

# APTITUD COMBINATORIA DE LÍNEAS DE MAÍZ TROPICAL CON DIFERENTE TIPO DE MAZORCA

## COMBINING ABILITY OF TROPICAL MAIZE INBRED LINES WITH DIFFERENT EAR TYPE

Narciso Vergara Ávila<sup>1\*</sup>, Sergio Rodríguez Herrera<sup>1</sup>, Humberto de León Castillo<sup>1</sup>, Scott McLean<sup>2</sup> y Surinder Kumar Vasal<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista. C.P. 25315 Saltillo, Coah. Tel y Fax 01(84) 4411-0220. <sup>2</sup> Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. Lisboa 27, Apdo. Postal 6-641, México, D.F. Tel. y Fax 01(595) 952-1900. Ext. 1126

\* Autor responsable

### RESUMEN

Veinticuatro líneas de maíz (*Zea mays* L.) blanco tropical desarrolladas por CIMMYT con un nivel de homocigosis de  $S_6$  (0.98) a  $S_{12}$  (1.00) se usaron en cruza apareadas (12 x 12) para examinar sus efectos de aptitud combinatoria y determinar su comportamiento en cruzamientos. Las 24 líneas fueron clasificadas por su tipo de mazorca: mazorca larga (LML) y mazorca gruesa (LMG), y separadas en dos grupos de 12 líneas cada uno y se cruzaron en forma apareada (12 x 12) para originar 144 cruza. Las cruza simples fueron evaluadas en cinco ambientes en ensayos de rendimiento durante 1995 en Cotaxtla, Ver., Poza Rica, Ver., Cardel, Ver., Tlaltizapán, Mor., y Gómez Farías, Jal. Los efectos de aptitud combinatoria general (ACG) y aptitud combinatoria específica (ACE) para rendimiento de grano fueron calculados usando un análisis de Línea x Probador. En el grupo de líneas con mazorca larga (LML), siete líneas tuvieron efectos positivos de ACG para rendimiento, siendo L4 (0.58 t ha<sup>-1</sup>) la mejor línea. En el grupo de líneas con mazorca gruesa (LMG), seis líneas tuvieron efectos positivos de ACG para rendimiento, donde G7 (0.48 t ha<sup>-1</sup>) fue la mejor línea. La cruza L10 x G7 mostró el mayor efecto de ACE (0.80 t ha<sup>-1</sup>), aunque tuvo un rendimiento de 7.47 t ha<sup>-1</sup> inferior al de la cruza L4 x G10 que rindió 8.35 t ha<sup>-1</sup> con un efecto de ACE de (0.61). La mejor frecuencia de mejores cruza involucraron a líneas de la Población 21 (Tuxpeño 1) y a líneas de la Población 32 (ETO BCO). De acuerdo con los resultados, en los dos grupos de líneas LML y LMG se observaron líneas con valores aceptables de ACG, indicando de esta manera su potencial para su utilización en un programa de hibridación.

**Palabras clave:** *Zea mays* L., líneas puras, líneas con mazorca larga, líneas con mazorca gruesa, aptitud combinatoria general, aptitud combinatoria específica.

### SUMMARY

Twenty-four tropical white maize (*Zea mays* L.) inbred lines developed by CIMMYT with levels of inbreeding  $S_6$  (0.98) to  $S_{12}$  (1.00) were used in a pairing cross (12 x 12) mating system to examine their combining ability effects and determine their breeding performance. These 24 lines were classified by ear type: long ear (LML) and thick ear (LMG) and separated in two groups of 12 inbreds each, which were crossed in paired mating system (12 x 12) to originate 144 crosses. The crosses were evaluated in five environments in yield

trials during 1995 in Cotaxtla, Ver., Poza Rica, Ver., Cardel, Ver., Tlaltizapán, Mor., y Gómez Farías, Jal. General combining ability (GCA) and specific combining ability (SCA) estimates for grain yield were calculated using line x tester analysis. In the group of long ear lines (LML), seven lines had positive GCA effects, where lines L4 (0.58 t ha<sup>-1</sup>) was the best line. In the group of thick ear lines (LMG), six had positive GCA effects where the G7 (0.48 t ha<sup>-1</sup>) was the best line. The cross L10 x G7 showed the highest SCA effects (0.80 t ha<sup>-1</sup>) for yield, although its yield of 7.47 t ha<sup>-1</sup> was lower than the cross L4 x G10 which yielded 8.35 t ha<sup>-1</sup> and had a SCA effect of 0.61 t ha<sup>-1</sup>. Generally, the best crosses involved lines from populations 21 (Tuxpeño 1) and 32 (ETO BCO). In accordance with these results, in both line, groups LML, and LMG there are lines with high GCA values, indicating their potential to be used in a hybrid program.

**Index words:** *Zea mays* L., inbred lines, long ear lines, thick ear lines, general combining ability, specific combining ability.

### INTRODUCCIÓN

En las regiones bajas tropicales en el mundo con elevaciones de 0 a 1000 msnm, se siembra maíz (*Zea mays* L.) de grano blanco en más de 10.8 millones de hectáreas (CIMMYT, 1988). En México, se siembran aproximadamente 2.8 millones de hectáreas en las zonas bajas tropicales, principalmente con maíces de grano blanco, de madurez intermedia y tardía. El mejoramiento genético del maíz en las zonas tropicales de México se inició en la década de los 40's, formándose los primeros híbridos con líneas de la primera generación; sin embargo, debido a los bajos rendimientos de las líneas y al alto costo de la producción de la semilla de los híbridos de cruza simple, el maíz híbrido no tuvo mayor interés en las etapas iniciales (Wellhausen, 1960). Posteriormente, una vez más se dió énfasis al desarrollo de híbridos de cruza simple debido principalmente a su uniformidad y mayor potencial de rendimiento que los híbridos de cruza doble. Debido a que en un programa de hibridación, la información de aptitud combina-



toría y heterosis de sus fuentes de germoplasma es muy importante para explotar al máximo la  $F_1$ , y por la escasa información sobre patrones heteróticos, se planteó el presente estudio cuyos objetivos son: 1) determinar si el uso de líneas endogámicas de diferente grupo heterótico y con caracteres contrastantes para longitud de mazorca permitiría identificar híbridos con buen potencial de rendimiento; 2) estimar la aptitud combinatoria de las líneas y su comportamiento en combinaciones híbridas; 3) identificar progenitores deseables para ser utilizados en un programa de hibridación.

