (Table 5).

**General combining ability (GCA).** The Table 6 shows the values of GCA effects, indicating that populations Gto-142, Col-03-64, Col-6784, F<sub>HC</sub>H-129F<sub>n</sub>, Tlax-151 and VS-22 had the highest expression, all with positive effects, and also with the highest values recorded *per se*; *i.e.* on average of the three localities, these populations generated the best combinations. These results indicate that these populations



masculina, los genotipos fueron más tardíos en Zotoluca. En la interacción Loc x 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 7.5, 6.8 y 6.0 t ha<sup>-1</sup>, mientras que el de las cruas dialélicas fue de 6.9, 5.5 y 5.3 t ha<sup>-1</sup> en las localidades de Santa Lucía, Zotoluca y Mixquiahuala, respectivamente (Cuadro 5).

have a high contribution to the expression of the traits in their offspring, and that the additive effects are most important; therefore, might be included in a breeding program, for contributing with the superior alleles (Vacaro *et al.*, 2002; Preciado *et al.*, 2005; Guillén-De la Cruz *et al.*, 2009).

Furthermore, in the crossing scheme is included two populations of the race Cateto Sulino, one from Uruguay and another one from Argentina, who have driven more than

**Cuadro 5. Valores promedio por grupo de poblaciones del Altiplano mexicano y sus cruas en cada localidad para las variables de mayor relevancia. Primavera-verano, 2006.**

**Table 5. Average values per group of Mexican Plateau populations and their crosses in each location for the most relevant variables. Spring-summer 2006.**

Grupo	REN (t ha <sup>-1</sup> )	IG (%)	DM (cm)	MP (Núm.)	LGr (cm)	NHM (Núm.)	DFM (días)	AP (m)
<b>Zotoluca, Apan, Hgo.</b>								
Cruas dialélicas	5.49c	86.75d	4.97e	1.04b	1.18c	14.49g	103.21a	2.50c
Prog. de cruas dialélicas	4.55d	86.01d	4.85f	0.98c	1.13d	14.52g	105.16a	2.39d
Cruas adicionales	5.44c	86.91c	5.02e	1.03b	1.19c	15.83e	101.31b	2.32d
Prog. cruas adicionales	4.25d	84.73f	4.54g	1.02c	1.00f	15.06f	102.92a	2.13f
Híbridos comerciales	6.81a	87.84b	5.49a	1.17a	1.25b	16.91c	96.11c	2.20e
Promedio general	5.31b	86.45c	4.97c	1.05a	1.15b	15.36c	101.74a	2.31b
<b>Mixquiahuala, Hidalgo</b>								
Cruas dialélicas	5.32c	88.72a	5.21c	0.93d	1.34a	14.33g	85.06g	2.38d
Prog. de cruas dialélicas	3.86e	87.59c	4.98e	0.90d	1.24b	14.09h	85.64g	2.33d
Cruas adicionales	5.27c	89.27a	5.15d	0.90d	1.32a	15.22f	83.02h	2.30d
Prg. de cruas adicionales	2.60f	86.73d	4.75g	0.83d	1.10d	15.45e	83.50h	2.18e
Híbridos comerciales	6.04b	88.84a	5.42b	0.96c	1.33a	17.21b	79.22i	2.18e
Promedio general	4.62c	88.23a	5.10a	0.90c	1.27a	15.26c	83.29b	2.27b
<b>Santa Lucía, Texcoco, Estado de México</b>								
Cruas dialélicas	6.88a	88.82a	5.28c	1.17a	1.30a	15.13f	81.21i	2.81a
Prog. de cruas dialélicas	5.08c	88.28b	5.02e	1.01c	1.23b	14.87f	83.56h	2.72a
Cruas adicionales	6.45b	88.43b	5.31b	1.10b	1.33a	16.27d	79.14i	2.68a
Prog. cruas adicionales	4.34d	86.96c	4.78f	1.02c	1.11d	15.72e	78.17j	2.47c
Híbridos comerciales	7.51a	88.64a	5.56a	1.12a	1.33a	18.07a	74.89k	2.43c
Promedio general	6.05a	88.23a	5.19a	1.08a	1.26a	16.01a	79.39c	2.62a
DSH <sub>(0.05)</sub> grupos	0.87	0.82	0.13	0.07	0.06	0.55	3.00	0.13
DSH <sub>(0.05)</sub> 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.

