

# APTITUD COMBINATORIA Y HETEROSIS ENTRE LÍNEAS DE DOS

## TIPOS DE MAÍZ PARA GRANO

Gilberto Rodríguez-Pérez, Francisco Zavala-García, José Elías Treviño-Ramírez, Carmen Ojeda-Zacarías, Mariano Mendoza-Elos, Sergio Alfredo Rodríguez-Herrera y Francisco Cervantes-Ortiz

### RESUMEN

El objetivo de este estudio fue determinar la aptitud combinatoria general (ACG), la aptitud combinatoria específica (ACE) de sus cruzas, y heterosis de un dialélico formado por siete líneas de dos grupos de maíz de grano adaptadas a las condiciones climáticas de la región norte-centro de Nuevo León, México. Cinco líneas fueron de Pinto Amarillo y dos de Liebre; se formaron 21 cruzas directas y 21 cruzas recíprocas. Los datos se analizaron con el diseño 3 de Griffing. Las líneas PA-1, PA-3, L-6 y L-7 presentaron la mayor ACG en las cruzas directas y recíprocas. Las cruzas con mayor ACE para altura de planta fueron PA-1×PA-4 y PA-1×PA-3, en floración femenina fueron PA-1×PA-3 y PA-4×PA-5 y en rendimiento de grano PA-2×PA-5 y PA-4×PA-5 en las cruzas

directas y recíprocas, respectivamente. Los mayores valores de heterosis para altura de planta fueron PA-1×PA-4 y PA-1×PA-3, en floración femenina PA-4×L-7 y PA-4×L-6 y para rendimiento de grano fueron PA-1×PA-2 y PA-1×PA-3 en las cruzas directas y recíprocas, respectivamente. Las cruzas directas mostraron un efecto genético mayor de sobredominancia (2,94), varianza fenotípica (0,63) y varianza de dominancia (0,13); en las cruzas recíprocas se obtuvieron mayores valores para heredabilidad en sentido amplio (37,20%), varianza aditiva (0,08) y varianza genética (0,16). Los resultados muestran que las cruzas con valores positivos y mayores obtenidas en esta investigación podrán tener importancia en la formación de híbridos.

### Introducción

Gran parte de la diversidad genética del maíz nativo de México aún se puede encontrar en los campos agrícolas en forma de variedades criollas, ya que en sólo 23% de la superficie sembrada con maíz se utiliza semilla mejorada (Polanco, 2008). Este proceso incluye la incorporación de variedades mejoradas que son sometidas al mismo manejo que las variedades criollas, lo que da lugar a tipos adaptados localmente que los propios agricultores reconocen

como ‘acriollados’ y finalmente como ‘criollos’ (Bellon *et al.*, 2006).

En los programas de mejoramiento genético es importante conocer el tipo de acción génica involucrada en la expresión de caracteres de interés para desarrollar nuevos híbridos. Los análisis dialélicos constituyen una herramienta útil para estimar los parámetros genéticos de los progenitores y sus cruzas, mediante su aptitud combinatoria general (ACG) y aptitud combinatoria específica (ACE) que permiten definir el

método de mejoramiento genético más adecuado (Wong *et al.*, 2007), y la evaluación y selección de líneas en generaciones tempranas ( $S_3$ ) y/o generaciones avanzadas ( $S_{10}$ ) que permiten encontrar la mejor combinación híbrida para explotar la heterosis. Tradicionalmente, en estudios de cruzas de maíz se hace énfasis sólo en aptitud combinatoria general y específica y se ignoran los efectos maternos. Al respecto, Dhliwayo *et al.* (2005) y Haro *et al.* (2007), encontraron diferencias en la expresión fenotípica de las

cruzas en maíz y girasol en características como acame de tallo, resistencia a plagas, rendimiento de grano y en calidad física y química de la semilla, debido a que los patrones de herencia están controlados por efectos maternos y paternos.

El estado de Nuevo León cuenta con 29.584ha de cultivo de maíz de, de las que el 87,70% son siembras bajo condiciones de temporal con una producción promedio entre 0,63 a 1,76t·ha<sup>-1</sup>, y el 12,30% (4.150ha) se realizan bajo riego, obteniendo rendimientos

### PALABRAS CLAVE / Aptitud Combinatoria / Cruzas Directas / Cruzas Recíprocas / Heterosis / Maíz /

Recibido: 30/10/2014. Modificado: 16/11/2015. Aceptado: 03/12/2015.

**Gilberto Rodríguez-Pérez.** Ingeniero Agrónomo Fitotecnista y Maestro en Ciencias en Fito-mejoramiento, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), México. Doctor en Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), México. Profesor-Investigador, Instituto Tecnológico de Roque (ITR), México. Dirección: Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Carretera Zuazua-Marín km 17.5, Marín, Nuevo León, México.

e-mail: grodriguez263@hotmail.com

**Francisco Zavala-García.** Ingeniero Agrónomo Fitotecnista, UANL, México. Maestro en Ciencias en Mejoramiento y Genética, Colegio de Posgraduados (COLPOS), México. Ph.D. en Fisiología de Plantas. University of Nebraska, EEUU. Profesor-Investigador, UANL, México.

**José Elías Treviño-Ramírez.** Ingeniero Agrónomo Fitotecnista, UANL, México. Maestro en Ciencias en Ciencias

Agrícolas, Centro de Agronomía Tropical y Enseñanza, Costa Rica. Doctor en Ciencias Agrícolas, UANL, México.

**Carmen Ojeda-Zacarías.** Ingeniero Agrónomo Fitotecnista, Maestra en Ciencias en Producción Agrícola y Doctora en Ciencias en Biotecnología, UANL, México. Profesor-Investigador, UANL, México.

**Mariano Mendoza-Elos.** Ingeniero Agrónomo, Maestro en Ciencias en Fito-mejoramiento y Doctor en Ciencias Agrícolas, UAAAN, México.

