

EFFECTOS GENÉTICOS, HETEROSIS Y DIVERSIDAD GENÉTICA ENTRE HÍBRIDOS COMERCIALES DE MAÍZ ADAPTADOS A EL BAJÍO MEXICANO

GENETIC EFFECTS, HETEROSIS AND GENETIC DIVERSITY AMONG COMMERCIAL MAIZE HYBRIDS ADAPTED TO EL BAJÍO IN MÉXICO

Alfredo de la Rosa Loera*, Humberto de León Castillo, Froylán Rincón Sánchez y Gaspar Martínez Zambrano¹

Departamento de Fitomejoramiento, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, 25315, Saltillo, Coah.
Autor para correspondencia (Adelarosa62@hotmail.com)

RESUMEN

Se evaluaron 13 híbridos comerciales de maíz (*Zea mays* L.) con adaptación a El Bajío, México, y sus 78 cruzas posibles provenientes de un dialélico, con el propósito de identificar híbridos comerciales con valor genético para iniciar un programa de mejoramiento e identificar pares heteróticos y diversidad genética entre híbridos. Los experimentos fueron establecidos en tres ambientes, dos en Celaya, Gto. en diferente fecha de siembra, y otro en Sandia, N.L., en 1996; se usó un diseño bloques completos al azar con dos repeticiones por localidad y dos surcos como unidad experimental. Se estimaron efectos genéticos en rendimiento ($t\ ha^{-1}$), altura de planta (cm), contenido de humedad de grano (%) y días a floración. Las mejores cruzas en promedio de localidades fueron: AS910 x AS4450, PP9538 x AS948 y PP9539 x AN453, con rendimientos de mazorca de 17.5, 17.5 y 17.4 $t\ ha^{-1}$, respectivamente. Las cruzas con los valores de heterosis más altos con base en la media de los padres, fueron: PP9603 x PP9539, PP9539 x AN453, PP9539 x AN447, con 13.9, 12.8 y 11.1 %, respectivamente. Los híbridos con la mejor aptitud combinatoria general fueron: PP9539, AN447 y AS910, con 1.17, 0.68 y 0.52 $t\ ha^{-1}$, respectivamente, y los mejores en heterosis: PP9539, A7500 y C220, con 2.27, 1.70 y 1.07 $t\ ha^{-1}$, respectivamente. Los híbridos más relacionados fueron AN450 y AS910, con una distancia genética de 0.033 y heterosis de -47.7 %; los menos relacionados fueron AN454 y A7500, con una distancia de 1.42 y una heterosis de 12.3 %.

Palabras clave: *Zea mays* L., aptitud combinatoria, heterosis, diversidad genética.

SUMMARY

In this research 13 commercial corn (*Zea mays* L.) hybrids adapted to El Bajío México, and their 78 crosses resulting from a diallel, were evaluated in order to identify hybrids with a high genetic value (GCA and heterosis), useful for a maize breeding program, and to determine the heterosis and genetic diversity among these hybrids. The experiments were set up in three environments, two at Celaya, Gto. (two planting dates) and one at Sandia, N. L., during 1996, under a randomized complete block design with two replications, and two rows as experimental unit. Genetic effects were esti-

mated on grain yield ($t\ ha^{-1}$), plant height (cm), grain moisture (%) and days to flowering (d). The best crosses across environments were: AS910 x AS4450, PP9538 x AS948 and PP9539 x AN453, which yielded 17.5, 17.5 and 17.3 $t\ ha^{-1}$, respectively. The highest heterosis based on the midparent were for hybrids PP9603 x PP9539, PP9539 x AN453 and PP9539 x AN 447, with values of 13.9, 12.8 and 11.1 %, respectively. The highest combining ability values were registered in the hybrids PP9539, AN447 and AS910, with 1.17, 0.68 and 0.52 $t\ ha^{-1}$, respectively, and the highest heterosis was found in hybrids PP9539 (2.27), A7500 (1.170) and C220 (1.07). The most related hybrids were AS910 and AN450 with a genetic distance of 0.033 and heterosis of -47.7 %; the most diverse hybrids were AN454 and A7500 with a genetic distance of 1.42 and heterosis of 12.3 %.

Index words: *Zea mays* L., combining ability, heterosis, genetic diversity.

INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays* L.) es el cultivo más importante en México por varias razones: se producen alrededor de 18.2 millones de toneladas en una superficie de 8.5 millones de hectáreas y presenta el mayor número de productores (3.2 millones de un total de 4 millones agrícolas), en su mayoría ejidales. Alrededor de 90 % de la producción es de maíz blanco y se destina al consumo humano. Existen dos tipos de productores de maíz: El primer grupo (92 %) corresponde a los que posee predios entre 0 y 5 ha y aportan 56.4 % de la producción total; en general, más de la mitad de su producción se destina al autoconsumo (52 %), y sus rendimientos fluctúan entre 1.3 y 1.8 $t\ ha^{-1}$. En el segundo grupo sólo está 7.9 % de los productores, con predios mayores a 5 ha por productor y aportan 43.6 % de la producción; sus rendimientos oscilan de 1.8 a 12 $t\ ha^{-1}$ y únicamente destinan 13.5 % de su producción al autoconsumo.