**Aptitud combinatoria general (ACG).** En el Cuadro 6 se muestran los valores de los efectos de ACG, que indican que las poblaciones Gto-142, Col-03-64, Col-6784, F<sub>HC</sub>H-129F<sub>n</sub>, Tlax-151 y VS-22 fueron las de mayor expresión, todas con efectos positivos, y también con los máximos valores *per se* registrados; es decir, en promedio de las tres localidades estas

10 generations in the highlands of Mexico, selecting the best performing individuals; however, GCA effects of these populations were negative for all the traits considered (Table 6), thereby showing that on average will produce crosses with little potential when combined with local populations.

poblaciones generaron las mejores combinaciones. Éstos resultados indican que dichas poblaciones tienen una alta contribución en la expresión de las características evaluadas en sus progenies, y que los efectos aditivos son los más importantes; por lo tanto, pueden incluirse en un programa de mejoramiento genético de maíz, para contribuir con alelos superiores (Vacaro *et al.*, 2002; Preciado *et al.*, 2005; Guillén *et al.*, 2009).

Además, en el esquema de cruzamientos se incluyó a dos poblaciones de la raza Cateto Sulino, una de Uruguay y otra de Argentina, que se han manejado por más de 10 generaciones en el Altiplano de México, seleccionando a los individuos de mejor comportamiento; sin embargo, los efectos de ACG de dichas poblaciones fueron negativos para las ocho características consideradas (Cuadro 6), mostrando con ello que en promedio producirían cruzamientos con poco potencial al combinarse con las poblaciones locales.

Romero *et al.* (2002) in their study of "genetic divergence and heterosis" found that, as the genetic divergence of the parents increases, also increases the difference in the values of combining ability for either GCA or SCA, or to the two types of gene action. In the same context, it is noteworthy that, the outstanding populations showed higher values in yield components (ear diameter, length and number of grain rows per ear), the same ones that determined the performance expression, similar to that recorded by De la Cruz (2003) in his paper on combining ability and heterosis in exotic maize in the State of Jalisco.

If VS-22 is considered as reference to Mich-21, a population that has been part of many commercial hybrids, we can see that according to the registered GCA effects, other populations with diverse backgrounds who can contribute to

**Cuadro 6. Efectos de ACG de 15 poblaciones progenitoras evaluadas en tres localidades del Altiplano Mexicano. Primavera-verano, 2006.**

**Table 6. GCA effects of 15 progenitor populations evaluated in three localities of the Mexican Plateau. Spring-summer 2006.**

Genealogía	REN (t ha <sup>-1</sup> )	IG (%)	MP (No)	DM (cm)	LGr (cm)	NHM (No)	DFM (días)	AP (m)
F <sub>HC</sub> H-129F <sub>n</sub> (10)	0.59a	-1.11	0.11a	-0.03	-0.07	0.10	5.47a	0.19a
Gto-142 (6)	0.56a	-0.14	0.04b	0.18b	0.02	0.81c	0.14	0.01
Col-6784 (9)	0.49a	0.61b	-0.09	0.36a	0.12b	0.40	0.71	0.12b
VS-22 (21)	0.43b	0.42c	0.02b	0.10c	0.04	1.22b	-1.93	-0.03
Tlax-151 (18)	0.17c	0.61b	0.00	0.12c	0.05	1.52a	-2.94	-0.02
Col-64-03 (8)	0.14c	0.74b	-0.03	0.09c	0.08c	-2.36	1.82c	0.10b
Gto-208 (5)	0.10	-0.16	-0.01	0.03	0.02	-0.25	2.59b	0.06c
Jal-335 (16)	0.01	-2.06	-0.04	0.04	-0.08	-0.73	0.21	0.03
Oax-814 (15)	-0.02	0.48c	0.09a	-0.14	-0.01	-0.81	1.70c	-0.01
Zac-66 (12)	-0.10	0.84b	0.03b	0.00	0.03	1.23b	0.27	-0.02
Méx-633 (7)	-0.14	1.88a	-0.07	0.12c	0.15a	0.48	-1.52	-0.01
Hgo-4 (2)	-0.33	-0.53	-0.01	-0.15	-0.08	-0.14	-5.37	-0.19
Dgo-189 (3)	-0.33	0.09	-0.06	0.07	0.02	0.29	0.17	0.04c
Urg-II (20)	-0.73	-1.11	-0.03	-0.29	-0.12	-0.86	-0.26	-0.12
Arg-III (22)	-0.84	-0.56	0.04b	-0.50	-0.17	-0.90	-1.06	-0.16
DSH <sub>(0.05)</sub>	0.15	0.26	0.02	0.04	0.02	0.17	0.41	0.02

ACG= aptitud combinatoria general; 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.