**Sergio Alfredo Rodríguez Herrera.** Ingeniero Agrónomo Fitotecnista y Maestro en Ciencias en Fito-mejoramiento, UAAAN, México. Ph.D. en Agronomía, University of Nebraska, EEUU. Profesor-Investigador, UAAAN, México.

**Francisco Cervantes Ortiz.** Ingeniero Agrónomo Fitotecnista, Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván, México. Maestro en Ciencias en Semillas, ITR, México. Doctor en Ciencias en Producción de Semillas, COLPOS, México. Profesor-Investigador, ITR, México.

## COMBINING ABILITY AND HETEROSIS AMONG LINES OF GRAIN MAIZE

Gilberto Rodríguez-Pérez, Francisco Zavala-García, José Elías Treviño-Ramírez, Carmen Ojeda-Zacarias, Mariano Mendoza-Elos, Sergio Alfredo Rodríguez-Herrera and Francisco Cervantes-Ortiz

### SUMMARY

The aim of this study was to determine the general (GCA) and specific combining ability (SCA) of the crossings, and heterosis, of one diallelic set made up of seven lines of two groups of grain maize adapted to the climate conditions of the North-Central region of Nuevo León state, Mexico. Five lines were from Pinto Amarillo and two of Liebre maize, and 21 direct crosses and 21 reciprocal crosses were formed. Data were analyzed using a Griffing 3 design. The lines with the highest GCA were PA-1 PA-3, L-6 and L-7 in the direct and reciprocal crosses. The crosses with the highest ACE for plant height were PA-1×PA-4 and PA-1×PA-3, in female flowering were PA-1×PA-3 and PA-4×PA-5, and in grain yield were PA-

2×PA-5 and PA-4×PA-5 in the direct and reciprocal crosses, respectively. The highest heterosis values for plant height were PA-1×PA-4 y PA-1×PA-3, in female flowering were PA-4×L-7 and PA-4×L-6, and for grain yield were PA-1×PA-2 and PA-1×PA-3 in the direct and reciprocal crosses, respectively. The direct crosses showed a larger genetic effect of over-dominance (2,94), phenotypic variance (0,63) and dominance variance (0,13), while in the reciprocal crosses the highest heritability (37,20), additive variance (0,08) and genetic variance (0,16) were obtained. The results show that crosses with positive and larger values obtained in this study could be of importance for hybrid development.

## CAPACIDADE COMBINATÓRIA E HETEROSE ENTRE LINHAS DE DOIS TIPOS DE MILHO PARA GRÃO

Gilberto Rodríguez-Pérez, Francisco Zavala-García, José Elías Treviño-Ramírez, Carmen Ojeda-Zacarias, Mariano Mendoza-Elos, Sergio Alfredo Rodríguez-Herrera e Francisco Cervantes-Ortiz

### RESUMO

O objetivo de este estudo foi determinar a capacidade combinatória geral (CCG), a capacidade combinatória específica (CCE) de seus cruzamentos, e heterose de um dialélico formado por sete linhas de dois grupos de milho de grão adaptadas as condições climáticas da região norte-centro de Novo León, México. Cinco linhas foram de Pinto Amarillo e duas de Liebre; se formaram 21 cruzamentos diretos e 21 cruzamentos recíprocos. Os dados foram analisados com o desenho 3 de Griffing. As linhas PA-1, PA-3, L-6 e L-7 apresentaram a maior CCG nos cruzamentos diretos e recíprocos. Os cruzamentos com maior CCE para altura de planta foram PA-1×PA-4 e PA-1×PA-3, em floração feminina foram PA-1×PA-3 e PA-4×PA-5 e em rendimento de grão PA-2×PA-5 e PA-

4×PA-5 nos cruzamentos diretos e recíprocos, respectivamente. Os maiores valores de heterose para altura de planta foram PA-1×PA-4 e PA-1×PA-3, em floração feminina PA-4×L-7 e PA-4×L-6 e para rendimento de grão foram PA-1×PA-2 e PA-1×PA-3 nos cruzamentos diretos e recíprocos, respectivamente. Os cruzamentos diretos mostraram um efeito genético maior de sobre dominância (2,94), variação fenotípica (0,63) e variação de dominância (0,13); nos cruzamentos recíprocos se obtiveram maiores valores para herdabilidade em sentido amplo (37,20%), variação aditiva (0,08) e variação genética (0,16). Os resultados mostram que os cruzamentos com valores positivos e maiores obtidos nesta investigação podem ter importância na formação de híbridos.

promedios entre 1,46 a 5,33t·ha<sup>-1</sup> (SIAP, 2012). El promedio nacional es de 3,08t·ha<sup>-1</sup>. Las siembras se realizan con tecnología intermedia y aún son frecuentes las siembras con variedades criollas de polinización abierta como Pinto Amarillo y Liebre, que cuentan con amplia distribución, precocidad y adaptación, entre otras características. Los agricultores han estado sembrando estas variedades por más de 15 años en condiciones de temporal y refieren que sus rendimientos son de 1,0t·ha<sup>-1</sup> Zavala *et al.* (2010).

Debido a estos bajos rendimientos y a la escasez de semilla mejorada, surge la necesidad de desarrollar mejores genotipos con mayor grado de adaptación e incrementar el

rendimiento de grano, lo cual puede impactar directamente la economía de los agricultores y en un mejor abasto de semilla. Por tal motivo, el objetivo de este trabajo fue estimar la ACG y la ACE de siete progenitores en sus cruza directas y recíprocas para producción de grano, así como la heterosis con respecto a la media de sus progenitores de dos grupos germoplásmicos no emparentados genéticamente, en la expresión fenotípica y genotípica de sus cruza simples, así como sus componentes genéticos.