A partir de la entrada del Tratado del Libre Comercio de América del Norte (TLCAN), las importaciones de maíz provenientes de Estados Unidos han ido en aumento y actualmente llegan a una tercera parte de la producción nacional (6 millones de toneladas) (Regino 2002; Com. Personal¹). Es necesario incrementar la producción de maíz en México para evitar las continuas y voluminosas importaciones, y la mejor opción es incrementar la productividad mediante el uso eficiente de los recursos disponibles. Entre ellos, el material genético mejorado ofrece una de las mejores opciones para lograr este propósito. El conocimiento de la diversidad genética, heterosis y habilidad combinatoria general y específica del germoplasma de un programa de mejoramiento es esencial para cumplir, entre otros objetivos, el desarrollo de híbridos o variedades, la creación de más variabilidad genética, evitar vulnerabilidad genética e implementar programas de selección recurrente.

La estimación de los parámetros genéticos se obtiene por medio del análisis de los diseños dialélicos propuestos por Griffing (1956) y Gardner y Eberhart (1966). Por otra parte, existen varias formas de medir o estimar la diversidad genética entre genotipos (Garza *et al.*, 1962; Troyer *et al.*, 1988), con base en el resultado de cruzas, autofecundaciones y heterosis de los materiales utilizados. En estudios de patrones heteróticos es común usar líneas, poblaciones y variedades sintéticas; en el presente estudio se utilizaron híbridos comerciales partiendo de los siguientes supuestos: los híbridos están formados por líneas que han pasado por un largo proceso de selección, es decir, líneas que han sobrevivido al menos cuatro a cinco autofecundaciones, y han pasado, por presiones de selección hacia diversas características como rendimiento, resistencia a enfermedades e insectos, acame de raíz y de planta. Por lo tanto, en esta etapa final, han dejado atrás bastante carga genética, de tal forma que los híbridos que llegan a liberarse en forma comercial portan bastantes genes deseables y pocos genes indeseables.

Puesto que los híbridos comerciales pueden ser usados exitosa y ventajosamente en programas de mejoramiento genético, los objetivos del presente trabajo fueron: Identificar híbridos comerciales con valor genético en un programa de mejoramiento para producir híbridos y variedades de alto rendimiento, que contribuyan a mejorar la baja producción, e identificar pares heteróticos entre los híbridos utilizados y agruparlos con base en su diversidad genética.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se llevó a cabo en el Instituto Mexicano del Maíz “Dr. Mario E. Castro Gil” (IMM) de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), en la localidad de Celaya Gto. En 1995 se formaron las F₁ entre los híbridos, y en el ciclo 95-96 en la localidad de Tepalcingo Mor., las cruzas F₁ se llevaron a F₂; en 1996 las 78 cruzas más los 13 híbridos progenitores (Cuadro 1) fueron evaluados en tres ambientes (dos en la localidad de Celaya, Gto., y otro en la localidad de Sandía El Grande, N.L.). Las 78 F₂ fueron evaluadas en un diseño aparte, y únicamente se midió rendimiento para estimar las distancias genéticas.

Cuadro 1. Material genético utilizado en el presente trabajo.

	Híbrido	Compañía	Num. de líneas
1	C220	Cargill	3
2	C221	Cargill	3
3	A7500	Asgrow	3
4	PP9603	Dekalb	2
5	PP9539	Dekalb	2
6	PP9538	Dekalb	2
7	AN447	I.M.M	3
8	AN454	I.M.M	4
9	AN450	I.M.M	4
10	AN453	I.M.M	4
11	AS910	Aspros	4
12	AS4450	Aspros	3
13	AS948	Aspros	3

Celaya, Gto. se sitúa a 20° 32' LN, 100° 49' LO, y una altitud de 1754 m; con temperatura media anual de 20.6 °C y precipitación pluvial anual de 597.3 mm. Sandía El Grande, N. L. se sitúa a 24° 12' LN, 100° 05' LO, y una altitud de 1590 m; con temperatura media anual de 18.3° C y precipitación pluvial anual de 300 mm.