## REVISIÓN DE LITERATURA

El mejoramiento genético del maíz en México fue iniciado por varias instituciones de investigación como: la Dirección de Campos Experimentales (1940 a 1944), la Oficina de Estudios Especiales (1945 a 1960), el Instituto de Investigaciones Agrícolas (1947 a 1960) y posteriormente por el Instituto Nacional de Investigación Agrícola ahora Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP, 1996). Inicialmente se empezó a trabajar en el Valle de México, El Bajío y Llera Tamaulipas, y poco después se extendió a Veracruz. Los trabajos realizados en el Campo Experimental de San Rafael, Veracruz, permitieron obtener en 1953 los primeros híbridos de cruz doble H-501, H-502 y H-503 (Wellhausen, 1960). El primer esfuerzo en identificar sistemáticamente de un complejo racial élite, patrones heteróticos para el trópico fue hecho por Wellhausen a principios de los años 60's, encontrando que Tuxpeño (grano dentado) combina bien con ETO (grano cristalino), patrón heterótico que es ampliamente usado en el trópico.

En un estudio realizado en el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo CIMMYT, 92 líneas tropicales se cruzaron con cuatro líneas usadas como probadores, de las cuales dos fueron de grano dentado y dos de grano cristalino. Como resultado de la evaluación de dichas cruza, las líneas fueron separadas en dos grupos heteróticos tropicales llamados THG-A y THG-B (Vasal *et al.*, 1992). Mientras que en el subtrópico, 88 líneas subtropicales se cruzaron con cuatro líneas usadas como probadores, y con la información de las evaluaciones de las cruza de prueba, las líneas se separaron en dos grupos heteróticos llamados STHG-A y STHG-B (Vasal *et al.*, 1992).

Davis (1927) propuso por vez primera que la aptitud combinatoria de las líneas endogámicas de maíz podría estimarse mediante el comportamiento de sus cruza con un probador común y que esta prueba se podría efectuar en cualquier etapa de desarrollo de las líneas. Desde que Sprague y Tatum (1942) introdujeron los conceptos de

aptitud combinatoria general (ACG) y específica (ACE), surgieron nuevas oportunidades para el uso de pruebas de progenies o mestizos. Con el uso extensivo de líneas, su evaluación se fue haciendo más problemática, por lo que Davis (1927) y Jenkins y Brunson (1932) sugirieron el uso de un probador común para medir la aptitud combinatoria de un gran número de líneas. Una vez que se puso de manifiesto la efectividad de los probadores para seleccionar líneas, ya fuera por su ACG o ACE, surgieron nuevas consideraciones teóricas y empíricas para determinar el valor relativo del probador (Hallauer y Miranda, 1981).

La selección del probador o probadores apropiados es una etapa muy importante debido a que es necesario maximizar la información obtenida de las líneas evaluadas. Existen diversas opiniones sobre el tipo de probador ideal a utilizar en la prueba de progenies, pero las evidencias muestran que el mejor probador sería el que tenga baja frecuencia de alelos favorables, que facilite la discriminación entre progenies, que reduzca las fases de evaluación y que además ayude a identificar híbridos sobresalientes (Vasal *et al.*, 1995).

## MATERIALES Y MÉTODOS

En este estudio se usaron 24 líneas de grano blanco con niveles de endogamia de  $S_6$  (0.98) a  $S_{12}$  (1.00) derivadas de germoplasma tropical del CIMMYT. La descripción detallada del germoplasma se presenta en el Cuadro 1. La mayoría de estas líneas ha sido evaluada y probada por su rendimiento *per se* y por su comportamiento en combinaciones híbridas (Han *et al.*, 1991). Las 24 líneas fueron identificadas durante el desarrollo y evaluación de germoplasma de maíz del programa tropical de CIMMYT, y clasificadas por su tipo de mazorca y separadas en dos grupos de 12 líneas cada uno. En el primero se incluyeron líneas con mazorca larga (LML) derivadas de las Poblaciones 21 y 43, mientras que en el segundo se incluyeron líneas con mazorca gruesa (LMG) derivadas de las Poblaciones 25, 32, Tuxpeño Sequía, Sintético TSR, Pool 24 y una línea de la Población 21. Los veinticuatro progenitores fueron cruzados en forma apareada (12 x 12) en Pango de Oca, Veracruz, durante el ciclo de invierno de 1994. Se sembró un surco de 5 metros de largo por progenitor; los cruzamientos se realizaron planta a planta tratando de utilizar 21 plantas por progenitor. En la cosecha se hizo una mezcla de igual cantidad de semilla de las mazorcas provenientes de las cruza directas y recíprocas para representar a cada combinación.

