

ANÁLISIS DIALÉLICO PARA CARACTERES DE VIGOR DE SEMILLA Y DE PLÁNTULA EN GENOTIPOS DE MAÍZ TROPICAL*

DIALLEL ANALYSIS FOR SEED AND SEEDLING VIGOR CHARACTERS IN TROPICAL CORN GENOTYPES

Francisco Cervantes Ortiz^{1§}, Gabino García de los Santos¹, Aquiles Carballo-Carballo¹, David Bergvinson², José Luis Crossa², Mariano Mendoza-Elos³ y Ernesto Moreno-Martínez⁴

¹Producción de Semillas, Instituto de Recursos Genéticos y Productividad, Colegio de Postgraduados, Km 36.5 carretera México-Texcoco, 56230 Montecillo, Estado de México, México. ²Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. ³Instituto Tecnológico Agropecuario 33. ⁴Unidad de Investigación en Granos y Semillas, Universidad Nacional Autónoma de México. [§]Autor para correspondencia: cervantes@colpos.mx

RESUMEN

El objetivo del estudio fue determinar los efectos genéticos en caracteres de vigor de semilla y de plántula en maíz. Se usó un diseño de cruas dialélicas involucrando seis líneas endogámicas de maíz tropical, tres de alto y tres de bajo vigor de semilla. La semilla se produjo en Tlaltizapan, Morelos, México, en verano de 2004 y se evaluó en el Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México, México, en otoño del mismo año. En la semilla se determinó: porcentaje de germinación, vigor a través de la prueba de envejecimiento acelerado, conductividad eléctrica y peso. En plántula se determinó porcentaje de emergencia, velocidad de emergencia, peso seco de la parte aérea, altura de planta, número de hojas, índices de emergencia, tasa de emergencia y vigor. Los efectos de aptitud combinatoria general (ACG) para caracteres de semilla y vigor inicial de plántula fueron significativos ($p \leq 0.01$) y mayores a los de aptitud combinatoria específica (ACE), excepto para el vigor de la semilla. Los efectos maternos y recíprocos fueron significativos ($p \leq 0.01$) en todos los caracteres evaluados, lo cual indica que éstos fueron influenciados por los efectos del progenitor femenino utilizado en la producción de la semilla evaluada. Los progenitores CML 396, CML 254 y CML 307 manifestaron la más alta ACG en semilla

y plántula. También se encontró que las varianzas de los efectos de dominancia fueron más importantes que las de los efectos aditivos en todos los caracteres. Los caracteres de plántula presentaron mayor h^2 que los de semilla, indicando que la selección sería más efectiva en plántula.

Palabras clave: *Zea mays* L., aptitud combinatoria, componentes de varianza, efectos genéticos, vigor de semilla y plántula.

ABSTRACT

With the aim of evaluating the genetic effects of seed and seedling vigor characters in tropical corn, a diallel cross design was used involving six inbred lines of tropical corn previously characterized as three possessing high and three low seed vigor. The seed was produced at Tlaltizapan, Morelos, Mexico, in the summer of 2004 and evaluated at the Postgraduate College, Montecillo, State of Mexico in the autumn of the same year. In seeds, the percentage of germination was determined after seed vigor was analyzed using the accelerated aging test, the electric conductivity test and weight. In the seedlings the percentage of emergency, speed of emergency, shoot dry matter, plant

* Recibido: Junio de 2005
Aceptado: Abril de 2006

height, number of leaves, emergency index, index of rate of emergency, and vigor, were evaluated. The general combining ability (ACG) effects for seed characters and initial seedling vigor, were significant ($p \leq 0.01$) and higher than those of the specific combining ability (ACE), except in seed vigor. The maternal and reciprocal effects were significant ($p \leq 0.01$) for all evaluated traits indicating the influence of the female parent used for the production of the evaluated seed. The progenitors CML 396, CML 254 and CML 307 showed the highest ACG in seed and seedling characters. In the estimation of variances it was found that those of the dominance effects were more important than the additives in all characters. Seedling characters had higher h^2 than seed characters, indicating that the selection would be more effective if made on seedlings.

Key words: *Zea mays* L., combining ability, genetic effects, seed and seedling vigor, variance components.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de variedades de maíz usualmente toma un tiempo considerable y es costoso; por lo que los fitomejoradores están continuamente explorando métodos rápidos y baratos para cumplir con este objetivo. Una forma de realizar estos progresos, puede ser la capacidad para determinar el potencial de crecimiento inicial y vigor de semillas en los genotipos. Se han realizado pocos estudios de varianzas genéticas en caracteres para medir vigor de semillas y plántula. En este sentido, Ram *et al.* (1991) en un estudio en vigor de plántula en chícharo de guía (*Cajanus cajan* L. Mills), revelaron la presencia de cantidades importantes de variabilidad genética, lo que indica que el vigor de la plántula puede ser utilizado en programas de mejoramiento genético durante el proceso de selección. De la misma manera, Moreno y Christensen (1971) y Moreno *et al.* (1978) reportaron gran variabilidad entre genotipos de maíz (*Zea mays* L.) en cuanto a vigor y longevidad de las semillas.