La siembra se efectuó en cada una de los tres ambientes de manera independiente, de acuerdo con las fechas de siembra establecidas regionalmente. En Celaya, Gto. (A₁) se hizo el 30 de abril de 1996; en Celaya, Gto. (A₂) el 30 de junio, y en Sandía El Grande N.L. (A₃) el primero de mayo del mismo año. La parcela experimental fue de dos surcos de 4.41 m de largo por 0.75 m de ancho, para una parcela útil de 6.615 m², con 21 plantas por surco y dos repeticiones por unidad experimental. La siembra del material experimental se llevó a cabo en forma manual, conforme a un diseño en bloques completamente aleatorizados, depositando dos semillas por golpe para posteriormente aclarar a una planta por mata y así asegurar la densidad deseada. Las variables medidas fueron: días a floración (días), altura de planta (cm), humedad de grano (%) y rendimiento de mazorca (t ha⁻¹). El desarrollo del cultivo fue bajo condiciones de riego, con la aplicación oportuna de plaguicidas cuando fue necesario. Se realizó un análisis de aptitud combinatoria general y específica (ACG y

¹ Regino A. Conferencia sobre Producción e Importación de Maíz en México. Centro Cultural San Ángel, México, D.F. 23 de Enero de 2002. pp:23-24.

ACE), con base en el método IV propuesto por Griffing (1956), el cual sólo incluye las cruzas directas F_1 . El modelo lineal aditivo fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + g_i + g_j + s_{ij} + e_{ijk}$$

Donde: Y_{ij} = Valor fenotípico observado de la craza con progenitores i y j ; μ = Media general; g_i, g_j = Efecto de la aptitud combinatoria general del progenitor i y j ; s_{ij} = Efecto de la aptitud combinatoria específica de la craza (ij); e_{ijk} = Error experimental.

También se aplicó el diseño dialéctico del análisis general de efectos genéticos (método II) de Gardner y Eberhart (1966). En este análisis, el modelo matemático de los híbridos o poblaciones (Y_j o $Y_{j'}$) y las cruzas ($Y_{jj'}$) se expresa de la manera siguiente:

$$Y_j = \mu_v + v_j; Y_{j'} = \mu_v + v_{j'}; Y_{jj'} = \mu_v + \frac{1}{2}(v_j + v_{j'}) + h_{jj'}$$

Donde: μ_v = Media de los padres; v_j y $v_{j'}$ = Efecto de los híbridos j y j' ; $h_{jj'}$ = Efecto de la heterosis correspondiente a la craza j y j' .

El efecto de heterosis fue subdividido de la manera siguiente:

$$h_{jj'} = h + h_j + h_{j'} + s_{jj'}$$

Donde: h = Heterosis promedio; h_j = Heterosis varietal contribuida por la variedad j ; $h_{j'}$ = Heterosis varietal contribuida por la variedad j' ; $s_{jj'}$ = Efecto de la heterosis correspondiente a la craza j y j' .

La prueba estadística de los efectos se realizó mediante una prueba de t :

$$t = \frac{\phi}{EE(\phi)}, \text{ donde } \phi = \text{Efecto de ACG o ACE};$$

$EE(\phi)$ = error estándar de ACG o ACE.

La diversidad genética entre híbridos se estimó mediante la fórmula propuesta por Troyer *et al.* (1988), como se indica a continuación.

$$GD = 1 - \frac{H - C}{H - S}$$

Donde: GD = Diversidad genética entre híbridos; H = Comportamiento promedio de los híbridos; C = Comportamiento de la craza híbrido por híbrido; S =

Comportamiento de la progenie de los híbridos autofecundados.

La estimación de la heterosis entre los híbridos se hizo con base en el progenitor medio, de la siguiente forma:

$$H = \frac{F_1 - MP}{MP} \times 100$$

Donde: H = Heterosis; F_1 = La media de la primera generación de la craza entre los dos progenitores; MP = Media de los progenitores.

Los híbridos fueron sometidos a un análisis de conglomerados (cluster analysis) con base en los valores calculados de diversidad genética y heterosis, con el método de agrupamiento (UPGMA). Esta estrategia computa la distancia promedio para formar un agrupamiento (i y j). Este proceso usa las distancias de todos los pares de individuos en el cluster (n_i, n_j) las distancias entre el grupo (i y j) y otro cluster H es obtenido por:

$$D(ij)H = \frac{\sum_i \sum_k D_{ik}}{N(K)N(H)}$$

Donde: D_{ik} es la distancia entre individuos en el cluster (i y j) e individuos en el cluster H ; $N(K)$ y $N(H)$ es el número de datos en el cluster (i y j) y H , respectivamente. Los parámetros usados por la fórmula combinatoria son: $\alpha_i = \alpha_j = 0.5$; $\beta = 0$; y $\gamma = -0.5$ (Everitt, 1980; Lance y Williams, 1967).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los análisis de varianza mostraron diferencias significativas ($P \leq 0.01$) entre localidades para todas las características evaluadas (Cuadro 2), lo que indica que las condiciones climáticas y edáficas de cada localidad fueron diferentes: También se registraron diferencias significativas ($P \leq 0.01$) entre cruzas para todas las características evaluadas, las cuales pueden ser atribuidas a la gran diversidad genética que presentan los progenitores, lo que hace posible la identificación de cruzas tardías, precoces, de porte alto o bajo y, sobre todo, de cruzas con rendimiento contrastante.