Las 144 cruza simples obtenidas fueron evaluadas utilizando un diseño experimental látice cuadruple 12 x 12 parcialmente balanceado con cuatro repeticiones (Gómez y Gómez, 1984). El ensayo se sembró en cinco localidades



durante 1995: en Cotaxtla, Veracruz (15 msnm, 18° 50' L.N. 96° 10' L.O.), Poza Rica, Veracruz (60 msnm, 20° 32' L.N. 97° 26' L.O.), Cardel, Veracruz (85 msnm, 19° 20' L.N. 96° 23' L.O.), Tlaltizapán, Morelos (840 msnm, 18° 41' L.N. 99° 68' L.O.), y Gómez Farías, Jalisco (1575 msnm, 20° 28' L.N. 103° 27' L.O.). Las tres primeras localidades estuvieron en condiciones tropicales y las dos últimas en condiciones subtropicales. La parcela experimental fue un surco de 5 metros de largo, 75 cm entre surcos y 25 cm entre plantas, para obtener una densidad de población de 53 000 plantas por hectárea. Se registraron datos para las variables días a floración femenina y masculina (número de días desde la siembra hasta que el 50 % de las plantas de la parcela mostraba la emisión de estigmas y emisión de polen, respectivamente), altura de planta y mazorca (en cm, desde la superficie del suelo hasta donde se inicia la ramificación de la espiga y al nudo de la mazorca superior, respectivamente), acame de raíz y tallo (en porcentaje de plantas por parcela con inclinación igual o mayor de 30° de la vertical y como porcentaje de tallos quebrados abajo de la mazorca, respectivamente), pudrición de mazorca (usando una escala de 1 a 5, siendo 1 muy sana y 5 muy enferma). Al momento de la cosecha se registró el peso fresco de mazorca en kilogramos y el por ciento de humedad del grano. El rendimiento de grano en toneladas por hectárea fue calculado por parcela, suponiendo 80 % de desgrane y ajustándolo a 15 % de humedad. En cada localidad se realizó un análisis de varianza con base en el modelo del diseño látice propuesto por Gómez y Gómez (1984), usando el paquete estadístico "Alfa - Látice" (Barreto *et al.*, 1993), además de un análisis de varianza combinado. El método descrito por Kempthorne (1957) fue usado para obtener los efectos de aptitud combinatoria general (ACG) y aptitud combinatoria específica (ACE) de los progenitores y sus respectivas cruza, usando medias ajustadas de las cruza (ajustadas para efectos de bloques en el diseño Alfa-Látice).

Las pruebas de F para el análisis de varianza combinado fueron calculadas de la siguiente manera: Los efectos principales LML y LMG fueron probadas con sus respectivas interacciones con localidades; las demás interacciones fueron probadas contra la triple interacción y ésta última fue comparada con el error experimental. Los efectos de ACG y ACE se probaron usando una prueba de t, calculando los respectivos errores estándar de acuerdo con las fórmulas descritas por Singh y Choudhary (1985).

La estructura genética de una cruza se puede definir con base en los efectos de aptitud combinatoria general (ACG) y de aptitud combinatoria específica (ACE) de sus progenitores. La magnitud relativa de tales efectos podría servir como criterio para saber si el alto rendimiento de algunas

cruzas se debe a: efectos aditivos ( $g_i + g_j$ ) >  $S_{ij}$ ; efectos no aditivos  $S_{ij} > (g_i + g_j)$ , ó a efectos aditivos más efectos no aditivos ( $g_i + g_j$ ) =  $S_{ij}$ . Con las 144 cruza para el análisis combinado, se construyó la estructura genética ( $Y_{ij} = u + g_i + g_j + S_{ij}$ ) para rendimiento de grano, de acuerdo con la metodología descrita por Claure (1990), con base en el siguiente modelo:

$$Y_{ij} = u + g_i + g_j + S_{ij}$$

donde:

$Y_{ij}$  = rendimiento promedio de una cruza en el que interviene el  $ij$ -ésimo progenitor.

$u$  = valor medio del grupo de cruza.

$g_i$  = efecto de ACG del  $i$ -ésimo progenitor (LML).

$g_j$  = efecto de ACG del  $j$ -ésimo progenitor (LMG).

$S_{ij}$  = efecto de ACE del  $i$ -ésimo progenitor con el  $j$ -ésimo progenitor.

Con base en los efectos de ACG de las líneas progenitoras, se procedió a la clasificación en valores alto, intermedio y bajo, mediante la agrupación de los valores de ACG > 1, ACG cercanos a 1, y ACG < 1, respectivamente.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los cuadrados medios del análisis de varianza látice por localidad para rendimiento de grano se muestran en el Cuadro 2, en donde se observa que para repeticiones hubo significancia únicamente en Tlaltizapán, mientras que para bloques hubo diferencias altamente significativas en todas las localidades, excepto en Cotaxtla. Para genotipos (cruza) hubo diferencias altamente significativas en todas las localidades de evaluación. En el grupo de líneas con mazorca larga (LML) hubo diferencias significativas y altamente significativas en Tlaltizapán, Poza Rica y Gómez Farías. En el grupo de líneas con mazorca gruesa (LMG) hubo diferencias altamente significativas en todas las localidades excepto en Cotaxtla. Para la interacción LML x LMG hubo diferencias altamente significativas en todas las localidades. La eficiencia relativa del diseño látice con respecto al bloques al azar fue de 104.2 a 115.1 %, indicando que se necesitan más repeticiones en el diseño de bloques al azar para que fuera considerado eficiente. El coeficiente de variación tuvo un rango de 8.6 a 19.2 %.

Los cuadrados medios del análisis de varianza combinado de las cinco localidades para rendimiento de grano, se presentan en el Cuadro 3, en donde se observa que hubo diferencias altamente significativas entre las localidades utilizadas, las cuales pueden ser atribuidas a las diferencias en las condiciones climáticas; Poza Rica, Cardel y Cotaxtla son localidades tropicales de la costa del Golfo de

Cuadro 1. Código y genealogía<sup>(1)</sup> de 24 líneas tropicales de grano blanco y tardías utilizadas en este estudio.