Así mismo, se han estudiado varias técnicas para medir el vigor de semilla y de la plántula, como los análisis de factores múltiples, regresión múltiple, índice principal geométrico, correlación de rango, etc. (Abdul-Baki y

Anderson, 1973; Yaklich y Kulik, 1979; Yaklich *et al.*, 1979; Steiner *et al.*, 1989; Trawatha *et al.*, 1990), pero ninguna de éstas incluye parámetros genéticos.

El vigor de las semillas se ha definido como la sumatoria total de aquellas propiedades de las semillas que determinan el nivel de actividad y la respuesta de las semillas o de un lote de semillas durante la germinación y emergencia de las plántulas (ISTA, 1995).

Otras investigaciones han estudiado la emergencia y el vigor de plántulas donde incluyen desde aspectos agronómicos hasta genéticos. En maíz se ha reportado que los efectos aditivos son más importantes que los efectos dominantes para la germinación, el vigor de semilla y de la plántula (Grogan, 1970; Eagles, 1982; Ajala y Fakorede, 1988; Bdliya y Burris, 1988; Revilla *et al.*, 1999; Antuna *et al.*, 2003). De igual manera, lo consignan Cho y Scott (2000) en soya (*Glycine max* L.). Otros investigadores han reportado efectos recíprocos significativos (Ventura, 1961; Eagles, 1982; Revilla *et al.*, 1999; Antuna *et al.*, 2003). En el mismo sentido, Revilla *et al.* (1999) señalaron que la ACG para peso de la semilla no se correlaciona con la ACG de otros caracteres de plántula y de planta adulta, mientras que los efectos recíprocos (ER) para peso de la semilla sí se relacionaron con los ER para vigor de plántula, peso de planta y floración.

En este mismo contexto, Moreno-Gonzalez (1988) evaluó un dialélico entre líneas cristalinas y dentadas de maíz de los EE. UU. y concluyó que la varianza aditiva fue más importante que la varianza de dominancia en las cruza dentado x dentado y dentado x cristalino; él no consideró efectos recíprocos y no encontró efectos significativos para ACE en el vigor inicial de plántula. En un estudio para predecir la emergencia en campo a través de avances genéticos y heredabilidad en parámetros de vigor, Kharb *et al.* (1994) encontraron una asociación fuerte y positiva entre la emergencia en campo y la germinación estándar, el índice de vigor I y el índice de emergencia de plántulas, mientras que el peso de 100 semillas y la conductividad eléctrica se correlacionaron negativamente. Los mismos autores, indicaron que los parámetros genéticos de ciertas pruebas de vigor pueden ser predictores confiables para la emergencia de plántulas en campo. En este mismo rubro, Fakorede y Agbana (1983) reportaron heterosis en

un estudio de vigor de semillas en maíz. Por otra parte, Dollinger (1985) mencionó que existen alelos recesivos con efectos pleiotrópicos que afectan el vigor de semillas. Corroborando lo anterior, Lindstrom (1972) concluyó que la longevidad de la semilla de maíz es una característica heredable, pero su herencia es compleja. Con base en lo anterior, en este estudio, se planteó como objetivo evaluar los efectos genéticos en caracteres de vigor de semilla y de plántula, utilizando seis líneas endogámicas de maíz tropical y sus combinaciones híbridas, en un dialélico completo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Seis líneas endogámicas tropicales de maíz ($F=1$) previamente caracterizadas por su resistencia al deterioro acelerado (Cuadro 1) fueron cruzadas para generar el dialélico completo que incluye las cruza directas, recíprocas y los progenitores (Método I de Griffing, 1956).

Las líneas fueron derivadas en el programa de mejoramiento del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). En el ciclo primavera-verano (P-V) 2004, se hicieron los cruzamientos entre las seis líneas en Tlaltizapan, Morelos, México, obteniéndose 15 cruza directas y 15 cruza recíprocas; al mismo tiempo se efectuaron autofecundaciones en las líneas, originándose un total de 36 genotipos. Las cruza F_1 y los progenitores fueron cosechados separadamente. Posteriormente, se evaluaron los genotipos para determinar la calidad fisiológica de semilla en el Laboratorio de Análisis de Semillas del Colegio de Postgraduados ubicado en Montecillo, Texcoco, Estado de México. Esta evaluación se llevó a cabo en los meses de octubre y noviembre de 2004.

En noviembre de 2004 se determinó el vigor inicial de plántula, el cual se llevó a cabo en cama de arena en invernadero en el Colegio de Postgraduados. Para la evaluación en invernadero se utilizó un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones, mientras que

Cuadro 1. Líneas endogámicas de maíz tropical utilizadas en un diseño de apareamiento dialélico.

Línea endogámica	Pedigree	Origen	Color de grano	Respuesta al deterioro	Potencial heterótico
CML 307	SINT.AM.TSR-61-3-2-8-2-BB-f	SA TSR	Amarillo	Resistente	Pops-24,28,36 y pool26
CML 396	P21C5HC109-3-1-5-4-B-4-3-##-2-B*6	Pop21	Blanco	Resistente	CML268, CML48 y CML264
CML 407	(G24TSR19*P21F199)-1-1-B-2-2-BBB-1-B-#-B*8	Pool24	Blanco	Resistente	CML48 y CML247
CML 254	TEXSEQ-149-2-BBB##-1-BB-f	Pop21	Blanco	Susceptible	Pop. 25, 32, 43; pools 23, 24
CML 399	P21C5HC72-3-1-2-BBBB-##-1-BBB-###-B*8	Pop21	Blanco	Susceptible	CML247
CML 411	P28C7-S4-#-BBBBBBBBBB	Pop28	Amarillo	Susceptible	CL-00331

en el laboratorio se utilizó un diseño completamente al azar con tres repeticiones, como tamaño de muestra se utilizaron 25 semillas por unidad experimental para ambos experimentos.