Con respecto a los efectos de ACG y ACE, se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.01$) para todas las características evaluadas, excepto en los efectos de ACE

Cuadro 2. Cuadrados medios de los análisis de varianza a través de los tres ambientes de evaluación en las localidades de Celaya, Gto. y Sandia El Grande, N.L., 1996.

FV	GL.	Rendimiento (t ha ⁻¹)+ +	Altura de planta (cm)	Hum. de grano (%)	GL.	Días a flor (d) +
Amb.	2	2082.02 **	448715.11 **	13232.67 **	1	5971.87 **
Rep/Amb.	3	24.97	501.33	3.70	2	73.54
Cruzas	77	9.81 **	499.69 **	16.08 **	77	21.81 **
ACE	12	25.42 **	959.32 **	37.28 **	12	115.08 **
ACG	65	6.93 **	414.84 **	12.16 **	65	4.60 *
Cruzas x Amb.	154	8.65 **	324.54	10.56 **	77	4.78 **
ACG x Amb.	24	29.87 **	512.04 **	20.36 **	12	6.02 **
ACE x Amb.	130	4.74 **	289.46	8.76 **	65	1.72
Error	231	2.58	329.04	2.57	154	3.03
CV (%)		11.30	7.94	8.24		2.16

*, ** Significativo a 0.05 y 0.01 niveles de probabilidad, respectivamente. ACG y ACE = Aptitud combinatoria general y específica, respectivamente.

+ La variable días a floración solo se evaluó en dos ambientes; + + De mazorca a 15.5 % de humedad. GL = Grados de libertad; CV = Coeficiente de variación.

para días a floración masculina en la cual las diferencias estadísticas fueron con $P \leq 0.05$.

La contribución a la varianza del rendimiento atribuible a las cruzas estuvo constituida por 40.4 y 59.6 % para los efectos aditivos (ACG) y no aditivos (ACE), respectivamente. Esta superioridad de los efectos no aditivos sobre los aditivos puede ser debida a la heterosis resultante de las combinaciones híbridas entre los progenitores. Para las otras características se observaron mayores efectos del tipo no aditivo (70 % para efectos de ACE y 30 % para ACG) para altura de planta, en tanto que para la humedad de grano la proporción fue de 64 % para ACE y 36 % para ACG. Estos resultados se debieron a que en estos caracteres también se manifestó la heterosis, como lo hubo en rendimiento. En días a floración se observaron mayores efectos de tipo aditivo ACG (82 %) que el no aditivo ACE (18 %), a causa de que los híbridos utilizados fueron similares en días a floración y fue mínimo el efecto de heterosis (Cuadro 2). La proporciones para los efectos de ACG y ACE se calcularon con base en las sumas de cuadrados, con respecto a la proporción que ocupan cuando las cruzas se particionan en estos efectos.

Se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.01$) en la interacción cruza por ambiente para todas las características evaluadas, lo que indica que las cruza no tienen suficiente información genética para amortiguar las condiciones de los ambientes donde fueron evaluadas; es decir, no tienen estabilidad y por tanto su posición varía entre ambientes. Esto es importante para seleccionar cruza que se adapten a cada ambiente o que se comporten bien en todos los ambientes, según el interés del mejorador; en cambio, para altura de planta no hubo diferencias significativas

Para la interacción ACG x ambientes, hubo diferencias significativas ($P \leq 0.01$) para todas las características evaluadas, en tanto que en la interacción ACE x ambiente sólo hubo diferencias significativas ($P \leq 0.01$) para rendimiento y humedad de grano. La interacción ACG x ambientes revela la importancia de los efectos aditivos en las características mencionadas, e indica que los efectos de ACG de los padres para estas características tienen efectos específicos de acuerdo con los ambientes de evaluación y, por tanto, se deben seleccionar los progenitores con los mejores efectos de ACG a través de ambientes. En cuanto a ACE x ambientes, las significancias para rendimiento y humedad de grano indicaron que las cruza no mantuvieron su ACE a través de ambientes. Sin embargo, se observó que para rendimiento los efectos aditivos y no aditivos contribuyeron de manera equilibrada en las cruza, con 53.8 % aditivos y 46.2 % no aditivos; para altura de planta se tuvo 25 % aditivos y 75 % de no aditivos; para humedad de grano los valores fueron de 30 % para efectos aditivos y 70 % para no aditivos, y para días a floración 39 % en aditivos y 61 % en no aditivos.