Romero *et al.* (2002) en su estudio sobre "divergencia genética y heterosis" encontró que a medida que la divergencia genética de los progenitores incrementa, aumenta también la diferencia para los valores de aptitud combinatoria, ya sea para ACG o para ACE, o bien para los dos tipos de acción génica. En el mismo contexto, cabe destacar que las poblaciones sobresalientes mostraron valores superiores en los componentes del rendimiento (diámetro de mazorca, largo de grano y número de hileras por mazorca), mismos que determinaron la expresión

the genetic improvement of maize and so far little attention has been paid to their potential as the sources to increase the genetic base of commercial hybrids.

**Specific combining ability.** The Table 7 shows the average value and the effects of SCA of diallel crosses, showing positive and negative values with statistical differences ( $p < 0.01$ ) indicated in Table 3 of the analysis of variance. Based on the average behavior of genotypes within each

del rendimiento, de manera semejante a lo que registró De la Cruz (2003) en su trabajo sobre heterosis y aptitud combinatoria en maíces exóticos en el estado de Jalisco.

Si se considera a VS-22 como referencia de Mich-21, población que ha formado parte de muchos híbridos comerciales, se observa que de acuerdo con los efectos de ACG registrados existen otras poblaciones con orígenes diversos que pueden aportar al mejoramiento genético del maíz y que hasta ahora se ha prestado poca atención a sus potenciales como fuentes para incrementar la base genética de los híbridos comerciales.

**Aptitud combinatoria específica.** En el Cuadro 7, se muestra el valor promedio y los efectos de ACE de las cruzas dialélicas, observándose valores positivos y negativos con diferencias estadísticas de ( $p < 0.01$ ) indicadas en el Cuadro 3 del análisis de varianza. Con base en el comportamiento promedio de los genotipos dentro de cada grupo, se observó que en el grupo de cruzas dialélicas y en el de cruzas adicionales, se obtuvieron valores iguales o superiores a los mostrados por los mejores híbridos comerciales para las ocho características relevantes. Para REN el valor máximo fue de 7.9, 6.8 y 7.6 t ha<sup>-1</sup> en el grupo de las cruzas dialélicas, cruzas adicionales y en el de los híbridos comerciales, respectivamente. Resultados similares reportaron De la Cruz Lázaro *et al.*, 2005 en su estudio “análisis dialélico de líneas de maíz QPM para características forrajeras”.

En el grupo de las cruzas dialélicas, los cruzamientos con mayor expresión promedio para esta variable fueron 10 x 15, 6 x 8, 9 x 15, 8 x 21, 3 x 10, 6 x 18, 9 x 12, 12 x 16, 10 x 21 y 6 x 15, superando al promedio de los seis híbridos comerciales testigo; además, nueve de los diez cruzamientos indicados resultaron sobresalientes para efectos de ACE, donde el máximo valor fue de 1.6 t ha<sup>-1</sup> correspondiendo al primer cruzamiento enlistado (Cuadro 7). Se detectó que los cruzamientos con ACE de mayor magnitud combinan poblaciones de origen geográfico contrastado en el área de distribución de la raza Chalqueño, y que la magnitud de los efectos registrados para REN está ampliamente relacionada con los efectos que tuvieron los componentes de rendimiento.

Las poblaciones que participaron con mayor frecuencia como progenitores en los cruzamientos sobresalientes para las ocho variables fueron, Gto-142, Méx-633, Col-03-64, Col-6784, F<sub>HC</sub> H-129F<sub>n</sub> y VS-22, con origen en Guanajuato, estado de México y Michoacán, pertenecientes a la raza Chalqueño, Chalqueño-Celaya y Chalqueño-Cónico. Dichas poblaciones tuvieron efectos positivos altos de ACG, al combinarse en su mayoría con las poblaciones Oax-814, Zac-66, Dgo-189, Jal-

group, it was observed that in the group diallel scheme of crosses in the additional values were equal or superior to those displayed by the best commercial hybrids relevant to the eight characteristics. For REN's maximum value was 7.9, 6.8 and 7.6 t ha<sup>-1</sup> in the group of diallel crosses, additional crosses, and commercial hybrids, respectively. Similar results reported by De la Cruz Lázaro *et al.*, 2005 in their study "diallel analysis on QPM lines for forage characteristics".