### Materiales y Métodos

El presente estudio se realizó en el campo experimental de la Facultad de Agronomía,

Campus Marín, carretera Zuazua-Marín km 17,5 en el Municipio de Marín, Nuevo León, México, con una altitud de 375m, 25°53'N; 100° 03'O, temperatura promedio anual sobre 22°C, y una precipitación anual promedio de 573mm (García, 1973). En los ciclos de primavera 2010, otoño 2010 y primavera 2011 se derivaron líneas obteniendo las generaciones S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> y S<sub>3</sub>, respectivamente, (Tabla I).

Las líneas de Pinto Amarillo (PA-1, PA-2, PA-3, PA-4 y PA-5) son de un ciclo intermedio, de grano amarillo semidentado y presentan buenos rendimientos, pertenecen a la raza tuxpeño norteño. Las líneas de Liebre (L-6 y L-7) tienen características de precocidad, son de grano

blanco semicristalino, tolerantes a sequía y pertenecen a la raza Ratón. En la primavera 2011 se realizaron los cruza mientos posibles entre las siete líneas, sembrándose seis surcos de cada línea, para obtener 21 cruza directas y 21 recíprocas, con el propósito de demostrar la posible presencia de efectos maternos. En otoño 2011 las 42 cruza se evaluaron bajo un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones; la parcela experimental estuvo constituida por un surco de 5m de largo y 0,80m de ancho, con 7 plantas/m para obtener una densidad de 87.500/ha. Las variables estudiadas fueron: altura de planta (AP), días a floración femenina (FF) y rendimiento de grano

TABLA I  
LÍNEAS ENDOGÁMICAS S3 DE MAÍCES UTILIZADAS  
EN EL DISEÑO DIALÉLICO EN PRIMAVERA 2011.  
NUEVO LEÓN, MÉXICO

Línea	Genealogía	Municipio de colecta
PA-1	Pinto Amarillo 24-1-5-7	Los Ramones
PA-2	Pinto Amarillo 50-1-4-3	China
PA-3	Pinto Amarillo 13-1-3-1	Mina
PA-4	Pinto Amarillo 15-1-3-3	Villaldama
PA-5	Pinto Amarillo 17-1-4-2	Bustamante
L-6	Liebre 10-1-2-1	Pesquería
L-7	Liebre 37-1-3-2	Los Ramones

(RG). Se cosecharon todas las plantas de la parcela y se pesó el grano, que posteriormente se transformó a t·ha<sup>-1</sup>, ajustándose al 15% de humedad.

Se realizó el análisis del dialélico para obtener los efectos de aptitud combinatoria general (ACG) para las líneas y aptitud combinatoria específica (ACE) para las cruzas, con base al método 3 propuesto por Griffing (1956), el cual incluye las cruzas directas y recíprocas. El modelo lineal fue

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

donde  $Y_{ijk}$ : valor fenotípico observado de la cruza ij en el bloque k,  $\mu$ : efecto verdadero de la media general,  $g_i$ : efecto de la aptitud combinatoria general de la línea i,  $g_j$ : efecto de la aptitud combinatoria general de la línea j,  $s_{ij}$ : efecto de la aptitud combinatoria específica de las líneas ij,  $\beta_k$ : efecto del k-ésimo bloque, y  $\varepsilon_{ijk}$ : error experimental. La heterosis se calculó para cada una de las variables en relación al progenitor medio y se expresó en porcentaje. Los valores se consideraron altos cuando fueron superiores al valor de la media más el error estándar ( $\mu + \sigma$ ). La fórmula que se utilizó para estimar los valores de heterosis fue

$$\text{Heterosis} = \frac{F1 - \text{progenitor medio}}{\text{progenitor medio}} \times 100$$

Los cuadrados medios y sus esperanzas del análisis de varianza fueron utilizados para obtener las estimaciones de los componentes genéticos como la varianza fenotípica ( $\delta^2F$ ), varianza genética ( $\delta^2G$ ), varianza aditiva ( $\delta^2A$ ) y varianza de dominancia ( $\delta^2D$ ), heredabilidad en sentido amplio ( $H^2$ ) y

el grado promedio de dominancia ( $\bar{d}$ ) de acuerdo a las siguientes fórmulas:

$$\delta^2G = (\text{ECM cruzas}) - (\text{ECM error}) / r$$

$$\delta^2A = 2\delta^2ACG$$

$$\delta^2D = \delta^2ACB$$

$$H^2 = \delta^2G / \delta^2F$$

$$\text{promedio de dominancia } (\bar{d}) = \sqrt{2\delta D / \delta A} \text{ y}$$

$$\delta^2F = \delta^2G + \delta^2ACE + \delta^2ACG + \delta^2\text{error}$$

## Resultados y Discusión

El análisis de varianza (Tabla II) detectó diferencias significativas ( $P \leq 0,05$ ) en cruzas directas y recíprocas para altura de planta y rendimiento de grano alto, y significancia ( $P \leq 0,01$ ) en floración femenina en las cruzas recíprocas; asimismo, se observó significancia ( $P \leq 0,05$ ) en ACG para altura de planta (AP) y rendimiento de grano (RG) en las cruzas directas y recíprocas, pero no para floración femenina (FF); en ACE hubo diferencias

altamente significativas para AP, FF y RG y significancia ( $P \leq 0,05$ ) en las cruzas directas y recíprocas, respectivamente. Estas diferencias son debidas al origen contrastante del material genético estudiado, como lo confirman los resultados obtenidos por Espinoza *et al.* (2010), quienes encontraron diferencias estadísticas en ACG y ACE en altura de planta, días a floración femenina y rendimiento de grano en cinco poblaciones de maíces nativos evaluados en el Estado de México, indicando que los efectos aditivos y no aditivos dependen del material genético utilizado, del ambiente y de las variables consideradas. Las diferencias encontradas entre cruzas directas y recíprocas en las diferentes características puede deberse a la diversidad genética de las líneas que intervienen, las primeras cinco pertenecen al grupo de Pinto Amarillo de ciclo intermedio y buen potencial de rendimiento, las otras dos son del grupo Liebre cuyas características son, tolerancia a sequía y mayor adaptabilidad.