En la descomposición de la suma de cuadrados de las cruza en ACG y ACE, casi todos los análisis mostraron que la mayor parte de la variación fue atribuida a la ACE (efectos no aditivos), lo que indica la importancia de los efectos de dominancia en las cruza en la expresión del rendimiento. Esto concuerda con lo obtenido por Castro *et al.* (1968) y Cortéz (1985), quienes observaron que los efectos de dominancia contribuyeron más a la varianza de las cruza, pero no concuerda con Guei *et al.* (1992) y Vassal *et al.* (1992) quienes reportaron que los efectos aditivos constituyen el componente genético más importante para rendimiento.

Los mayores efectos positivos de ACG para rendimiento, correspondieron a los híbridos PP9539, AN447 y

AS910, con 1.168, 0.684 y 0.530 t ha⁻¹, respectivamente (Cuadro 3). Las estimaciones de ACG para altura de planta, humedad de grano y días a floración revelaron que el híbrido PP9539 contribuyó a la reducción de altura con -3.7 cm, a la humedad de grano con -1.4 %, y a días a floración con -2.6 d; el híbrido AN447 contribuyó en la altura con 0.2 cm, redujo la humedad de grano en -1.2 % y mantuvo sus días a floración con 0.04 d; por último, el híbrido AS910 contribuyó al incremento de altura de planta en sus cruzas con 2.6 cm, incrementó en un mínimo la humedad de grano con 0.12 % y disminuyó los días a floración en -0.6 d.

En el análisis de varianza para rendimiento de grano con el modelo II propuesto por Gardner y Eberhart (1966), se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.01$) para todas la fuentes de variación, excepto para la heterosis promedio por ambiente (Cuadro 4). Al examinar las fuentes de variación más importantes de este análisis, la significancia de heterosis x ambiente indica que la heterosis cambió a través de los ambientes. La descomposición de los cuadrados medios de la heterosis muestra que la heterosis específica por ambiente contribuyó más a la heterosis

y quedó en segundo término la heterosis varietal por ambiente, y por último la heterosis promedio por ambiente.

En lo que respecta a la heterosis promedio por ambiente, además de que también es una comparación de cruzas vs. híbridos, donde los híbridos progenitores obtuvieron un rendimiento de 15.6 t ha⁻¹ y las cruzas 14.2 t ha⁻¹, con una diferencia de 1.31 t ha⁻¹ (heterosis promedio por ambientes); dado que no hay evidencia de significancia estadística se infiere que tiende a mantenerse estable a través de los ambientes. La significancia de la heterosis varietal x ambiente indica que la heterosis de los híbridos no fue estable a través de ambientes, pero tampoco fue muy alta debido probablemente a que varios de los híbridos usados están emparentados. Sin embargo, un cruzamiento de híbridos de la misma empresa semillera mostró la más alta heterosis en los tres ambientes (Cuadro 5). Respecto a la heterosis específica x ambiente, que fue significativa ($P \leq 0.01$), revela que la heterosis de las cruzas (o ACE de las mismas) fue diferente para cada localidad; no obstante, se detectaron cruzas en las cuales se mantiene su heterosis específica (o ACE) a través de ambientes (Cuadro 5).

Cuadro 3. Aptitud combinatoria general (ACG) entre 13 híbridos comerciales de maíz evaluados en tres ambientes, dos en Celaya Gto. y uno en Sandia N. L. en 1996.

Híbrido	Rendimiento (t ha ⁻¹) ⁺	Altura de planta (cm)	Humedad de grano (%)	Días a floración (d)
C220	-0.616 **	-3.510	0.581 **	-0.188
C221	-0.962 **	-2.783	1.236 **	2.175 **
A7500	-0.702 **	-3.601	0.532 **	0.038
PP9603	-0.677 **	-6.010 **	-0.086	-2.916 **
PP9539	1.168 **	-3.738	-1.436 **	-2.643 **
PP9538	0.142	1.717	-0.905 **	-1.598 **
AN447	0.684 **	0.217	-1.218 **	0.038
AN454	-0.081	6.853 **	0.441 *	2.129 **
AN450	0.044	0.626	1.001 **	0.311
AN453	-0.087	5.762 **	0.268	1.493 **
AS910	0.530 **	2.625	0.118	-0.598 *
AS4450	0.104	1.671	-0.641 **	0.993 **
AS948	0.452 **	0.171	0.100	0.766 **

*,** Significativo a 0.05 y 0.01 niveles de probabilidad respectivamente
 + De mazorca a 15.5 % de humedad

Cuadro 4. Cuadrados medios del análisis de varianza para rendimiento de 13 híbridos y sus 78 cruzas posibles, obtenidos bajo el modelo II de Gardner y Eberhart (1966).