In the group of diallel crosses, the crosses with higher average for this variable expression were 10 x 15, 6 x 8, 9 x 15, 8 x 21, 3 x 10, 6 x 18, 9 x 12, 12 x 16, 10 x 21 and 6 x 15, exceeding the average of the six commercial control hybrids; also, nine of the ten crosses indicated were outstanding for SCA purposes, where the maximum value was 1.6 t ha<sup>-1</sup> corresponding to the first cross listed (Table 7). It was found that, SCA crosses of higher magnitude, combine populations of geographical origin, contrasting in the distribution area of Chalqueño, and that the magnitude of the effects recorded for REN is largely related to the effects that the performance components had.

The populations most frequently involved as parents in crosses outstanding for eight variables were, Gto-142, Méx-633, Col-03-64, Col-6784, F<sub>HC</sub> H-129F<sub>n</sub> and VS-22, from Guanajuato, State of Mexico and Michoacan, belonging to Chalqueño, Chalqueño-Celaya and Chalqueño-Taper. These populations had high positive GCA effects when combined mostly with populations Oax-814, Zac-66, Durango-189, QC-335 and Tlax-151, belonging to other variants of this race (Chalqueño-Celaya, Chalqueño-Taper), from the States of Oaxaca, Zacatecas, Durango, Jalisco and Tlaxcala. Populations belonging to Chalqueño variants had significant influence on the expression of crosses for the variables considered outstanding, where most of these crosses had mean values and high SCA effects as well (Table 7).

In the group of additional crosses (Table 8) were included crosses that will cover the geographical area of the Highlands of Mexico and represent any of the heterotic patterns currently used, with the case of VS-22 x Pob-85 C4, which to some extent represents the combination utilized in several commercial hybrids released in recent decades (H-40, H-48, H-50, among others), which participates Mich-21 and one of CIMMYT's outstanding populations; however, in this group as in the diallel crosses of salient behaviors were observed in crosses involving parents than those described above, markedly exceeding the term of the controls and their own parents, indicating

335 y Tlax-151, pertenecientes a otras variantes de esta raza (Chalqueño-Celaya, Chalqueño-Cónico), con origen en los estados de Oaxaca, Zacatecas, Durango, Jalisco y Tlaxcala. Las poblaciones pertenecientes a las variantes de Chalqueño tuvieron influencia importante sobre la expresión de los cruzamientos sobresalientes para las variables consideradas, donde dichos cruzamientos en su mayoría tuvieron tanto valores promedio como efectos de ACE altos (Cuadro 7).

En el grupo de cruza adicionales (Cuadro 8) se incluyeron cruzamientos que en lo posible abarcaran el área geográfica de los Valles Altos de México y que representaran alguno de los patrones heteróticos que actualmente se utilizan, siendo el caso de la cruce VS-22 x Pob-85 C4, que en cierto grado representa a la combinación aprovechada en varios híbridos comerciales liberados en los últimos lustros (H-40, H-48, H-50, entre otros), donde participa Mich-21 y una de las poblaciones sobresalientes del CIMMYT; sin embargo, tanto en este grupo como en el de las cruza dialélicas se observaron comportamientos sobresalientes en cruzamientos en los que participaron progenitores distintos a los descritos anteriormente, superando de forma notoria la expresión de los testigos y de sus propios progenitores, lo que indica la existencia de combinaciones heteróticas importantes y que aparte de los patrones ya definidos durante varios años, existen otros potenciales que pueden ser utilizados en los programas de mejoramiento genético de maíz en México para generar híbridos y variedades mejoradas con propósitos diversos que satisfagan las necesidades de los productores (Cuadro 8).

the existence of significant heterotic combinations and that besides patterns already defined for several years, there are other potentials that can be used in breeding programs in Mexico to produce maize hybrids and improved varieties for different purposes that would meet the needs of the producers (Table 8).