Líneas con mazorca larga (LML)			Líneas con mazorca gruesa (LMG)		
L1	Pob21C5HC219-S7	(CML9)	G1	P24xP24-s8	(CML247)
L2	Pob21C5HC219-S11	(CML10)	G2	(P24xP24)-S10	
L3	Pob21C5HC219-S8		G3	Pool.24(S1)-S7	
L4	(Pob.21xPob.43)-S6		G4	Tuxp.Seq.149-S10	(CML254)
L5	(Pob.21xPob.21)-S9		G5	Tuxp.Seq.219-S14	
L6	(AC7643Xpob.43)S12		G6	Pob.227SR-S9	(CML267)
L7	(AC7643Xpob.43)-S8	(CML273)	G7	Pob.25C0HC246-S7	
L8	Pob.43STEC1HC10-S13		G8	Pob.25STEC1HC5-S10	
L9	Pob.21C5HHC219-S10	(CML264)	G9	Pob.32C4HC242-S7	(CML39)
L10	AC7643-16-S8		G10	Pob.32(MRRS)C1-S9	
L11	Pob.21C6S1MH226-S8		G11	Sint.Bco. TSR-S12	
L12	Pob.21C5HC84-S8		G12	Pob.21C5HC109-S14	

<sup>(1)</sup> La genealogía está dada en forma estándar con el número de Población o Pool, seguido del nivel de endogamia en el cual las líneas fueron probadas. El código CML en paréntesis está dado para líneas públicas disponibles por CIMMYT.

Abreviaturas usadas: L = Línea con mazorca larga, G = Línea con mazorca gruesa; Pob. = Población; P = Pool; Tux. = Tuxpeño; Seq. = Sequía; AC = Across; Sint. = Sintético; Bco. = blanco; HC = Hermano completo; MH = Medio hermano; C = Ciclo; STE = Sintético tolerante a endogamia; TSR = Resistente a *Phyllacora*; MRRS = Selección Recíproca Recurrente Modificada por CIMMYT.

Cuadro 2. Análisis de varianza para rendimiento de grano ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) para 24 líneas y sus respectivas cruces.

Fuentes de variación	GL	Poza Rica	Cotaxtla	Cardel	Tlaltizapán	Gómez Farías
Rep.	3	584203.8	2809698.9	1945582.7	21501517.0*	16571873.4
Bloques (Rep.)	44	1381866.8**	1459768.3	1726165.1	1945472.4**	2203184.5**
Genotipos	143	2939028.0**	2855741.2**	1164099.5**	4109885.0**	1603079.7**
LML (ACG)	11	6006949.8*	4140173.4	1788334.3	19366444.0**	3007562.4*
LMG (ACG)	11	11546349.8**	6717934.3*	3940284.8**	12769357.8**	5351435.7**
LML x LMG	121	1877642.2**	2387866.2**	854970.4**	1935700.2**	1134639.8**
(ACE)						
Error	385	719395.2	1566422.1	485406.1	591255.8	733893.7
Total	575					

\*\* Diferencias significativas a 0.05 y 0.01 % de probabilidad.

GL = grados de libertad

LML = líneas con mazorca larga

LMG = líneas con mazorca gruesa

Cuadro 3. Análisis de varianza combinado para rendimiento de grano ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) para 24 líneas y sus respectivas cruces evaluadas en cinco localidades.

Fuentes de variación	GL	Cuadrados medios	F
Loc.	4	1953381629.9	225.0**
Rep. (Loc.)	15	8682575.2	5.0**
Bloques (Loc. x Rep.)	220	1743291.4	2.1**
Genotipos	143	4887419.3	2.5*
LML (ACG)	11	11485017.9	2.0*
LMG (ACG)	11	15845792.7	2.6*
LML x LMG(ACE)	121	3291421.8	2.7**
Genotipos x Loc.	572	1946103.5	2.4**
LML(ACG) x Loc.	44	5706111.5	4.7**
LMG(ACG) x Loc.	44	6119892.4	5.0**
LML x LMG (ACE) x Loc.	484	1224849.3	1.5**
Error combinado	1925	819274.6	
Total	2879		

\*, \*\* Diferencias significativas a 0.05 y 0.01 % de probabilidad.

GL = grados de libertad

LML = líneas con mazorca larga

LMG = líneas con mazorca gruesa

F = prueba de F, para cada fuente principal usando sus respectivas interacciones con localidad