Al respecto, Guillen-De la Cruz *et al.* (2009) encontraron que a medida que se incrementa la diversidad genética de los progenitores, se incrementan las diferencias entre sus cruzas. El análisis del presente estudio mostró que los efectos de ACE fueron de mayor expresión en las cruzas directas y recíprocas para las tres características, lo que indica la importancia de los

efectos de dominancia. Los resultados obtenidos coinciden con lo reportado por Sámano *et al.* (2009), quienes encontraron que la acción génica no aditiva (ACE) fue de mayor expresión en altura de planta, floración femenina y rendimiento de grano. Los resultados muestran que además de la variabilidad genética que se presenta en las líneas, influye en el comportamiento de las cruzas la forma de cómo participan los progenitores, ya sea como macho o como hembra, lo que coincide con lo observado por De León *et al.* (2005), quienes reportaron efectos maternos importantes en altura de planta y rendimiento de grano, al comparar las combinaciones heteróticas entre poblaciones de maíz del Caribe y del Trópico. De cualquier manera, si en una población de maíz los efectos de acción génica aditiva son más importantes que los efectos de acción génica no aditiva, se recomienda mejorar la población por selección recurrente; por el contrario, si los efectos de acción génica no aditiva son los más importantes, la población debe mejorarse por hibridación. Sin embargo, se sugiere explorar primero la varianza genética aditiva por selección y después la varianza no aditiva por hibridación (Sámano *et al.*, 2009).

## Efectos de aptitud combinatoria general

La estimación de los efectos de ACG en las cruzas directas para altura de planta, muestra que los mayores efectos significativos y positivos correspondieron a las líneas PA-1, L-6 y PA-3 con valores de 2,90, 2,45 y 0,64cm, respectivamente; las líneas PA-2, PA-4 y L-7 tuvieron efectos negativos (Tabla III); en las cruzas recíprocas los efectos positivos se presentaron en las líneas PA-3, PA-4, PA-5 L-6 y L-7; las líneas PA-1 y PA-2 mostraron valores negativos, lo cual indica que las líneas PA-1 y PA-2 dan lugar a una mayor precocidad. Para floración femenina

TABLA II  
ANÁLISIS DE VARIANZA Y NIVEL DE SIGNIFICANCIA  
DE LAS CRUZAS DIRECTAS Y RECÍPROCAS  
DEL DISEÑO 3 DE GRIFFING, OTOÑO 2011.  
NUEVO LEÓN, MÉXICO

FV	GL	AP		FF		RG	
		AxB	BxA	AxB	BxA	AxB	BxA
Rep	2	516,37	56,50	14,54	43,68	8,11	9,11
Cruzas	20	679,88*	78,09*	12,59ns	20,31**	7,04*	7,06*
ACG	6	255,64*	60,29*	7,97ns	18,44*	6,02*	8,03*
ACE	14	861,71**	85,71*	14,58**	21,11**	8,59*	7,54*
Error	40	205,06	58,82	6,92	8,29	4,02	5,01
CV (%)		10,18	6,16	4,31	4,39	16,20	14,67

FV: fuente de variación; GL: grados de libertad; CV: coeficiente de variación; ns: no significativo; \*\*: significativo 0,01; \*: significativo 0,05; AP: altura de planta; FF: floración femenina; RG: rendimiento de grano; AxB: cruza directa; BxA: cruza recíproca; Rep: repeticiones; ACG: aptitud combinatoria general; ACE: aptitud combinatoria específica.

FF, las líneas que mostraron valores positivos fueron PA-1 (1,17), PA-3 (0,17) y L-6 (0,37) en las cruza directas, mientras que en las recíprocas fueron PA-5, PA-4 y PA-1, reflejando los efectos maternos.

Los mayores efectos positivos y significativos en las cruza directas para rendimiento de grano correspondieron a las líneas PA-1 (0,97), PA-2 (0,07) y PA-3 (0,02); en las recíprocas presentaron efectos positivos las líneas PA-1 y PA-2 con 0,04 y 0,05 respectivamente. Estos resultados indican que las líneas con efectos positivos tienen una alta contribución en la expresión de rendimiento en sus progenies y que los efectos aditivos son los más importantes; asimismo, indican su capacidad de combinación al ser utilizadas como hembras o machos según sea la mejor combinación. El resto de las líneas mostraron baja capacidad de combinación, dados sus valores negativos. Estos

resultados coinciden con los obtenidos por Dhliwayo *et al.* (2005), quienes encontraron cambios en aptitud combinatoria general en líneas de maíz debido a los efectos maternos. La importancia de estos resultados es que a pesar de que las líneas de Pinto Amarillo reflejan una amplia variabilidad genética, mantienen un comportamiento similar al cambiar su participación en las cruza. Por otro lado, las líneas de Liebre fueron más sensibles al cambiar su expresión genética al ser consideradas como hembras. Lo anterior se explica por la magnitud de los valores de ACG y el cambio de signo de algunas líneas en AP, FF y RG, tanto en las cruza directas como recíprocas.

El comportamiento de las siete líneas se muestra en la Tabla IV. La línea PA-1 fue superior en las cruza directas y recíprocas para altura de planta, mientras que las líneas

L-6 y L-7 que corresponden al grupo de Liebre mostraron ser de porte más bajo. Las líneas que presentaron valores similares a la media general (169,15) y (145,99) en las cruza directas y recíprocas, respectivamente, sugieren que un porte de planta intermedio puede ser una ventaja a la resistencia al acame de raíz y tallo, así mismo toleran altas densidades de plantas por hectárea (De la Cruz *et al.*, 2010). En floración femenina las líneas de PA fueron más tardías que las de L, lo cual era de esperarse, ya que las líneas de PA son de un ciclo intermedio y las de L son más precoces; la floración osciló entre 59,44 y 63,00 días con la media de 60,99 y 61,79 días en las cruza directas y recíprocas, respectivamente. Esto indica que son de ciclo intermedio. Al respecto, De la Cruz *et al.* (2009) mencionan que es deseable encontrar líneas precoces con ~60-63 días a floración. En rendimiento de grano, las líneas de PA para las cruza directas y recíprocas mostraron mejores rendimientos que las dos líneas de L. Esto indica que dichas líneas son adecuadas para formar híbridos de alto potencial de rendimiento.