## Conclusions

Based on the maximum values *per se* and GCA positive effects for the evaluated variables, the populations Gto-142, Col-03-64, Col-6784, F<sub>HC</sub>H-129Fn, Zac-66, Tlax-151 and VS-22 can be characterized as good outstanding line-generator parents (additive effect) for both, grain yield and its components as for the expression of other morphological and phenological traits.

Combinations of the populations with good GCA were detected with others of different geographical origins such as Oax-814, Dgo-189 and Jal-335 with high SCA, which implies positive interactions that can generate superior hybrids in perspective, given that the use of this combinations could outperform the current hybrids.

*End of the English version*



### Cuadro 7. Valor promedio y ACE de cruza dialélicas sobresalientes evaluadas en tres localidades del Altiplano mexicano. Primavera-verano, 2006.

Table 7. Average value and outstanding SCA diallel crosses evaluated in three localities of the Mexican Plateau. Spring-summer 2006.

No	Prog.		REN (t ha <sup>-1</sup> )		IG (%)		MP		DM (cm)		LGr (cm)		NHM		DFM (d)		AP (m)	
	i	Pj	Med	ACE	Med	ACE	Med	ACE	Med	ACE	Med	ACE	Med	ACE	Med	ACE	Med	ACE
20	3	10	7.25	1.24	87.29	0.31	1.27	0.18	5.16	-0.02	1.18	-0.03	14.96	-0.07	98.78	3.11	2.91	0.13
41	6	8	7.62	1.16	88.93	0.35	1.01	-0.04	5.61	0.21	1.46	0.10	12.94	-0.14	90.44	-1.55	2.58	-0.07
45	6	15	7.03	0.73	88.63	0.30	1.21	0.04	5.08	-0.10	1.24	-0.04	14.16	-0.48	89.89	-1.98	2.53	-0.01
47	6	18	7.24	0.76	88.14	-0.32	1.13	0.05	5.19	-0.24	1.26	-0.08	16.78	-0.18	85.33	-1.90	2.62	0.08
68	8	21	7.35	1.03	89.18	0.03	1.10	0.07	5.36	0.04	1.37	-0.01	13.28	-0.22	87.67	-2.25	2.72	0.10
71	9	12	7.20	1.04	89.51	0.07	1.16	0.18	5.61	0.12	1.51	0.09	16.27	0.01	90.11	-0.90	2.60	-0.06
72	9	15	7.51	1.28	89.72	0.64	1.12	0.09	5.50	0.14	1.51	0.13	13.72	-0.49	95.89	3.45	2.69	0.03
79	10	15	7.92	1.60	88.74	1.38	1.36	0.12	5.01	0.05	1.28	0.10	13.92	0.00	96.78	-0.42	2.68	-0.05
83	10	21	7.04	0.27	86.92	-0.39	1.18	0.01	5.09	-0.11	1.18	-0.05	15.64	-0.31	96.78	3.21	2.87	0.15
86	12	16	7.11	1.44	87.88	1.10	1.08	0.05	5.60	0.43	1.42	0.21	13.99	-1.14	89.67	-0.84	2.61	0.04
Máximo			7.92	1.60	90.82	2.45	1.36	0.19	5.73	0.59	1.54	0.21	18.41	2.18	99.22	7.55	3.00	0.31
Mínimo			3.05	-2.68	84.94	-2.00	0.81	-0.15	3.93	-0.40	0.82	-0.15	10.97	-1.90	79.89	-6.17	2.07	-0.25
DSH <sub>(0.05)</sub>			2.30	0.61	3.60	1.03	0.34	0.09	0.58	0.16	0.27	0.07	2.56	0.69	6.00	1.66	0.36	0.10

Prog= progenitores; 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; No= número de genotipo; Pi= progenitor i; Pj= progenitor j; Med= valor promedio; ACE= efectos de aptitud combinatoria específica; Máximo= valor promedio máximo; Mínimo= valor promedio mínimo; DSH= diferencia significativa honesta.