México y a nivel del mar, mientras que Tlaltizapán y Gómez Farías están más distantes de éstas y a una altitud de 840 y 1575 msnm, respectivamente, y se consideran de clima subtropical. En repeticiones y bloques también se encontraron diferencias altamente significativas, indicando que el efecto repeticiones logró eliminar las diferencias atribuibles al terreno y evitó que se acumulara en el error del diseño, mientras que la significancia mostrada en bloques indica que éstos extrajeron las diferencias del terreno, evitando que en repeticiones se beneficiara a un genotipo determinado, confirmando así la eficiencia del diseño látice a través del ajuste de medias entre bloques. En los genotipos (cruzas) hubo diferencias altamente significativas, atribuibles a que esto a que los progenitores de las cruzas provienen de germoplasma diferente. También se encontraron diferencias altamente significativas en las diferentes fuentes de líneas de cada grupo, excepto en las líneas con mazorca larga (LML) y en las líneas con mazorca gruesa (LMG) hubo diferencias al nivel de 0.05 de probabilidad, lo que se atribuye a la similitud existente entre líneas LML, ya que la mayoría de ellas fueron derivadas de la Población 21, mientras que las diferencias entre las líneas con (LMG) se deben a que provienen de diferentes poblaciones. Para la interacción LML x LMG, hubo diferencias altamente significativas, indicando que las LML clasifican a la ACE de las LMG en forma diferente, y viceversa; estos resultados eran de esperarse debido fundamentalmente a que existen diferencias dentro de cada grupo de líneas, coincidiendo con lo reportado por Hallauer (1990). Para la triple interacción LML x LMG con localidades, también hubo diferencias altamente significativas, lo cual indica que los materiales se comportaron relativamente en forma diferente de una localidad a otra. Estos resultados muestran que mientras más seleccionadas y más homocigóticas sean las líneas, más interaccionaran éstas con el ambiente así como sus híbridos, lo cual coincide con lo reportado por Pandey *et al.*, (1985). El coeficiente de variación fue de 13.14 %, mientras que la eficiencia relativa del diseño látice en el análisis combinado con respecto a bloques al azar fue de 111.6 %, lo anterior significa que la varianza del error utilizado por el diseño látice es menor y que los promedios de los genotipos son ajustados por efectos de los bloques, es decir, se necesitarían más repeticiones en el diseño de bloques al azar para que este sea considerado eficiente.

El comportamiento promedio de las 144 cruzas se presenta en el Cuadro 4, en donde se puede observar que en Tlaltizapán se tuvo el valor más alto de rendimiento (8.91 t ha<sup>-1</sup>), mientras que el valor más bajo fue observado en Gómez Farías (4.49 t ha<sup>-1</sup>). Estas marcadas diferencias se debieron muy probablemente al diferencial de adaptación

del material genético, ya que las líneas usadas en este ensayo muestran mejor adaptación en la primera localidad que en la segunda. En Cardel, Poza Rica y Cotaxtla, los materiales mostraron menos días a floración, es decir fueron más precoces, mientras que en Tlaltizapán y Gómez Farías los materiales fueron más tardíos. En Tlaltizapán se observaron híbridos uniformes con buena altura de planta y posición de mazorca, mientras que en el resto de las localidades fueron más altos. En Gómez Farías y Tlaltizapán se observó menor porcentaje de acame de raíz y tallo, así como también menor pudrición de mazorca.

Los estimadores de los efectos de ACG para rendimiento de grano, en promedio de las cinco localidades para las 24 líneas, se presentan en los Cuadros 5 y 6. Dentro del grupo de líneas con mazorca larga (LML), la mejor fue L4 con un alto valor de ACG de 0.58 t ha<sup>-1</sup> y un rendimiento promedio de 7.47 t ha<sup>-1</sup> seguida por la línea L9 con un valor de ACG de 0.32 t ha<sup>-1</sup> y un rendimiento promedio de 7.21 t ha<sup>-1</sup>. Estas dos líneas tuvieron valores de ACG positivos y significativos en al menos cuatro de las cinco localidades donde se evaluaron, mostrando así su buena estabilidad para este efecto. En el grupo de líneas con mazorca gruesa (LMG) la más sobresaliente fue G7 con un valor de ACG de 0.48 t ha<sup>-1</sup> y un rendimiento promedio de 7.37 t ha<sup>-1</sup>, seguida por la línea G11 con un valor de ACG de 0.30 t ha<sup>-1</sup> y un rendimiento promedio de 7.19 t ha<sup>-1</sup>, ambas clasificadas como de alta ACG. Estas líneas mostraron también valores positivos y significativos de ACG en cuatro de las cinco localidades donde se evaluaron. Las líneas G4, G10 y G12 tuvieron valores de ACG de 0.28 a 0.23 t ha<sup>-1</sup>, y se clasificaron como de intermedia ACG. La línea G10 mostró valores positivos y significativos de ACG en las cinco localidades donde se evaluó, mostrando así su excelente estabilidad para dicho efecto genético.

Los efectos de ACE para rendimiento de grano así como la estructura genética de las 12 mejores cruzas se muestran en el Cuadro 7, en donde se observa que la mayoría tuvo buen rendimiento y valores de ACE aceptables. La cruz L10 x G7 (Pob.43 x Pob.25) mostró el valor más alto de ACE de 0.80 t ha<sup>-1</sup> con un rendimiento fue de 7.47 t ha<sup>-1</sup>, seguida por la cruz L6 x G2 con una ACE de 0.78 t ha<sup>-1</sup> y un rendimiento de 7.61 t ha<sup>-1</sup>. La cruz L4 x G10 (Pob.21 x Pob.32) tuvo el rendimiento más alto 8.35 t ha<sup>-1</sup> pero su ACE fue de 0.61 t ha<sup>-1</sup>; esta cruz involucra dos líneas con buena ACG. Se encontró que la mayoría de las mejores cruzas involucraron líneas de alta, intermedia y baja ACG en todas sus combinaciones, excepto la cruz L6 x G2 que obtuvo el segundo lugar en ACE, aunque involucra a dos líneas de baja ACG.



Cuadro 4. Medias de rendimiento de grano y ocho características agronómicas de 144 cruza simples por localidad y a través de localidades.

Localidad	Rendimiento de grano (t ha <sup>-1</sup> )	Floración femenina (días)	Floración masculina (días)	Altura de planta (cm)	Altura de mazorca (cm)	Acame de raíz (%)	Acame de tallo (%)	Mazorcas podridas (%)	Humedad del grano (%)
Cotaxtla, Ver.	8.05	58	57	238	132	0.9	7.7	1.7	26.0
Poza Rica, Ver.	7.49	57	58	241	130	4.2	1.0	6.8	20.5
Cardel, Ver.	5.51	56	57	237	127	28.0	17.4	0.2	22.5
Tlaltizapán, Mor.	8.91	64	63	236	118	1.1	1.3	0.6	23.4
Gómez Farías, Jal.	4.49	82	81	238	130	0.4	1.0	0.9	21.2
Promedio	6.89	63	63	238	127	6.8	5.7	2.0	22.7

Cuadro 5. Efectos de aptitud combinatoria general (ACG) por localidad y a través de localidades para rendimiento de grano (t ha<sup>-1</sup>) de las 24 líneas tropicales evaluadas.