#### Efectos de aptitud combinatoria específica

Los mayores efectos en aptitud combinatoria específica (Tabla V) en las cruza directas para altura de planta se encontraron en PA-1×PA-4 (43,81), PA-3×L-6 (41,06), L-6×L-7 (38,25) y PA-4×PA-5 (35,58) y las cruza con efectos negativos fueron PA-2×PA-4 (-9,32), PA-2×PA-5 (-5,68) y PA-1×PA-3 (-4,65); en las recíprocas las cruza con efectos positivos fueron: PA-1×PA-3 (38,55), PA-2×L-6 (32,25), PA-1×PA-4 (31,73) y PA-2×PA-4 (30,32), y las que mostraron efectos negativos fueron PA-5×L-7 (-13,87), PA-4×L-7 (-4,82) y

PA-1×L-6 (-3,93). Al respecto, se considera conveniente contar con materiales de porte bajo, los que tienen efectos negativos ya que son tolerantes a altas densidades de planta por hectárea, sin descuidar que existe la relación positiva de altura de planta con el potencial de rendimiento de grano (De la Cruz-Lázaro *et al.*, 2010).

Para floración femenina las cruza directas que presentaron los valores más altos y positivos fueron: PA-1×L-6 (3,22), PA-3×PA-4 (2,82), PA-4×L-6 (2,15) y PA-1×PA-4 (1,49), y las cruza con efectos negativos se presentaron en PA-4×L-7 (-3,31), PA-2×L-7 (-2,64) y PA-2×PA-4 (-2,11); en las recíprocas los efectos positivos fueron en PA-1×PA-5 (4,15), PA-1×PA-4 (3,82), PA-4×L-6 (1,48) y la PA-4×PA-5 (1,08), mientras que los negativos se presentaron en las cruza PA-2×PA-4 (-1,38), PA-2×PA-3 (-2,64) y PA-5×L-6 (-3,71). Es evidente que la mayor diferencia entre las cruza se encontró en las líneas de PA, que tienden a ser más tardías que las líneas de L. Sólo ocho (30,09%) y nueve (42,85%) de los cruzamientos directos y recíprocos presentaron valores positivos, respectivamente.

En rendimiento de grano la mayoría de las cruza directas mostraron valores positivos (71%) y (52%) en las recíprocas. Los mayores efectos de ACE se presentaron en los cruzamientos directos en PA-2×PA-5 (0,15), L-6×L-7 (0,13), PA-4×L-7 (0,12) y PA-1×PA-2 (0,12), y en las recíprocas fueron en PA-4×PA-5 (0,16), L-6×L-7 (0,15), PA-3×L-7 (0,14) y PA-1×PA-3 (0,13). Los mayores valores de ACE para estas cruza de deben a los rendimientos superiores que presentaron las líneas PA-2, PA-4 y PA-5 o en la combinación de una línea con efectos mayores o negativos de ACG. Este resultado sugiere que la expresión de alto rendimiento de grano en las cruza es debido a la acción génica de efectos aditivos de las líneas, como lo aseveran Reyes *et al.* (2004) y Wong *et al.* (2007).

TABLA III  
EFECTOS DE APTITUD COMBINATORIA GENERAL (ACG) DE CINCO LÍNEAS DE PINTO AMARILLO (PA) Y DOS DE LIEBRE (L) PARA AP, FF Y RG EVALUADAS EN OTOÑO 2011

Línea	AP		FF		RG	
	A×B	B×A	A×B	B×A	A×B	B×A
PA-1	2,90	-5,36	1,17	0,97	0,05	0,04
PA-2	-1,17	-6,47	-0,09	-1,02	0,07	0,05
PA-3	0,64	5,22	0,17	-0,69	0,02	-0,01
PA-4	-3,84	2,37	-0,02	1,10	0,05	-0,05
PA-5	-0,73	1,33	-0,36	1,23	-0,03	-0,05
L-6	2,45	3,15	0,37	-0,56	-0,02	-0,03
L-7	-0,24	5,74	-1,22	-1,02	-0,06	-0,02

AP: altura de planta, FF: floración femenina, RG: rendimiento de grano, A×B: cruza directas, B×A: cruza recíprocas.

TABLA IV  
COMPARACIÓN DE MEDIAS DE CARACTERÍSTICAS AGRONÓMICAS DE CINCO LÍNEAS DE PINTO AMARILLO Y DOS DE LIEBRE EVALUADAS EN OTOÑO 2011

Línea	AP		FF		RG	
	A×B	B×A	A×B	B×A	A×B	B×A
PA-1	172,58 a	155,96 a	61,44 a	61,58 bc	4,50 ab	4,19 e
PA-2	169,04 b	141,41 d	60,67 b	61,50 bc	4,63 a	4,21 e
PA-3	170,04 b	154,58 b	60,94 ab	63,00 a	4,48 ab	3,29 d
PA-4	169,00 bc	151,37 c	61,11 ab	62,11 b	4,62 a	4,51 b
PA-5	168,50 c	150,21 c	61,27 ab	62,77 a	4,63 a	4,72 a
L-6	167,80 dc	133,25 e	59,88 c	60,88 c	3,31 d	3,28 d
L-7	167,08 cd	135,17 ef	59,44 c	60,71 c	3,42 c	3,80 c
Media	169,15	145,99	60,69	61,79	4,23	3,95
DMS (0,05)	3,66	16,67	1,90	3,35	1,45	1,21

AP: altura de planta, FF: floración femenina, RG: rendimiento de grano, A×B: cruza directas, B×A: cruza recíprocas.