FV	GL	Cuadrados medios
Ambientes	2	253.99 **
Rep/Ambientes	3	9.31
Cruzas e Híbridos	90	14.14 **
Híbridos	12	38.78 **
Heterosis	78	10.34 **
Het. Promedio		62.92 **
Het. Varietal	12	24.45 **
Het. Específica	65	6.93 **
Cruzas e Hib. x Ambientes	180	8.76 **
Hib. x Amb.	24	34.72 **
Het. x Amb.	156	4.77 **
Het. Prom. x Amb.		3.35
Het. Var. x Amb.		5.15 **
Het. Esp. x Amb.		4.72 **
Error	270	2.74

*, ** Significativo a 0.05 y 0.01, respectivamente. GL = Grados de libertad.

En el Cuadro 5 se presentan las mejores cruzas, los híbridos, sus rendimientos, heterosis promedio, aptitudes combinatorias generales y efectos varietales; en este grupo el híbrido con mayor heterosis varietal fue PP9539 con 2.27 %, mismo que también presentó la mayor ACG de 1.16 ha⁻¹, relación que no se presentó en los demás híbridos. Esto indica que la heterosis no es totalmente controlada por genes dominantes, sino que también es controlada en cierto grado por genes aditivos. El segundo y tercer lugares fueron obtenidos por los híbridos A7500 y C220, con 1.11 y 1.07 % de heterosis, respectivamente.

El comportamiento de los híbridos progenitores en los tres ambientes de evaluación indicó que los híbridos de tres y cuatro líneas rindieron más que los híbridos cruzados de seis, siete y ocho líneas, en tanto que el mejor padre fue el híbrido AS910, seguido por AN450 y AS948. Las mejores cruzas para rendimiento fueron AS910 x AS4450, a pesar de que los progenitores son de la misma compañía, tal vez porque tienen diferente información genética; el segundo y el tercer lugares fueron obtenidos por las cruzas PP9538 x AS948 y PP9539 x AN453, las cuales mostraron buen rendimiento, como era de esperarse, porque los dos híbridos involucrados en la crusa son de diferente compañía y, por tanto, se puede suponer que tienen diversidad genética. Las cruzas que alcanzaron los tres valores más altos de ACE para rendimiento, fueron las mismas que obtuvieron los mayores rendimientos, y fueron: A5910 x A54450, PP9538 X A5948 y PP9539 X AN453.

Con respecto a heterosis, los mayores valores fueron obtenidos por la crusa PP9539 x AN454 que también fue una de las mejores cruzas en rendimiento; la segunda me-

jor crusa fue PP9603 x PP9539, a pesar de que los progenitores pertenecen a la misma compañía, lo que muestra alta diversidad genética; la crusa AN447 x AS910 tuvo la heterosis más baja (Cuadro 6), lo que sugiere que estos híbridos están relacionados genéticamente. Es importante señalar que de los cinco híbridos con mayor heterosis, cuatro están formados con híbridos de la UAAAN y uno con un híbrido de Dekalb como macho, y como hembra dos híbridos de Dekalb.

Análisis de relación genética

En el Cuadro 6 se muestran, en la parte superior de la diagonal, las distancias genéticas calculadas con los datos del rendimiento obtenidos sólo de Celaya A₁ y Celaya A₂, porque en el tercer ambiente hubo mucha variación que evitó la estimación de las distancias de las cruzas entre los híbridos, de acuerdo con la fórmula de Troyer *et al.* (1988); los datos de heterosis con base en el progenitor medio se muestran en la parte inferior. Los híbridos con las distancias más pequeñas fueron los que obtuvieron la heterosis más baja, como en los híbridos AN450 y AS910 que tuvieron la distancia genética más baja (0.03) y también la heterosis más baja (-47.7 %). Otros híbridos que mostraron resultados similares fueron AN453 y AS948, cuya distancia genética fue de 0.22 y heterosis de -35.3 %. Por el contrario, los híbridos con mayor distancia genética fueron AN454 y A7500 con 1.42, que además tuvieron la heterosis más grande (12.3 %); datos similares tuvieron los híbridos PP9539 y PP9603, que a pesar de pertenecer a la misma compañía presentaron una distancia genética de 1.33 y una heterosis de 9.8 %.

Cuadro 5. Rendimiento (t ha⁻¹) y componentes genéticos de los híbridos y mejores cruzas evaluadas en tres ambientes, 1996.