Líneas	Cotaxtla	Poza Rica	Cardel	Tlaltizapán	Gómez Farías	Combinado	Clasificación de ACG
Líneas con mazorca larga (LML)							
L4	0.82	-0.15	0.30	1.56	0.36	0.58	Alta
L9	0.00	0.43	0.16	0.33	0.66	0.32	Intermedia
L7	0.52	0.79	0.14	-0.34	-0.25	0.17	Intermedia
		0.08	-0.11	0.86	-0.02	0.14	Intermedia
L5	-0.09	-0.19	0.45	-0.32	0.31	0.03	Intermedia
L11	0.39	0.21	-0.60	-0.01	0.10	0.02	Intermedia
L1	-0.04	-0.45	0.11	0.43	-0.04	0.00	Intermedia
L6	0.05	0.25	-0.08	-0.26	-0.22	-0.05	Baja
L12	-0.04	0.29	-0.37	-0.42	0.01	-0.11	Baja
L2	-0.55	-0.38	0.00	0.63	-0.31	-0.12	Baja
L8	-0.68	0.08	-0.04	-0.82	0.07	-0.28	Baja
L10	-0.28	-0.96	0.05	-1.63	-0.66	-0.70	Baja
Líneas con mazorca gruesa (LMG)							
G7	0.26	0.94	1.05	0.25	-0.13	0.48	Alta
G11	0.34	0.36	0.16	0.88	-0.23	0.30	Intermedia
G4	-0.06	0.01	-0.02	1.18	0.30	0.28	Intermedia
G10	0.07	0.60	0.22	0.25	0.22	0.27	Intermedia
G12	0.59	-0.04	-0.10	-0.15	0.85	0.23	Intermedia
G8	0.06	-0.38	0.10	0.38	0.23	0.08	Intermedia
G2	0.12	0.52	-0.32	-0.33	-0.04	-0.01	Baja
G3	-0.64	0.13	0.00	-0.13	0.24	-0.08	Baja
G6	0.34	-0.12	-0.51	-0.43	-0.31	-0.21	Baja
G1	-1.04	0.06	-0.28	0.18	-0.15	-0.25	Baja
G5	-0.12	-0.61	-0.21	-0.66	-0.31	-0.38	Baja

Las cruza de alto rendimiento, de acuerdo con su estructura genética (Cuadro 7), resultaron así debido a: efectos aditivos ( $g_i + g_j$ ) >  $S_{ij}$ , efectos no aditivos  $S_{ij}$  > ( $g_i + g_j$ ) o a efectos aditivos más no aditivos ( $g_i + g_j$ ) =  $S_{ij}$  similar a lo reportado por Claure (1990). Las cruza L4 x G10, L4 x G12, L9 x G7, L3 x G7, L9 x G11 y L4 x G7, ilustran el primer caso en donde los efectos aditivos son más importantes que los no aditivos; por tanto se esperaba que la depresión endogámica de las generaciones avanzadas de estas cruza fuera baja y que conservaran el alto rendimiento de la  $F_1$ ; estas cruza involucran líneas con alta ACG. Las cruza L11 x G10, L1 x G12, L10 x G7 y

L6 x G2 corresponden al segundo caso en donde los efectos no aditivos son más importantes que los aditivos, por lo que ellos se esperaba una alta depresión endogámica en sus generaciones avanzadas, y sólo se podría usar la  $F_1$ ; estas cruza involucran líneas con con alta y baja ACG. Las cruza L9 x G12, L1 x G7 y L5 x G7 muestran el tercer caso, en donde los efectos aditivos y los no aditivos son importantes; se esperaba que estas cruza expresaran en sus generaciones avanzadas una depresión endogámica intermedia; estas cruza involucran líneas con intermedia ACG. En general, se encontró que las 10 cruza superiores en rendimiento involucraron líneas de alta ACG, y las

Cuadro 6. Clasificación de líneas con aptitud combinatoria general (ACG) alta, intermedia y baja, para rendimiento de grano en t ha<sup>-1</sup>.

Código	Rend. (t ha <sup>-1</sup> )	ACG	
Líneas con mazorca larga (LML)			
Líneas con ACG Alta			
L4	7.47	0.58	**
Líneas con ACG intermedia			
L9	7.21	0.32	**
L7	7.06	0.17	*
L3	7.03	0.14	*
L5	6.92	0.03	
L11	6.91	0.02	
L1	6.89	0.00	
Líneas con ACG Baja			
L6	6.84	-0.05	
L12	6.79	-0.11	
L2	6.77	-0.12	
L8	6.61	-0.28	**
L10	6.19	-0.70	**
Líneas con mazorca gruesa (LMG)			
Líneas con ACG Alta			
G7	7.37	0.48	**
Líneas con ACG Intermedia			
G11	7.19	0.30	**
G4	7.17	0.28	**
G10	7.16	0.27	**
G12	7.12	0.23	**
G8	6.97	0.08	
Líneas con ACG Baja			
G2	6.88	-0.01	
G3	6.81	-0.08	
G6	6.69	-0.21	**
G1	6.65	-0.25	**
G5	6.51	-0.38	**
G9	6.18	0.71	**

\*, \*\* Significancia a 0.05 y 0.01 niveles de probabilidad.