**Cuadro 8. Valor promedio de cruzas adicionales sobresalientes evaluadas en tres localidades del Altiplano mexicano. Primavera-verano, 2006.**

**Table 8. Average value of outstanding additional crosses evaluated in three locations of the Mexican Plateau. Spring-summer 2006.**

No	Genealogía	REN	IG	MP	DM	LGr	NHM	DFM	AP
125	Qro-46 (1)x Hgo-4 (2)	5.33a	87.77a	1.02a	4.87b	1.19b	16.34a	89.56b	2.40a
127	Gto-142 (6) x Qro-46 (1)	6.19a	89.76a	1.04a	5.17a	1.31b	16.79a	94.44a	2.52a
129	Qro-46 (1) x Oax-814 (15)	5.29a	88.12a	1.14a	5.17a	1.43a	14.67b	96.78a	2.57a
130	Méx-581 (17) x Dgo-189 (3)	6.09a	87.61a	0.98a	5.38a	1.32b	14.44b	92.67a	2.52a
131	Méx-581 (17) x Gto-208 (5)	5.97a	88.43a	1.04a	5.46a	1.39a	15.48a	90.89b	2.54a
132	Méx-581 (17) x Col-6784 (9)	6.42a	91.21a	0.86b	5.66a	1.59a	16.16a	89.11b	2.57a
133	Zac-66 (12) x Méx-581 (17)	6.70a	87.69a	1.13a	5.28a	1.33b	17.59a	92.22b	2.67a
135	VS-22 (21) x Pob-85 C4 (24)	6.81a	86.69b	1.04a	5.19a	1.19b	16.22a	82.78d	2.38a
136	Pob-800 C5 (25) x Méx-581 (17)	6.23a	87.67a	0.96a	5.37a	1.26b	16.59a	80.78d	2.25b
137	Pob-800 C5 (25) x Tlax-151 (18)	5.33a	87.43a	0.97a	5.16a	1.18c	15.63a	79.56e	2.27b
138	Pob-800 C5 (25) x Oax-708 (23)	5.25a	87.12a	1.03a	4.59b	0.96c	13.38b	79.00e	2.10b
	Máximo	6.8	91.2	1.1	5.7	1.6	17.6	96.8	2.7
	Mínimo	4.6	86.1	0.83	4.6	0.96	13.4	79.0	2.1
	DSH <sub>(0.05)</sub>	2.0	4.2	0.2	0.6	0.2	2.2	4.3	0.3

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; No= número de genotipo; Máximo= valor promedio máximo; Mínimo= valor promedio mínimo; DSH= diferencia significativa honesta.

## Conclusiones

Con base en los valores máximos *per se* y efectos positivos de ACG para las variables evaluadas, las poblaciones Gto-142, Col-03-64, Col-6784, F<sub>HC</sub>H-129Fn, Zac-66, Tlax-151 y VS-22 se pueden caracterizar como buenos progenitores generadores de líneas (efectos aditivos) sobresalientes, tanto para rendimiento de grano y sus componentes como para la expresión de otras características morfológicas y fenológicas.

Se detectaron combinaciones de las poblaciones con buena ACG con otras de origen geográfico divergente como Oax-814, Dgo-189 y Jal-335 con alta ACE, lo que implica interacciones positivas que en perspectiva pueden generar híbridos superiores, dado que el aprovechamiento de ese tipo de combinaciones pudiera superar a los híbridos actuales.

## Literatura citada

Antuna, G. O.; Rincón, S. F.; Gutiérrez, del R. E.; Ruíz, T. N. A. y Bustamante y Bustamante, G. L. 2003. Componentes genéticos de caracteres agronómicos y de calidad fisiológica de semillas en líneas de maíz. *Rev. Fitotec. Mex.* 26:11-17.

Balderrama, C. S.; Mejía, C. A.; Castillo, G. F. y Carballo, C. A. 1997. Efectos de aptitud combinatoria en poblaciones de maíz nativas de Valles Altos de México. *Rev. Fitotec. Mex.* 20:137-147.

Castañón, N. G.; Latournerie, M. L. y Mendoza, E. M. 2005. Macro de SAS-IML para analizar los diseños II y IV de Griffing. *Universidad y Ciencia* 21: 27-35.

Castillo, G. F. and Goodman, M. M. 1989. Agronomic evaluation of Latin American maize accessions. *Crop Sci.* 29: 853-861.

De la Cruz, L. L.; Ron, P. J.; Ramírez, D. J. L.; Sánchez, G. J. J.; Morales, R. M. M.; Chuela, B. M.; Hurtado, de la P. S. A. y Mena, M. S. 2003. Heterosis y aptitud combinatoria entre híbridos comerciales y germoplasma exótico de maíz en Jalisco, México. *Rev. Fitotec. Mex.* 26(1):1-10.