Cruza	Rend.	Het. ¹	ACE	Híbrido	Rend.	Het. ²	ACG	Efecto Varietal
AS910 x AS4450	17.538	0.940	2.669**	C220	12.233	1.070	-0.616**	-3.372
PP9538 x AS948	17.463	7.240	2.633**	C221	14.212	-0.266	-0.962**	-1.393
PP9539 x AN453	17.355	12.810	2.038**	A7500	11.987	1.107	-0.702**	-3.618
PP9539 x AN450	17.188	8.010	1.741**	PP9603	14.949	0.349	-0.677**	-0.656
PP9539 x AN447	17.072	11.070	0.985	PP9539	13.402	2.269	1.168**	-2.203
AN454 x AS948	16.052	-3.270	1.445*	PP9538	15.016	0.436	0.142	-0.589
AN447 x AS948	16.033	-8.100	0.661	AN447	17.339*	-0.183	0.684**	1.734
PP9539 x AS948	16.000	3.380	0.144	AN454	15.636	-0.097	-0.081	0.031
PP9539 x AN454	15.996	10.170	0.673	AN450	18.426*	-1.366	0.044	2.821
PP9603 x PP9539	15.952	13.980	1.225	AN453	17.367*	-0.967	-0.087	1.762
AN450 x AS4450	15.929	-5.380	1.546	AS910	19.505*	-1.421	0.530**	3.900
PP9539 x AS910	15.624	-5.040	-0.310	AS4450	15.245	0.284	0.104	-0.360
C220 X AN447	15.618	5.630	1.315	AS948	17.553	-0.521	0.452**	1.948

** Significativo a 0.05 y 0.01 respectivamente; Media de híbridos 15.605 t ha⁻¹; Heterosis promedio -1.370 t ha⁻¹;

Media de cruzas 14.235 t ha⁻¹; Het.¹= Heterosis de las cruzas; Het.²= Heterosis de los híbridos; + De mazorca a 15.5 % de humedad.

Cuadro 6 . Estimaciones de diversidad genética entre 13 híbridos comerciales (arriba de la diagonal), y heterosis (abajo de la diagonal), evaluados en dos ambientes de Celaya, 1996.

Padres	C220	C221	A7500	PP9603	PP9539	PP9538	AN447	AN454	AN450	AN453	AS910	AS4450	AS948
C220		0.64	1.02	0.83	1.09	0.91	1.11	1.00	0.85	0.93	0.93	0.82	0.74
C221	-13.85		1.21	0.93	1.12	0.68	0.87	1.24	0.80	0.95	0.93	0.72	0.81
A7500	0.73	6.663		0.62	1.15	1.02	1.03	1.42	0.86	1.08	0.92	1.01	1.17
PP9603	-6.00	-2.46	-14.62		1.33	0.86	0.73	0.80	0.70	0.54	0.79	0.79	0.66
PP9539	3.11	3.83	-4.85	9.83		1.09	1.27	1.36	1.09	1.14	0.95	0.72	1.09
PP9538	-3.15	-12.36	0.82	-5.14	2.86		0.93	0.99	0.88	0.89	0.66	0.52	1.16
AN447	3.61	-4.63	1.01	-9.90	8.25	-2.44		0.50	0.42	0.51	0.40	0.81	0.48
AN454	0.03	7.48	12.26	-6.92	10.56	-0.33	-20.03		0.47	0.52	0.55	0.97	0.89
AN450	-5.30	-7.03	-5.08	-11.14	2.67	-3.97	-23.97	-21.92		0.27	0.03	0.84	0.31
AN453	-2.24	-1.79	2.48	-18.92	4.48	-3.88	-19.56	-18.93	-32.44		0.56	0.37	0.22
AS910	-0.62	-2.50	-0.64	-7.84	-1.72	-12.71	-25.23	-17.61	-47.68	-17.01		1.02	0.39
AS4450	-6.38	-10.49	0.23	-7.56	-10.27	-18.98	-6.81	-0.87	-5.59	-26.62	0.67		0.28
AS948	-9.57	-6.81	5.37	-12.80	2.84	5.07	-21.12	-4.94	-30.15	-35.34	-25.38	-31.55	