En el laboratorio se registró el porcentaje de germinación estándar (GE), el vigor a través de la prueba de envejecimiento acelerado (EA), seguida de la prueba de germinación estándar, peso de la semilla (PS) y la prueba de conductividad eléctrica (CE), siguiendo la metodología recomendada por la ISTA (1995). En invernadero se evaluaron caracteres como velocidad de emergencia (VE) de acuerdo con Maguire (1962), aplicando la siguiente expresión:

$VE = (\text{No. de plantas normales}) / \text{días al primer conteo} + \dots + (\text{No. de plantas normales}) / \text{días al conteo final};$
en días.

Los conteos de emergencia fueron hechos a los 7, 8, 9 y 10 días después de la siembra (DDS) y los valores obtenidos fueron usados para estimar el porcentaje de emergencia (%E), índice de emergencia (IE) y el índice de la tasa de emergencia (ITE) tal y como lo describieron Fakorede y Ayoola (1980) y Fakorede y Ojo (1981) mediante la fórmula siguiente:

$$\% E = \frac{100 (\text{No. de plántulas emergidas al día 10 DDS})}{\text{No. total de semillas sembradas}}$$

$$IE = \frac{(\text{No. de plántulas emergidas} \times \text{día}) (\text{No. DDS})}{\text{emergencia final al día 10}}$$

$$ITE = \frac{IE}{\% E}$$

Así mismo, se determinó el peso seco de la parte aérea (PSPA), longitud de plántula (LPL) y el número de hojas por plántula (NH) en una muestra de cinco plantas con competencia completa por unidad experimental, tomadas a los 24 DDS; con las variables de peso seco de la parte aérea y longitud de plántula se calculó el índice de vigor I y II como lo describió Kharb *et al.* (1994), los cuales se obtienen al multiplicar el porcentaje de emergencia con la longitud de plántula y el peso seco de plántula, respectivamente.

El análisis de varianza para calcular la Aptitud Combinatoria General (ACG), Específica (ACE), Efectos Recíprocos (ER) y Efectos Maternos (EM) se hizo de acuerdo con el Método I de Griffing (1956), considerando el Modelo II (efectos aleatorios) usando el programa Diallel-SAS Method I propuesto por Zhan y Kang (2003). A partir de los cuadrados medios se estimaron las varianzas de la ACG (VACG) y ACE (VACE) las cuales permiten estimar los componentes de varianza aditiva (VA), de dominancia (VD), de efectos recíprocos (VR) y los valores de heredabilidad (h^2).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se observaron diferencias significativas entre genotipos ($p \leq 0.01$) para todos los caracteres de calidad de la semilla evaluados (Cuadro 2); siendo éstos el porcentaje de germinación estándar (GE), el vigor a través de la prueba de envejecimiento acelerado (EA) seguida por una prueba de GE, el peso de la semilla (PS) y conductividad eléctrica (CE). Con base en la descomposición de los cuadrados medios de los genotipos se encontró que la ACG, ACE, ER y EM también presentaron efectos significativos ($p \leq 0.01$), en este grupo de caracteres.

Por otro lado, al analizar los caracteres de vigor de plántula, determinados por el %E, VE, IE, ITE, PSPA, LP, NH, IV-I y IV-II también se observaron diferencias altamente significativas ($p \leq 0.01$) entre los genotipos en todos los caracteres evaluados, excepto para el índice de emergencia (IE) con significancia de $p \leq 0.05$. Del mismo modo, en la descomposición de los cuadrados medios para los efectos de ACG, ACE, ER, y EM hubo diferencias significativas ($p \leq 0.01$) en los caracteres antes señalados (Cuadro 3). La significancia estadística de ACG y ACE indican que los efectos genéticos aditivos y dominantes están involucrados en el vigor de semilla y plántula, como lo reportaron Cho y Scott (2000) en soya [*Glycine max* (L.) Merrill]. La proporción relativa de los efectos de ACG y ACE determinada a través de los cuadrados medios indica el tipo de acción génica en los caracteres bajo estudio (Baker, 1978).

En este contexto, los cuadrados medios debido a los efectos de ACG fueron mayores que los de ACE en GE,

Cuadro 2. Cuadrados medios para caracteres de semilla de maíz evaluadas en condiciones de laboratorio.

Fuente de variación	gl	GE (%)	EA (%)	PS (g)	CE ($\mu\text{mho cm}^{-1} \text{g}^{-1}$)
Repeticiones	2	8.13	1.44	0.093	21.64
Genotipos	35	432.56**	1679.40**	1.861**	1196.33**
ACG	5	602.54**	1852.87**	2.819**	1865.20**
ACE	15	349.38**	2742.44**	1.523**	1853.68**
ER	15	617.68**	1074.59**	1.984**	1329.12**
EM	5	791.09**	2285.79**	3.228**	2084.97**
Error	70	66.64	59.02	0.044	18.60
C.V.	----	9.18	9.94	7.01	12.22

** Diferente de cero a una probabilidad de 0.01; GE= Germinación estándar; EA= Envejecimiento acelerado; PS= Peso de semilla y CE= Conductividad eléctrica.