De los seis progenitores que intervinieron en las cruzas con los mayores efectos de ACE, las poblaciones PA-1 y PA-2 mostraron efectos positivos de

ACG para rendimiento de grano. Al respecto, se espera que las cruzas con mayor ACE resulten al cruzar al menos dos poblaciones con alta ACG

(Reyes *et al.*, 2004). En el presente estudio se encontró que progenitores con efectos bajos o negativos de ACG produjeron cruzas con alto rendimiento de grano. Resultados similares fueron obtenidos por Guillen-De la Cruz *et al.* (2009) al cruzar progenitores con ACG negativa y obtener cruzas con altos valores de ACE. Las cruzas con los mayores valores de ACE pueden ser consideradas en programas de mejoramiento genético para formar híbridos.

PA-4×L-7 (8,34%), PA-3×PA-4 (3,51%) y PA-1×PA-4 (2,16%), y en las recíprocas se presentaron en PA-4×L-6 (12,20%), PA-5×L-6 (9,58%) y PA-1×PA-5 (7,06%). En ambos casos (directos ó recíprocos) el mayor valor estuvo en una cruz entre líneas de PA y L.

Las cruzas más precoces encontradas en este estudio no fueron las de mayor heterosis, que es lo que se espera. Esto indica que al cruzarse las líneas tengan buena combinación entre ellas con características particulares como precocidad, resistencia al acame y sequía. Al respecto, De La Cruz *et al.* (2010) reportan que las líneas endogámicas precoces (60 días de floración) son deseables para tolerancia a sequía principalmente pero ello dependerá de la constitución genética de cada línea y de la diversidad de origen de éstas.

En rendimiento de grano, de las 21 cruzas directas, 19 (90,47%) tuvieron heterosis positivas, sobresaliendo PA-1×PA-2 (22,44%), PA-1×L-7 (22,34%), PA-2×PA-5 (19,12%) y L-6×L-7 (18,39%). Estos valores son superiores a las heterosis de 18,2% reportadas para maíces de valles altos (De la Cruz *et al.*, 2010). Los resultados coinciden con los de De la Rosa *et al.* (2006), quienes observaron que a mayor heterosis en rendimiento de grano las cruzas mostraron mayores valores en la ACE, debido a la acción génica de los efectos no aditivos de las líneas, lo que indica que la heterosis no es totalmente controlada por genes dominantes, sino que también es controlada por genes no aditivos. Esta comparación señala que el valor de heterosis no es siempre un indicador de potencial de rendimiento de una cruz; es decir, que los valores altos de heterosis no siempre corresponden a valores altos de rendimiento. En las cruzas recíprocas las mayores heterosis se presentaron en PA-1×PA-3 (49,16%) a pesar de que los dos progenitores son de PA (tal vez estos valores se debieron a que las líneas tienen diferente información genética); el segundo, tercer y cuarto lugar fueron

#### Efectos de heterosis

Al estimar la heterosis para altura de planta (Tabla VI) los valores más altos y positivos en los cruzamientos directos fueron en PA-1×PA-4 con 26,50%, PA-3×L-7 (25,16%) y PA-1×L-6 (24,48%), mientras que los valores negativos se presentaron en PA-2×PA-5 (-3,62%) y L-6×L-7 (-2,35%); en las cruzas recíprocas los valores positivos fueron en PA-1×PA-3 (33,43%), PA-2×L-6 (27,27%) y PA-3×L-6 (23,41%), y los valores negativos los mostraron PA-1×PA-5 (-9,59%) y PA-5×L-7 (-1,02%). Esto indica que la heterosis no es totalmente controlada por genes dominantes, sino que también es controlada en cierto grado por genes no aditivos. Estos resultados coinciden con lo reportado por Morales *et al.* (2007), quienes mencionan que los mayores valores de heterosis corresponden a las mayores efectos de ACE. Al respecto, De La Cruz *et al.* (2010) mencionan que es deseable contar con materiales de porte bajo como es el caso de este estudio, al encontrarse valores negativos en las cruzas directas (PA-2×PA-5 y L-6×L-7), en las cruzas recíprocas fueron PA-1×PA-5 y PA-5×L-7, ya que las líneas que involucran estas cruzas pueden tolerar altas densidades de plantas por hectárea y resistir al acame de raíz y tallo.

En relación a floración femenina, la heterosis osciló entre -9,04 y 8,38%, y entre -8,24 y 12,20% para las cruzas directas y recíprocas, respectivamente; las cruzas directas con heterosis positivas fueron

TABLA V  
EFECTOS DE APTITUD COMBINATORIA ESPECÍFICA DE 21 CRUZAS DIRECTAS (A×B) Y 21 RECÍPROCAS (B×A), POR APAREAMIENTO DE CINCO LÍNEAS DE PINTO AMARILLO Y DOS DE LIEBRE PARA TRES CARACTERÍSTICAS AGRONÓMICAS EVALUADAS EN OTOÑO 2011