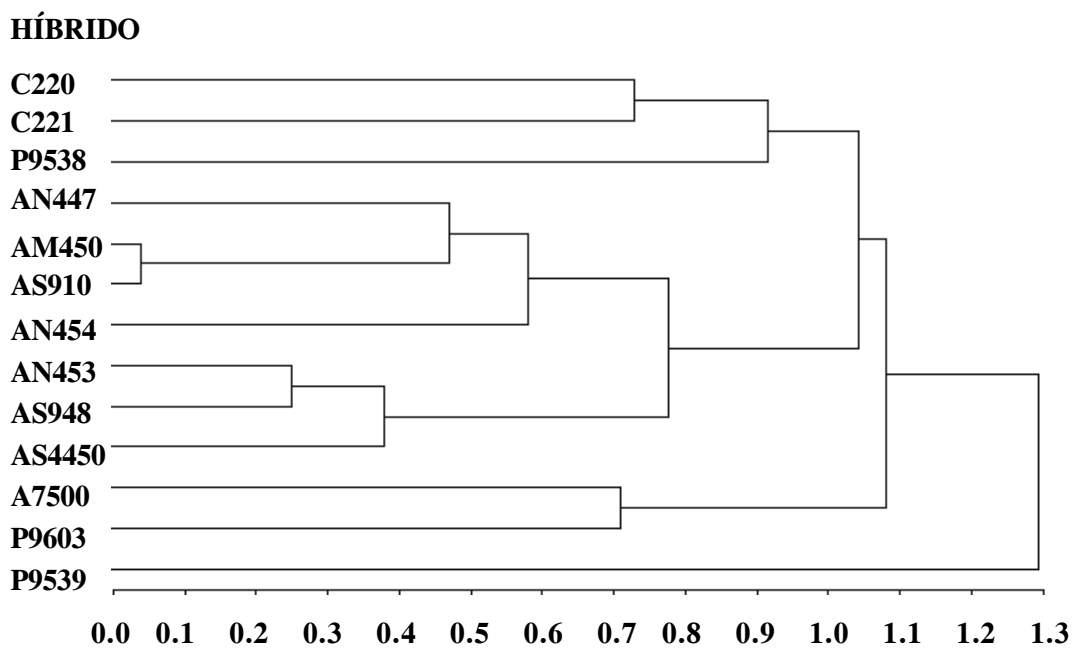


Figura 1. Agrupamiento de 13 híbridos comerciales con base en las distancias genéticas entre los progenitores híbridos.

El dendrograma resultante del análisis de conglomerados (Figura 1) confirma lo antes señalado, y muestra que los híbridos AS910 y AN450 fueron los más relacionados genéticamente, seguidos por AN453 y AS948. También muestra que los híbridos AN447, AN450, AS910, AN454, AN453, AS948 y AS4450 forman un mismo grupo, lo cual indica que están relacionados genéticamente. Los híbridos C220 y C221 también forman un grupo compacto separados por una distancia de apenas 0.64, lo cual se debe a que estos dos híbridos pertenecen a una misma compañía y tal vez tengan uno o dos progenitores en común. Otro grupo lo formaron los híbridos A7500 y PP9603, que a pesar de ser de diferente compañía es posible que compartan alguna similitud genética. Por último, el híbrido PP9539 se ubicó sólo en un grupo diferente, lo que indica que está

menos relacionado genéticamente con los demás híbridos incluidos en este estudio y corresponde al híbrido de mayor ACG.

CONCLUSIONES

Los híbridos con los mayores efectos de aptitud combinatoria general para rendimiento fueron PP9539, AN447 y AS910, y las cruzas entre híbridos que presentaron mayor heterosis fueron: PP9603 x PP9539, PP9539 x AN453 y PP9539 x AN447. Los híbridos genéticamente más relacionados entre sí fueron AN450 y AS910, y el híbrido con mayor diversidad, en comparación con los demás, fue PP9539. La agrupación de los híbridos por distancias genéticas evidenció que la mayoría de los híbridos resultaron

agrupados de acuerdo con la compañía semillera que los produjo.

BIBLIOGRAFÍA

- Castro G M, C O Gardner, J H Lonquist (1968)** Cumulative gene effects and the nature of heterosis in maize crosses involving genetically diverse races. *Crop Sci.* 8:91-101.
- Cortez M H, M Gutierrez, A Rodríguez, J Duron, R Giron, M Oyervides (1985)** Evaluation of a broad-base improved population of maize (*Zea mays* L.) and cumulative gene effects and heterosis. Folleto de Divulgación, U.A.A.A.N. Buenavista Saltillo, Coah. 43 p.
- Everitt B (1980)** Cluster Analysis. 2nd ed. Halsted Press. New York. 136 p.
- Gardner C O, S A Eberhart (1966)** Analysis and interpretation of the variety cross diallel and related populations. *Biometrics* 22:439-452.
- Garza A, A A Fleming, E B Browne (1962)** A method of identifying maize hybrids with the same pedigree and the effect of varying number of lines in common on contrast among hybrid and sib populations. *Crop Sci.* 2:371-374.
- Griffing B (1956)** Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing system. *Austr. J. Biol. Sci.* 9: 463-93.
- Guei R G, C E Wasson (1992)** Inheritance of some drought adaptive traits in maize. Interrelationship between yield, flowering and ear per plant. *Maydica* 33:157-164.
- Lance G N, W T Williams (1967)** A general theory of classificatory sorting strategies: I. Hierarchical systems. *Comp. J.* 9:373-380.
- Troyer A F, S J Openshaw, K H Knittle (1988)** Measurement of genetic diversity among popular corn hybrids. *Crop Sci.* 28:481-485.
- Vasal S K, G Srinivasan, J Crossa, D L Beck (1992)** Heterosis and combining ability of CIMMYT's subtropical and temperate early-maturity maize germplasm. *Crop Sci.* 32:884-890.