Cuadro 3. Cuadrados medios para caracteres de plántula en maíz tropical, evaluadas en condiciones de invernadero.

	Fuente de variación							C.V.
	Repeticiones	Genotipos	ACG	ACE	ER	EM	Error	
gl	2	35	5	15	15	5	70	----
PSPA (g)	0.016	0.186**	2.819**	1.523**	1.984**	3.228**	0.044	17.12
AP (cm)	8.335	33.717**	96.304**	45.046**	30.071**	71.71**	2.909	8.94
NH (No)	0.001	0.115**	0.198**	0.149**	0.114**	0.253**	0.036	4.80
VE (d)	13.799	18.629**	55.429**	18.684**	12.247**	20.889**	2.095	14.69
%E (%)	354.33	948.7**	2722.5**	869.4**	582.3**	811.3**	109.9	14.6
IE (d)	0.678	0.091*	0.227**	0.138**	0.142**	0.290**	0.056	3.28
ITE (d)	0.004	0.010**	0.025**	0.011**	0.007**	0.010**	0.001	33.05
IV-I	431472	619732**	1803022**	48031.4**	90353.4**	948547**	64997	18.2
IV-II	239.34	646.36**	1545.30**	906.82**	629.13**	1294.1**	71.32	23.93

**Diferente de cero a una probabilidad de 0.01; PSPA= Peso seco de la parte aérea; AP= Altura de planta; NH= Número de hojas; VE= Velocidad de emergencia; %E= Porcentaje de emergencia; IE=índice de emergencia; ITE=índice de la tasa de emergencia; IV-I= Índice de vigor I; IV-II= Índice de vigor II.

PS y CE (Cuadro 2), esto determina la importancia de los efectos aditivos en dichos caracteres; no obstante, los efectos no aditivos fueron el componente más importante en la variable vigor (EA). En los caracteres de vigor inicial de plántula, el análisis de los cuadrados medios indicó la importancia de los efectos genéticos de ACG al ser mayores que la ACE. Esto indica que es factible mejorar el vigor de semilla y de plántula a través del mejoramiento genético. Resultados similares fueron encontrados en betabel (*Beta vulgaris*) para porcentaje de germinación, porcentaje de establecimiento y vigor

(Sadeghian y Khodaii, 1998); de la misma manera lo reportaron en soya [*Glycine max* (L.) Merrill] (Cho y Scott, 2000) y en maíz (Antuna *et al.*, 2003). Otros autores señalan la importancia de los efectos genéticos aditivos en caracteres de vigor de plántula (Grogan, 1970; Eagles, 1982; Ajala y Fakorede, 1988; Revilla *et al.*, 1999; Antuna *et al.*, 2003). En este sentido, Moreno-Gonzalez (1988) no encontró significancia estadística para ACE en caracteres de vigor inicial de plántula; sin embargo, los resultados de este trabajo muestran significancia para ACE en este grupo de líneas.

Los efectos maternos y recíprocos fueron significativos, lo cual indica que los caracteres de vigor de semilla y plántula son afectados por el progenitor femenino utilizado en la producción de semilla. Estos resultados coinciden con los reportados por Revilla *et al.* (1999) para vigor inicial en plántulas de maíz y Sadeghian y Khodaii (1998) en betabel (*Beta vulgaris*); pero difieren

con los reportados por Cano *et al.* (2000) provenientes de un análisis dialélico para vigor de semilla en melón (*Cucumis melo* L.).

La línea CML 411 presentó la mayor ACG para germinación estándar (Cuadro 4); así mismo, mostró la más alta ACG en la prueba de conductividad eléctrica,

Cuadro 4. Efectos de Aptitud Combinatoria General (ACG) y Específica (ACE) para caracteres de semilla, evaluadas en laboratorio.

Genotipos	GE (%)	EA (%)	PS (g)	CE ($\mu\text{mho cm}^{-1} \text{ g}^{-1}$)
Aptitud Combinatoria General				
CML 307	-1.085	8.786**	-0.087*	-9.907**
CML 396	-3.135*	12.336**	0.637**	-13.262**
CML 407	-8.692**	4.772**	0.150**	-5.481**
CML 254	1.314	10.139**	0.068	-6.627**
CML 399	-3.955**	1.969	0.178**	-4.536**
CML 411	15.550*	-38.004**	-0.948**	39.815**
Aptitud Combinatoria Específica				
307 x 396D	2.973	-2.253	0.150*	-5.686**
307 x 407D	-3.470	-12.023**	0.033	-6.715**
307 x 254D	-5.810*	9.143**	0.165*	7.854**
307 x 399D	7.126*	16.029**	0.428**	-15.112**
307 x 411D	-6.409	-22.859**	-0.923**	20.028**
396 x 407D	-1.336	-2.190	-0.058	0.471
396 x 254D	3.239	2.893	-0.181*	-0.788
396 x 399D	-7.490**	-1.220	0.016	-1.240
396 x 411D	-7.076	-4.759	-0.215*	7.584**
407 x 254D	2.796	2.623	0.446**	-13.592**
407 x 399D	-15.933**	-9.706**	-0.060	7.776**
407 x 411D	-0.192	-1.359	0.530**	-11.122**
254 x 399D	3.393	13.476**	0.301**	-17.096**
254 x 411D	3.590	49.273**	0.521**	-10.464**
399 x 411D	2.907	33.157**	0.974**	-42.714**
396 x 307R	6.000	-1.333	-0.176*	6.093**
407 x 307R	10.000**	13.333**	-0.119	-12.138**
254 x 307R	1.666	1.200	-0.228**	15.879**
399 x 307R	0.000	0.083	0.506**	-6.294**
411 x 307R	27.306**	-31.946**	-2.038**	67.601**
407 x 396R	-5.250	4.050	0.759**	8.482**
254 x 396R	2.000	2.833	1.316**	-13.026**
399 x 396R	12.666**	6.783*	0.433**	-5.666**
411 x 396R	25.923**	-34.630**	-1.164**	59.722**
254 x 407R	0.000	-14.666**	0.447**	1.041
399 x 407R	-26.666**	-23.500**	-0.269**	21.079**
411 x 407R	8.583	-52.460**	-0.473**	43.241**
399 x 254R	-1.333	3.950	-0.100	-1.120
411 x 254R	27.706**	2.539	-1.385**	37.131**
411 x 399R	11.086*	-33.080**	-0.875**	28.774**