Cruza	AP		FF		RG	
	A×B	B×A	A×B	B×A	A×B	B×A
PA-1×PA-2	5,52	8,01	0,21	-1,03	0,12	0,06
PA-1×PA-3	-4,65	38,55	-1,32	-1,32	0,02	0,13
PA-1×PA-4	43,81	31,73	1,49	3,82	0,04	-0,02
PA-1×PA-5	7,09	15,82	-1,44	4,15	0,02	0,03
PA-1×L-6	13,76	-3,93	3,22	-1,04	0,01	0,09
PA-1×L-7	20,15	11,92	-0,91	0,76	0,03	-0,09
PA-2×PA-3	12,73	17,29	-0,91	-2,64	0,09	0,12
PA-2×PA-4	-9,321	30,32	-2,11	-3,71	0,08	0,05
PA-2×PA-5	-5,68	14,12	-1,98	0,96	0,15	0,08
PA-2×L-6	20,79	32,25	0,16	-0,24	-0,22	-0,05
PA-2×L-7	2,46	10,69	-2,64	-0,71	-0,12	-0,16
PA-3×PA-4	7,88	18,69	2,82	0,64	-0,05	-0,08
PA-3×PA-5	20,77	21,73	-0,31	-1,04	-0,18	-0,14
PA-3×L-6	41,06	-0,05	0,62	-0,98	-0,04	-0,15
PA-3×L-7	0,06	11,02	-0,79	-0,51	0,06	0,14
PA-4×PA-5	35,58	27,25	-0,79	1,08	0,06	0,16
PA-4×L-6	6,36	26,43	2,15	1,48	0,08	-0,03
PA-4×L-7	26,55	-4,82	-3,31	0,09	0,12	0,09
PA-5×L-6	32,25	10,47	-0,58	-1,38	0,05	-0,03
PA-5×L-7	8,29	-13,87	-0,96	-0,91	-0,12	-0,13
L-6×L-7	38,25	20,13	0,29	0,28	0,13	0,15

AP: altura de planta, FF: floración femenina, RG: rendimiento de grano, A×B: cruzas directas, B×A: cruzas recíprocas.

TABLA VI  
EFECTOS DE HETEROSIS DE LAS 21 CRUZAS DIRECTAS (A×B) Y RECÍPROCAS (B×A) FORMADAS POR EL APAREAMIENTO DE SIETE LÍNEAS PARA AP, FF Y RG EVALUADAS EN OTOÑO 2011

Cruza	AP		FF		RG	
	A×B	B×A	A×B	B×A	A×B	B×A
PA-1×PA-2	12,21	5,28	-4,83	3,57	22,44	33,59
PA-1×PA-3	11,88	33,43	-1,63	0,03	16,72	49,16
PA-1×PA-4	26,25	9,06	2,16	-3,99	7,48	32,50
PA-1×PA-5	8,05	-9,59	-5,88	7,06	15,67	34,67
PA-1×L-6	24,48	3,87	-9,04	-2,13	12,50	38,46
PA-1×L-7	12,76	7,87	-2,96	-1,34	22,34	5,84
PA-2×PA-3	18,75	5,35	0,23	0,85	14,46	41,76
PA-2×PA-4	15,92	2,35	-3,29	-8,24	12,88	23,02
PA-2×PA-5	-3,62	8,13	-2,47	-3,87	19,12	31,59
PA-2×L-6	11,36	27,27	-0,28	-0,08	-6,87	20,15
PA-2×L-7	22,24	6,99	0,83	-0,55	7,23	-2,56
PA-3×PA-4	4,52	14,39	3,51	-2,91	10,76	22,05
PA-3×PA-5	12,25	16,14	-0,54	-0,53	-0,64	20,80
PA-3×L-6	15,01	23,41	0,26	2,70	2,19	18,07
PA-3×L-7	25,16	22,68	0,82	1,36	15,79	21,50
PA-4×PA-5	21,59	19,15	0,25	4,67	15,36	33,57
PA-4×L-6	2,50	19,06	-1,86	12,20	13,12	17,56
PA-4×L-7	21,85	-0,83	8,34	-1,60	17,10	10,22
PA-5×L-6	18,14	8,22	-3,19	9,58	8,63	22,96
PA-5×L-7	5,31	-1,02	-1,89	-1,34	5,37	-2,32
L-6×L-7	-2,35	23,18	0,26	0,26	18,39	14,66

AP: altura de planta, FF: floración femenina, RG: rendimiento de grano, A×B: cruzas directas, B×A: cruzas recíprocas.

TABLA VII  
COMPONENTES DE  
VARIANZA,  
HEREDABILIDAD EN  
SENTIDO AMPLIO Y  
GRADO PROMEDIO DE  
DOMINANCIA DE  
RENDIMIENTO DE GRANO

Componente genético	Valor estimado en las cruzas	
	A×B	B×A
$\delta^2 F$	0,63	0,43
$\delta^2 G$	0,06	0,16
$\delta^2 A$	0,03	0,08
$\delta^2 D$	0,13	0,12
H <sup>2</sup>	9,52	37,20
d	2,94	1,73

$\delta^2 F$ : varianza fenotípica,  $\delta^2 G$ : varianza genética,  $\delta^2 A$ : varianza aditiva,  $\delta^2 D$ : varianza de dominancia, H<sup>2</sup>: heredabilidad en sentido amplio, d: grado promedio de dominancia.

obtenidos por las cruzas PA-2×PA-3 (41,76%), PA-1×L-6 (38,46%) y PA-1×PA-5 (34,67%), como era de esperarse, porque las líneas involucradas en las cruzas son del grupo de PA, cuyas características son de mayor rendimiento y por tanto, se puede suponer que las líneas involucradas tienen diversidad genética. Al respecto, Dzib *et al.* (2011) mencionan que la diversidad genética entre dos poblaciones está relacionada con la heterosis, pero la carencia de ésta no necesariamente resulta de una falta de diversidad genética.

Al estimar los componentes de varianza, heredabilidad y grado promedio de dominancia (Tabla VII) se puede notar que la varianza aditiva fue muy pequeña (Preciado *et al.*, 2005); en consecuencia, la heredabilidad y el grado de dominancia fueron mayores en las cruzas recíprocas. Estos resultados se atribuyen a la diversidad en la constitución genética de las líneas, que al aparearse forman individuos de tipo heterocigótico, lo que reduce los efectos aditivos. Por tal razón, es de suponerse que todas las variaciones están estimadas con base en el componente genético determinado como varianza de dominancia, lo cual es de esperarse puesto que existe una marcada expresión heterótica

en los híbridos por efecto de la ACE de la mayoría de las líneas, dando como resultado un valor muy alto de heredabilidad en el sentido amplio, por efecto de la varianza de dominancia.