Rend. = Rendimiento de grano (t ha<sup>-1</sup>) de cada línea, en promedio de 12 cruza y cinco ambientes.

Cuadro 7. Comportamiento de cruza simples superiores junto con sus contribuciones de aptitud combinatoria general (ACG), específica (ACE) y estructura genética a través de ambientes.

Cruza	Rend. (t ha <sup>-1</sup> )	LML ACG (gi)	LMG ACG (gi)	gi + gj	ACE (Sij)	Rango
L4 x G10	8.35	0.58	0.27	0.85	0.61**	6
L4 x G12	8.26	0.58	0.23	0.81	0.56**	8
L9 x G12	8.09	0.31	0.23	0.54	0.66**	5
L9 x G7	7.94	0.31	0.48	0.79	0.26	36
L11 x G10	7.89	0.02	0.27	0.29	0.71**	4
L1 x G12	7.87	0.00	0.23	0.23	0.75**	3
L3 x G7	7.84	0.14	0.48	0.62	0.33	25
L1 x G7	7.78	0.00	0.18	0.48	0.41**	18
L5 x G7	7.76	0.03	0.18	0.51	0.36	22
L9 x G11	7.74	0.31	0.30	0.61	0.24	41
L10 x G7	7.47	-0.70	0.48	-0.22	0.80**	1
L6 x G2	7.61	-0.05	-0.01	-0.06	0.78**	2
L4 x G7	7.68	0.58	0.48	1.06	-0.27	11

\*, \*\* Significancia a 0.05 y 0.01 de niveles de probabilidad, respectivamente.

LML y LMG, valores de ACG de progenitores de mazorca larga y gruesa, respectivamente

Rango = Orden obtenido según su valor de ACE.

Cuadro 8. Rendimiento de grano, días a floración femenina, altura de planta, altura de mazorca, acame de tallo, acame de raíz, pudrición de mazorca y contenido de humedad de grano de las doce mejores cruces.

Cruza	Rendimiento de grano (t ha <sup>-1</sup> )	(%) <sup>1</sup>	ACE	Floración femenina (días)	Altura de planta (cm)	Altura de mazorca (cm)	Acame de tallo (%)	Acame de raíz (%)	Pudrición de mazorca (%)	Humedad del grano (%)
L4 x G10	8.35	121.2	0.61	65	255	125	8.1	3.0	0.9	23.8
L4 x G12	8.26	119.9	0.56	65	260	133	15.8	3.7	5.1	21.7
L9 x G12	8.09	117.4	0.66	66	252	130	2.7	11.1	1.7	22.5
L9 x G7	7.94	115.2	0.26	65	250	130	2.5	1.1	1.3	25.1
L11 x G10	7.89	114.5	0.71	66	243	131	16.6	3.0	0.7	22.9
L1 x G12	7.87	114.2	0.75	67	245	122	2.9	7.8	3.2	23.2
L3 x G7	7.84	113.8	0.33	64	248	141	4.0	12.5	2.4	23.6
L1 x G7	7.78	112.9	0.41	65	245	126	2.1	1.4	1.0	26.8
L5 x G7	7.76	112.6	0.36	64	248	129	2.9	3.2	1.8	23.3
L9 x G11	7.74	112.3	0.24	66	235	115	2.9	0.7	1.0	23.4
L10 x G7	7.47	108.4	0.80	63	249	131	1.9	4.4	0.9	24.0
L6 x G2	7.61	110.4	0.78	65	235	125	7.9	1.7	1.7	19.9
Combinado	6.9	100.0		65	238	125	7.0	6.8	2.0	22.7

<sup>1</sup> Porcentaje de superioridad sobre la media general.



10 cruzas inferiores en rendimiento involucraron líneas de baja ACG.

Dado que en este grupo de cruzas se involucraron tanto efectos aditivos ( $gi+gj$ ) como no aditivos ( $Sij$ ), ambos efectos son importantes. Lo anterior puede ser debido a que durante el proceso de desarrollo del germoplasma ACG se efectuó una selección de líneas de alto rendimiento (alta ACG) mientras que los buenos efectos de ACE se pudieran deber a que las líneas pertenecen a poblaciones diferentes. El alto rendimiento de la craza L4 x G10 se debió a que sus efectos aditivos ( $gi+gj$ ) fueron de mayor importancia, mientras que en las cruzas L10 x G7 y L6 x G2, que ocuparon los lugares 11 y 12, los efectos no aditivos ( $Sij$ ) fueron los más importantes; en la craza L1 x G7 su rendimiento se debió tanto a efectos aditivos como no aditivos.

Las líneas de mazorca gruesa obtuvieron un valor promedio de ACG de ( $0.273 \text{ t ha}^{-1}$ ), más alto en que el de las líneas de mazorca larga ( $0.179 \text{ t ha}^{-1}$ ), esto es considerando únicamente los valores positivos de ACG en cada grupo de líneas, respectivamente. Sin embargo, la frecuencia de líneas con valores de ACG positiva fue similar en ambos grupos: en las líneas con mazorca larga hubo siete líneas con efectos de ACG positivos y en las líneas con mazorca gruesa hubo seis con efectos positivos, lo cual muestra que no hay diferencias significativas entre las líneas con mazorca larga y líneas con mazorca gruesa en cuanto a su ACG, como se señala también en el análisis de varianza combinado.