*, **Diferente de cero a una probabilidad de 0.05 y 0.01; GE= Germinación estándar; EA= Envejecimiento acelerado; PS= Peso de semilla; CE= Conductividad eléctrica; D= Cruzas directas; R= Cruzas recíprocas.

aunque este carácter se correlaciona negativamente con el vigor de la semilla (Abdul-Baki y Anderson, 1973; Yaklich *et al.*, 1979; Matthews y Powell, 1981), por lo que fue consistente al obtener el valor más bajo de ACG para vigor a través de la prueba de EA.

La línea CML 396 seguida por la CML 254 presentaron la mayor ACG para caracteres de semilla, con el valor más alto para vigor (EA) y uno de los más bajos para CE; el valor de PS fue positivo y significativo ($p < 0.05$) con la mayor ACG para CML 396 y positivo pero no significativo para CML 254. Los efectos de ACE se presentan en el (Cuadro 4), evidenciándose que la mayor ACE para GE y vigor (EA) de semillas correspondió a las cruzas CML 411 x CML 254 y CML 254 x CML 411, respectivamente. Para los caracteres PS y CE la mayor ACE fue consistente con las cruzas CML 254 x CML 396 y CML 399 x CML 411, respectivamente. Así mismo, para los caracteres de vigor inicial de plántula, la línea CML 254 seguida por la línea CML 307 presentaron la mayor ACG para AP, VE, %E, IV-I e IV-II, también la línea CML 396 mostró alta ACG para PSPA AP y NH; por lo tanto, fueron las mejores líneas para vigor inicial de plántula. Por lo anterior, se puede destacar que las líneas CML 254 y CML 396 fueron consistentes en su comportamiento en ambos grupos de variables; mientras que CML 307 tuvo un pobre comportamiento en caracteres de vigor de semillas (Cuadro 5). Por otro lado, al analizar los valores de ACE, se observó que la craza CML 399 x CML 411 presentó la más alta ACE para AP, VE, %E, IV-I e IV-II. De la misma manera, en las cruzas CML 254 x CML 396 y CML 411 x CML 396 se obtuvieron los valores más altos para PSPA y IE, respectivamente; mientras que las cruzas CML 411 x CML 399 y CML 411 x CML 307 fueron consistentes con el ITE.

La craza CML 254 x CML 411 igualó el valor de ACE para AP y fue mejor que todas en el NH a los 24 DDS (Cuadro 5). Hubo poca consistencia entre las líneas con la mejor ACG y las combinaciones para ACE; a este respecto Revilla *et al.* (1999) señalaron que existe mayor avance genético al seleccionar combinaciones de híbridos específicos para vigor inicial de plántula de maíz, que seleccionando líneas con base sólo en efectos de ACG.

Al observar los efectos de ACE en ambos grupos de variables, fue notable que en las cruzas donde intervinieron las líneas CML 411, CML 254 y CML 396, mostraron efectos positivos significativos de ACG, que al combinarse entre ellas o con la línea CML 399 o CML 307 manifestaron valores aceptables de ACE en los caracteres descritos anteriormente. Estos resultados coinciden con Gómez *et al.* (1988), quienes encontraron cruzas con altos efectos de ACE donde al menos interviene una línea de alta ACG para rendimiento. También se pueden observar grandes diferencias entre las cruzas para los caracteres estudiados, lo que indica que estos no pueden ser predichos con los valores de ACG de los progenitores (Baker, 1978).