De la Cruz, L. E.; Rodríguez, H. S. A.; Estrada, B. M. A.; Mendoza, P. J. D. y Brito, M. N. P. 2005. Análisis dialéctico de líneas de maíz QPM para características forrajeras. *Universidad y Ciencia.* 21(41):19-26.

De la Rosa, L. A.; De León, C. H.; Martínez, Z. G. y Rincón, S. F. 2000. Heterosis, habilidad combinatoria y diversidad genética en híbridos comerciales de maíz (*Zea mays* L.). *Agron. Mesoam.* 11(1):113-122.

- Gámez, V. A. J.; Ávila, P. M. A.; Ángeles, A. H.; Díaz, H. C.; Ramírez, V. H.; Alejo, J. A. y Terrón, I. A. D. 1996. Híbridos y variedades de maíz liberados por el INIFAP hasta 1996. INIFAP, SAGAR. Toluca, Estado de México. Publicación Especial Núm. 16. 103 p.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen. UNAM. México, D. F. 217 p.
- Griffing, B. 1956. Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Aust. J. Biol. Sci.* 9:463-493.
- Gutiérrez, del R. E.; Espinoza, B. A.; Palomo, G. A.; Lozano, G. J. y Antuna, G. O. 2004. Aptitud combinatoria de híbridos de maíz para la Comarca Lagunera. *Rev. Fitotec. Méx.* 27:7-11.
- Guillén, de la C. P.; De la Cruz, L. E.; Castañón, N. G.; Osorio, O. R.; Brito, M. N. P.; Lozano, del R. A. y López, N. U. 2009. Aptitud combinatoria general y específica de germoplasma tropical de maíz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 10:101-107.
- 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. México, D. F. 678 p.
- Márquez, S. F. 1994. El centro nacional de rescate y mejoramiento de maíces criollos. *In: I Simposium Internacional de Etnobotánica en Mesoamérica "Efraím Hernández X"*. Cuevas, S. J. A.; Estrada, L. E. y Cedillo, P. E. (eds.). Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco, Estado de México. 131-136 pp.
- Montesinos, L. O. A.; Martínez, G. A.; Mastache, L. A. A. y Rendón, S. G. 2005. Mejor predictor lineal e insesgado para aptitud combinatoria específica de los diseños dos y cuatro de Griffing. *Rev. Fitotec. Méx.* 28:369-376.
- Ortega, P. R.; Sánchez, G. J. J.; Castillo, G. F. y Hernández, C. J. M. 1991. Estado actual de los estudios sobre maíces nativos de México. *In: avances en el estudio de los recursos fitogenéticos de México*. Ortega, P. R.; Palomino, H. G.; Castillo, G. F.; González, H. V. A. y Livera, M. M. (eds.). Sociedad Mexicana de Fitogenética, A. C. Chapingo, Méx. 161-185 pp.
- Preciado, O. R. E.; Terrón, I. A. D.; Gómez, M. N. O. y Robledo, G. E. I. 2005. Componentes genéticos en poblaciones heteróticamente contrastantes de maíz de origen tropical y subtropical. *Agron. Mesoam.* 16:145-151.
- Poehlman, J. M. y Allen, D. 2003. Mejoramiento Genético de las cosechas. Guzmán, O. M.; Hernández, C. M. A. y Serrano, C. L. M. (Trad.). Editorial Limusa. México. 506 p.
- Pswarayi, A. and Vivek, B. S. 2008. Combining ability amongst CIMMYT's early maturing maize (*Zea mays* L.) germplasm under stress and non-stress conditions and identification of testers. *Euphytica* 162:353-362.
- Romero, P. J.; Castillo, G. F. y Ortega, P. R. 2002. Cruzas de poblaciones nativas de maíz de la raza Chalqueño: II. Grupos genéticos, genética y heterosis. *Rev. Fitotec. Mex.* 25:107-115.
- Statistical Analysis System (SAS Institute). 1999. The SAS System for Windows. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA. 100-120 pp.
- Sprague, G. F. and Tatum, L. A. 1942. General vs. specific combining ability in single crosses of corn. *J. Amer. Soc. Agron.* 34:923-932.
- Vacaro, E.; Barbosa, N. J. F.; Girardi, P. D.; Natalino, N. C. y Haa, C. L. D. 2002. Combining ability of twelve maize populations. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 37:67-72.