Al considerar el tipo de mazorca, las líneas con mazorca gruesa (mayor número de semilla) podrían ser usadas como progenitores femeninos en la formación de nuevos híbridos de craza simple, lo que facilitaría la producción de semilla. Se encontraron dos buenas combinaciones entre líneas derivadas de Población 21 x Población 32, el cual es un patrón heterótico muy conocido, seguidas de otras combinaciones de Población 21 x Población 25 y Población 43 x Población 25; también se encontraron buenas combinaciones entre líneas derivadas del mismo germoplasma como es el caso de las cruzas L4 x G12, L9 x G12 y L1 x G12, todas ellas derivadas de la Población 21, lo cual muestra que es posible formar híbridos interlineales intrapoblacionales con buen potencial de rendimiento.

En el Cuadro 8 se muestran el rendimiento de grano y las características agronómicas importantes de las cruzas más sobresalientes. Las mejores cruzas superan en 8 a 21 % a la media general, ésta considerada con un valor de 100 %. Algunas de las cruzas tuvieron buena altura de planta y baja posición de mazorca (L9 x G11 y L6 x G2),

menor porcentaje de acame de raíz y tallo (L10 x G7 y L1 x G7), y poca pudrición de mazorca (L4 x G10 y L9 x G11). Estas cruzas pueden considerarse como híbridos potenciales para su utilización comercial. En general la mayoría de los híbridos de craza simple tuvieron alto potencial de rendimiento y mostraron características agronómicas aceptables.

## CONCLUSIONES

Las líneas con mazorca gruesa mostraron valores de ACG ligeramente más grandes en comparación con las de mazorca larga. Sin embargo, en ambos grupos se tuvo la misma frecuencia en número de líneas con valores positivos de ACG. De las 24 líneas evaluadas, 12 (seis con mazorca larga y seis con mazorca gruesa) mostraron valores de ACG positivos.

Las líneas con alto valor de ACG de ambos grupos LML y LMG, generalmente formaron cruzas simples intergrupos con buen potencial de rendimiento, así como con atributos agronómicos aceptables.

La mayor frecuencia de las mejores cruzas simples ocurrió entre líneas de diferente población, aunque, también se encontraron cruzas sobresalientes entre líneas derivadas de la misma población. Estos resultados muestran la importancia de utilizar líneas mejoradas que pertenezcan a grupos heteróticos opuestos, para asegurar el éxito de un programa de hibridación.

## BIBLIOGRAFÍA

- Barreto, H.J., G.O. Edmeades, S.C. Chapman, y J. Crossa. 1993. El diseño Alfa-Látice en fitomejoramiento y agronomía: Generación y Análisis. Síntesis de resultados experimentales del PRM, 1992. Vol.4 pp: 273-283.
- CIMMYT. 1988. Maize Production Regions in Developing Countries. CIMMYT, El Batán, México.
- Claure I., V.T. 1990. Aumento del potencial de rendimiento mediante alternancia de hibridación y selección en maíz (*Zea mays* L.). Tesis Doctoral, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 136 p.
- Davis, R. L. 1927. Report of the plant breeder. Rep. Puerto Rico. Agric. Exp. Stn. pp:14-15.
- Gómez A., A. and K.A. Gómez. 1984. Statistical Procedures for Agricultural Research. 2<sup>nd</sup> Ed. John Wiley and Sons. 680 p.
- Hallauer, R. A. and J. B. Miranda FO. 1981. Quantitative Genetics in Maize Breeding. 1<sup>st</sup> Ed. The Iowa State University Press Ames, Iowa 50010. 468 p.
- Hallauer, R. A. 1990. Methods used in developing maize inbreds. Maydica 35:1-16.
- Han G.C., S.K. Vasal, D.L. Beck, and E. Elias. 1991. Combining ability of inbred lines derived from CIMMYT maize (*Zea mays* L.) germplasm. Maydica 36:57-64.
- INIFAP. 1996. Híbridos y variedades de maíz liberados por el INIFAP hasta 1996. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Toluca, México, Noviembre de 1996. Publicación Especial No.16. 102 p.

- Jenkins, M. T. and A. M. Brunson. 1932. Methods of testing inbreed lines of maize in cross-bred combinations. *J. Am. Soc. Agron.* 24: 523-530.
- Kempthorne, O. 1957. *An Introduction to Genetics Statistics*. New York: John Wiley and Sons, Inc. London: Chapman, Hall, Ltd. pp: 468-471.
- Pandey, S. y J. E. Vargas S. 1985. La interacción genotipo-medio ambiente y su importancia en el mejoramiento Intrapoblacional en las plantas cultivadas. VII Congreso Latinoamericano de Genética. I Congreso Colombiano de Genética, Bogotá, Colombia. Pp:31-38.
- Singh, R. K. and B. D. Choudhary. 1985. *Biometrical Techniques in Quantitative Genetics and Breeding*. International Bioscience Publishers Hissar (India). Hony, General Editor: T.M. Varghese. pp: 205-214.
- Sprague, G. F. and L. A. Tatum. 1942. General vs specific combining ability in single crosses of corn. *J. Am. Soc. Agron.* 34: 923-932.
- Vasal, S. K., G. Srinivasan, S. Pandey, H. S. Córdova, G. C. Han, and F. González C. 1992. Heterotic patterns of ninety-two white tropical CIMMYT maize lines. *Maydica* 37: 259-270.
- Vasal, S. K., G. Srinivasan, G. C. Han, and F. González C. 1992. Heterotic patterns of eighty-eight white subtropical CIMMYT maize lines. *Maydica* 37: 319-327.
- Vasal, S. K., S. Mclean, F. San Vicente, and S. K. Ramanujan. 1995. Heterotic patterns and the choice testers. Overview. CIMMYT Maize Program Internally Managed External Review of Breeding Strategies and Methodologies. Briefing Documents. 45 p.
- Wellhausen, E. J. 1960. El mejoramiento de maíz en México. Avances actuales y proyecciones hacia el futuro. *Rev. Soc. Mex. Hist. Nat.* XXI (2). 15.