Los efectos genéticos en ambos grupos de variables fueron expresados principalmente por los efectos aditivos, excepto para vigor (EA) donde los efectos predominantes fueron los de dominancia, basados en la proporción relativa de los cuadrados medios; aunque cuando se hicieron las estimaciones de los cuadrados medios (VA, VD, VR, VE) se encontraron valores superiores en la estimación de la varianza de dominancia con relación a la varianza aditiva en todos los caracteres (Cuadro 6); esto se atribuye a que existen factores no aditivos que están interaccionando en el vigor de la semilla y el vigor inicial de plántula. Resultados que coinciden con Dollinger (1985) y Antuna *et al.* (2003) en caracteres de vigor de semilla. También Lindstrom (1972) concluyó que la longevidad de la semilla de maíz es un carácter heredable, pero su herencia es compleja. Por otra parte, la más alta h^2 en caracteres de semilla la mostró el vigor y peso de la semilla, mientras que la más baja se obtuvo para conductividad eléctrica, con valores de 0.19, 0.18 y 0.12, respectivamente (Cuadro 6). De la misma manera, para caracteres de vigor inicial de plántula (Cuadro 6) el % E, VE y IV-I mostraron los valores más altos de h^2 (0.35, 0.34 y 0.29, respectivamente); y de acuerdo con Hallauer y Miranda (1988) queda clasificada como h^2 intermedia (0.2-0.5), mientras que la h^2 en caracteres de semilla se clasifica como baja (0.01-0.2). Lo anterior significa que la selección será más efectiva en vigor inicial de plántula que en vigor de semilla, ya que los caracteres de plántula mostraron mayor heredabilidad.

Cuadro 5. Aptitud Combinatoria General (ACG) y Específica (ACE) para caracteres de vigor inicial de plántula, evaluadas en invernadero.

Genotipos	PSPA (g)	AP (cm)	NH (No)	VE (d)	%E	IE (d)	ITE (d)	IV-I	IV-II
Aptitud Combinatoria General									
CML 307	-0.087*	1.064**	0.098**	1.742**	12.17**	-0.076	-0.039**	254.8**	8.13**
CML 396	0.637**	2.715**	0.131**	-0.251	-1.95	-0.017	-0.011	97.9*	4.32**
CML 407	0.150**	-0.567	0.011	-0.910**	-7.81**	-0.131**	0.024**	-143.7**	-1.06
CML 254	0.068	2.720**	0.094**	1.845**	12.08**	-0.122**	-0.038**	390.0**	11.62**
CML 399	0.178**	0.917**	0.001	1.324**	8.94**	-0.076	-0.024**	252.4**	8.03**
CML 411	-0.948**	-6.850**	-0.338**	-3.746**	-23.42**	0.423**	0.089**	-851.5**	-31.06**
Aptitud Combinatoria Específica									
307 x 396D	0.044	0.102	-0.011	1.684**	11.408**	-0.086	-0.018	262.0**	9.459**
307 x 407D	0.097**	2.319**	0.108	1.395**	9.274**	-0.080	-0.043**	283.7**	9.895**
307 x 254D	-0.023	-0.660	-0.140*	-0.547	-5.291	-0.131	0.013	-125.5	-3.301
307 x 399D	0.072**	1.934**	0.118	1.210*	8.508*	-0.029	-0.012	267.2**	8.530**
307 x 411D	-0.043	-1.200	-0.095	-2.569**	-20.447**	-0.157	0.041*	-418.4**	-10.583**
396 x 407D	0.007**	0.601	0.108	-0.370	-2.431	0.023	-0.005	-58.73*	-2.516
396 x 254D	0.036	0.179	-0.008	0.906	6.001	-0.057	-0.009	141.2	5.180
396 x 399D	-0.041	-0.690	0.085	-0.692	-4.365	0.064	-0.002	-171.7*	-6.249*
396 x 411D	0.131**	2.920**	-0.128	-0.852	-5.480	0.030	0.023	98.7	6.666
407 x 254D	0.054*	1.512**	0.111	2.087**	14.701**	-0.046	-0.047**	303.6**	7.647**
407 x 399D	0.005	-0.820	-0.044	-1.649**	-12.165**	-0.036	0.018	-186.3*	-4.665
407 x 411D	0.094*	1.190	0.154	2.352**	17.352**	0.031	-0.119**	202.7	6.758
254 x 399D	0.121**	2.677**	0.121*	0.698	3.934	-0.123	-0.009	233.8**	10.098**
254 x 411D	0.104**	3.090**	0.220*	0.994	5.852	-0.186	0.003	372.1**	10.768**
399 x 411D	0.129**	3.090**	0.170*	2.485**	17.685**	-0.024	-0.006	614.2**	20.379**
396 x 307R	-0.084*	-1.100	0.000	-0.103	-1.333	-0.053	0.002	-116.5	-7.354*
407 x 307R	0.038	-0.830	0.000	0.586	4.000	-0.010	-0.007	-13.3	3.859
254 x 307R	-0.039	-1.260	-0.166	-2.055**	-14.660**	-0.008	0.017	-377.9**	-9.211**
399 x 307R	0.085*	2.000**	0.000	0.261	4.000**	0.167	-0.001	252.8*	9.670**
411 x 307R	-0.523**	-10.710**	-0.686**	-5.394	-34.660**	0.531**	0.134**	-1257.6**	-44.708**
407 x 396R	-0.012	-0.300	0.033	-1.740**	-13.166**	-0.058	0.045**	-256.0*	-6.344
254 x 396R	0.132**	2.033**	0.000	-0.158	-1.500	-0.070	-0.002	132.2	9.750**
399 x 396R	0.022	-0.108	0.000	0.598	5.000	0.064	-0.009	85.7	3.623
411 x 396R	-0.426**	-9.660**	-0.553**	-3.498**	-17.823**	0.870**	0.108**	-804.8**	-29.340**
254 x 407R	-0.034	0.116	0.000	-1.191*	-8.000	0.059	0.013	-142.7	-6.561
399 x 407R	0.011	-0.791	-0.116	-2.530**	-18.000**	0.030	0.069**	-163.4	-2.971
411 x 407R	-0.460**	-9.410**	-0.389**	-4.891**	-30.190**	0.560**	0.055*	-1248.1**	-46.509**
399 x 254R	0.019	0.066	0.000	-0.500	-3.333	0.009	0.004	-61.7	-0.252
411 x 254R	-0.487**	-10.420**	-0.673**	-4.318**	-28.456**	0.318*	0.122**	-1180.6**	-41.526**
411 x 399R	-0.371**	-7.025**	-0.383**	-4.564**	-29.090**	0.480**	0.136**	-833.4**	-29.932**

*, **Diferente de cero a una probabilidad de 0.05 y 0.01, respectivamente; PSPA= Peso seco de parte aérea; AP= Altura de plántula; NH= Número de hojas; VE= Velocidad de emergencia; %E= Porcentaje de emergencia; IE= Índice de emergencia; ITE= Índice de la tasa de emergencia; IV-I= Índice de vigor I; IV-II= Índice de vigor II.

CONCLUSIONES

Los caracteres de semilla se determinaron principalmente por efectos de ACG; a excepción del vigor de semilla (EA) que estuvo determinado por los efectos de ACE. De la misma manera, los caracteres de vigor inicial de plántula se determinaron por la ACG, aunque los efectos de ACE, ER y EM fueron también significativos para este grupo de líneas en ambos grupos de caracteres.

Las varianzas de los efectos de dominancia fueron más importantes que las varianzas de los efectos aditivos.

La h^2 fue mayor en caracteres de vigor inicial de plántula, por lo que la selección sería más efectiva en este tipo de caracteres.

La línea CML 254 mostró la mayor ACG y las más altas combinaciones híbridas en esta investigación y se recomienda para ser utilizada en un programa de mejoramiento para calidad de semilla y vigor de plántula.

Cuadro 6. Estimación de heredabilidad (h^2) y varianzas aditiva, de dominancia, de efectos recíprocos y del error, así como el porcentaje de acuerdo con la varianza fenotípica total para caracteres de semilla y vigor inicial de plántula, en genotipos de maíz tropical. Colegio de Postgraduados. 2004.

Caracter	Fenotípica		Error		Recíproca		Dominante		Aditiva		h ²
	%	Varianza	%	Varianza	%	Varianza	%	Varianza	%	Varianza	
Caracteres de vigor de semilla											
GE	100	596.97	11.1	66.648	46.1	275.51	27.4	163.98	15.2	90.88	0.15
EA	100	2347.09	2.5	59.022	21.6	507.78	66.3	1556.38	19.0	223.91	0.19
PS	100	2.27	1.9	0.044	42.2	0.96	37.4	0.85	18.5	0.42	0.18
CE	100	1990.72	0.9	18.608	32.9	655.25	53.4	1064.34	12.6	252.53	0.12
Caracteres de vigor inicial de plántula											
PSPA	100	2.27	1.9	0.044	42.2	0.97	37.4	0.85	18.5	0.42	0.18
AP	100	49.70	5.8	2.909	27.3	13.58	49.2	24.46	17.6	12.04	0.17
NH	100	0.14	25.7	0.036	21.4	0.03	42.8	0.06	14.2	0.02	0.14
VE	100	25.44	8.2	2.095	19.9	5.07	37.7	9.61	34.0	8.67	0.34
%E	100	1214.27	9.0	109.920	19.4	236.19	36.2	440.40	35.2	427.76	0.35
IE	100	0.16	35.0	0.056	25.0	0.04	25.0	0.04	18.7	0.03	0.18
ITE	100	0.012	8.3	0.001	25.0	0.003	42.6	0.005	25.0	0.003	0.25
IV-I	100	951574.9	6.8	64997.400	22.3	212678.0	41.6	396159.6	29.1	277739.9	0.29
IV-II	100	1064.99	6.6	71.320	26.1	278.90	45.5	484.59	21.6	230.18	0.21

h^2 = Heredabilidad; GE= Germinación estándar; EA=Envejecimiento acelerado; PS= Peso de semilla; CE= Conductividad eléctrica; PSPA= Peso seco de parte aérea; AP= Altura de plántula; NH= Número de hojas; VE= Velocidad de emergencia; %E= Porcentaje de emergencia; IE= Índice de emergencia; ITE= Índice de la tasa de emergencia; IV-I= Índice de vigor I; IV-II= Índice de vigor II.

LITERATURA CITADA

- Abdul-Baki, A. A. and Anderson J. D. 1973. Vigor determination in soybean seed by multiple criteria. *Crop Sci.* 13:630-633.
- Ajala, S. O. and Fakorede, M. A. B. 1988. Inheritance of seedling-vigor and its association with mature plant traits in maize population at two levels of breeding. *Maydica* 33:121-129.
- Antuna G., O.; Rincón S., F.; Gutiérrez Del R., E.; Ruiz T., N. A. y Bustamante G., L. 2003. Componentes genéticos de caracteres agronómicos y de calidad fisiológica de semillas en líneas de maíz. *Rev. Fitotec. Mex.* 26(1):11-17.
- Baker, R. J. 1978. Issues in diallel analysis. *Crop Sci.* 18:533-536.
- Bdliya, P. M. and Burris, J. S. 1988. Diallel analysis of tolerance of drying injury in seed corn. *Crop Sci.* 28:935-938.
- Cano R., P.; Ramírez R., G.; Ortégón P., J.; Esparza M., J. H. y Rodríguez H., S. 2000. Análisis dialélico para vigor de semilla en melón. *Agrociencia* 34:337-342.
- Cho, Y. and Scott, R. A. 2000. Combining ability of seed vigor and seed yield in soybean. *Euphytica* 112:145-150.
- Dollinger, E. J. 1985. Effects of visible recessive alleles on vigor characteristics in a maize hybrid. *Crop Sci.* 25:819-821.
- Eagles, H. A. 1982. Inheritance of emergence time and seedling growth at low temperatures in four lines of maize. *Theor. Appl. Genet.* 62:81-87.
- Fakorede, M. A. B. and Agbana, S. B. 1983. Heterosis effects and association of seedling vigor with mature plant characteristics and grain yield in some tropical maize cultivars. *Maydica* 38:327-338.
- Fakorede, M. A. B. and Ayoola, A. O. 1980. Relationship between seedling vigor and selection for yield improvement in maize. *Maydica* 25:135-147.
- Fakorede, M. A. B. and Ojo, D. K. 1981. Variability for seedling vigor in maize. *Exptal. Agric.* 17:195-201.
- Gómez M., N.; Valdivia B., R. y Mejía A., H. 1988. Dialélico integrado con líneas de diferentes programas de maíz para la región cálida. *Rev. Fitotec. Mex.* 11:103-120.
- Griffing, B. 1956. Concepts of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Aust. J. Biol. Sci.* 9:463-493.
- Grogan, C. O. 1970. Genetic variability in maize (*Zea mays* L.) for germination and seedling vigor at low temperatures. *In*: Sutherland, J. L. and Falasca, R. J. (eds.) *Proc. 25th Annu. Corn Sorghum Res. Conf.*, American Seed Trade Association. Washington, DC. USA. 90-98 p.
- Hallauer, A. R. and Miranda, J. B. 1988. *Quantitative Genetics in Maize Breeding*. Second Ed. Iowa State University Press. Ames. USA. 468 p.
- International Seed Teesting Association (ISTA) 1995. *Rules. Seed of vigor test methods*. 2nd. ed. Zurich. 117 p.
- Kharb, R. P. S.; Lather, B. P. S. and Deswal, D. P. 1994. Prediction of field emergence through heritability and genetic advance of vigour parameters. *Seed Sci. Technol.* 22:461-466.
- Lindstrom, E. W. 1972. Inheritance of seed longevity in maize inbreds and hybrids. *Genetics* 27:154-160.
- Maguire, J. D. 1962. Speed of germination. Aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Sci.* 2:176-177.
- Matthews, S. and Powell, A. A. 1981. Electrical conductivity test. *In*: Perry, D. A. (ed.). *Handbook of vigour test methods*. Zurich: ISTA, 37-42.
- Moreno M., E. and Christensen, C. M. 1971. Differences among lines and varieties of maize in susceptibility to damage by storage fungi. *Phytopathology* 61:1498-1500.
- Moreno M., E.; Morones R., R. y Gutiérrez L., R. 1978. Diferencia entre líneas, cruas simples dobles de maíz en su adaptabilidad al daño por condiciones adversas de almacenamiento. *Turrialba* 28(3):233-237.
- Moreno-Gonzalez, J. 1988. Diallel crossing system in sets of flint and dent inbred lines of maize (*Zea mays* L.). *Maydica* 33:37-49.
- Ram, C.; Singh, O.; Kharb, R. P. S.; Kumari, P. and Yadav, T. P. 1991. Seedling vigour in pigeonpea. *Seed Sci. Technol.* 19:627-631.
- Revilla, P.; Butrón, A.; Malval, R. A. and Ordás, A. 1999. Relationships among kernel weight, early vigor, and growth in maize. *Crop Sci.* 39:654-658.

- Sadeghian, S. Y. and Khodaii, H. 1998. Diallel cross analysis of seed germination traits in sugar beet. *Euphytica* 103:259-263.
- Steiner, J. J.; Grabe, D. F. and Tulo, M. 1989. Single and multiple vigor test for predicting seedling emergence of wheat. *Crop Sci.* 29:782-786.
- Trawatha, S. E.; Steiner, J. J. and Bradford, K. J. 1990. Laboratory vigour test used to predict pepper seedling field emergence performance. *Crop Sci.* 30:713-717.
- Ventura, Y. 1961. Inheritance studies of the cold test reaction of *Zea mays*. *Plant Breeding* 31:416.
- Yaklich, R. W. and Kulik, M. M. 1979. Evaluation of vigor studies in soybean seeds. Relationship of the standard germination test, seedling vigour classification, seedling length and Tz staining to field emergence. *Crop Sci.* 19:247-252.
- Yaklich, R. W.; Kulik, M. M. and Anderson, J. D. 1979. Evaluation of vigour test in soybean seeds. Relationship of ATP, conductivity and radioactive tracer multiple criterion laboratory test to field emergence. *Crop Sci.* 19:806-810.
- Zhan, Y. and Kang, M. S. 2003. Diallel-SAS: A program for Griffing's diallel methods: Handbook of formulas and software for plant geneticists and breeders. *In*: Kang, M. S. (ed). FPP. New York. London. Oxford. p. 1-19.