Estos efectos también pueden deberse a que un mismo grupo de genes no controlan todas las respuestas de los componentes genéticos, como lo señalan Springer y Stupar (2007), o a factores hereditarios como la aditividad, la dominancia y la sobredominancia, como lo señalan Lippman y Zamir (2007). Es probable que las líneas L-6, L-7 y PA-5, que obtuvieron baja ACG, produzcan cruzas sobresalientes. Al respecto, Alemón *et al.* (2012) encontraron que líneas con buenos efectos de ACG al cruzarse con líneas de bajos efectos de ACG produjeron buenos híbridos, lo que se puede deber al efecto de dominancia. Sobre esto mismo De la Cruz *et al.* (2003) encontraron que en las mejores cruzas participaron padres con bajos efectos de ACG. En este estudio las líneas PA-1, PA-2, PA-3 y PA-4 presentaron valores altos y positivos de ACG; mientras que la ACE fue alta y positiva para las cruzas PA-2×PA-5, PA-1×PA-2 y PA-4×L-7 en las cruzas directas, y PA-4×PA-5 y PA-3×L-7 en las recíprocas, donde las variables altura de planta y floración femenina influyeron en el rendimiento de grano. La varianza aditiva, varianza genética, heredabilidad en sentido amplio resultaron con valores más altos que en las cruzas recíprocas para las variables evaluadas, mientras que la sobredominancia y varianza fenotípica y varianza de dominancia mostraron valores más altos en las cruzas directas. Con base en las cruzas superiores, las variables evaluadas altura de planta, floración femenina y rendimiento de grano serán de utilidad para producir buenos híbridos.

### Conclusiones

Se detectó variabilidad entre las líneas de Pinto Amarillo

en los cruzamientos directos y recíprocos, atribuida principalmente por los efectos de ACG para rendimiento de grano. Las líneas PA-1, PA-3, L-6 y L-7 presentaron mayores efectos aditivos en altura de planta; en floración femenina y rendimiento de grano fueron las líneas PA-1, PA-2, PA-4 y PA-5. Las cruzas directas más sobresalientes por su aptitud combinatoria específica fueron PA-1×PA-4, PA-1×L-6 y PA-2×PA-5; en las recíprocas PA-1×PA-3, PA-1×PA-5 y PA-4×PA-5 para altura de planta, floración femenina y rendimiento de grano, respectivamente. Las cruzas directas con mayor heterosis se presentaron en PA-1×PA-4, PA-4×L-7 y PA-1×PA-2, mientras que en las recíprocas fueron PA-1×PA-3 y PA-4×L-6 para altura de planta, floración femenina y rendimiento de grano, respectivamente. Se detectaron efectos maternos y la diversidad genética entre grupos de maíz no se reflejó en el comportamiento en los cruzamientos. Las cruzas directas mostraron mayor grado de dominancia, varianza fenotípica y varianza de dominancia, y las cruzas recíprocas obtuvieron mayor varianza genética, varianza aditiva y heredabilidad.

### REFERENCIAS

Bellon MR, Adato MJ, Becerril JD, Mindek D (2006) Poor farmers perceived benefits from different types of maize germplasm. The case of creolization in lowland tropical México. *World Devel.* 34: 113-129.

De la Cruz LL, Ron PJ, Ramírez DJL, Sánchez GJJ, Morales RMM, Chuela BM Hurtado PSA, Mena MS (2003) Heterosis y aptitud combinatoria entre híbridos comerciales y germoplasma exótico de maíz en Jalisco, México. *Rev. Fitotec. Mex.* 26: 1-10.

De la Cruz LE, Córdoba EHO, Estrada MAB, Mendoza JDP, Gómez AV, Brito NPM (2009) Rendimiento de grano en genotipos de maíz sembrados bajo tres densidades de población. *Univ.Ciencia.* 25: 93-98.

De la Cruz LE, Castañón NG Brito MNP, Gómez VA, Robledo TV, Lozano JA (2010) Heterosis y aptitud combinatoria de

poblaciones de maíz tropical. *Phyton* 79: 11-17.

De León CH, Reyes SH, Sámano CDG, Martínez GGZ, Cavazos RC, Figueroa JDC (2005) Potencial de rendimiento y estabilidad de patrones heteróticos de maíz formados entre cinco grupos germoplásmicos. *Rev. Fitotec. Mex.* 28: 135-143.

De la Rosa LA, De León HC, Rincón FS, Martínez GZ (2006) Efectos genéticos, heterosis y diversidad genética entre híbridos comerciales de maíz adaptados al bajo mexicano. *Rev. Fitotec. Mex.* 29: 247-254.

Dhliwayo T, Pixley K, Kazembe V (2005) Combining ability for resistance to maize weevil among 14 Southern African maize inbred lines. *Crop. Sci.* 45: 662-667.

Dzib ALA, Segura CJC, Ortega PR, Latournerie LM (2011) Cruzas dialélicas entre poblaciones nativas de Yucatán y poblaciones mejoradas. *Trop. Subtrop. Agroecosyst.* 14: 119-127.

Espinoza TE, Mendoza CMC, Castillo GF, Ortiz CJ, Delgado AA (2010) Aptitud combinatoria del rendimiento de antocianinas y de características agronómicas en poblaciones nativas de maíz pigmentado. *Rev. Fitotec. Mex.* 33: 11-19.

García E (1973) *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*. [http://cdigital.dgb.uanl.mx/la/1020081042/1020081042\\_011.pdf](http://cdigital.dgb.uanl.mx/la/1020081042/1020081042_011.pdf) (Cons. 10/11/2013).

Guillen-de la Cruz PE, De la Cruz LG, Castañón NR, Osorio ONP, Brito MA Lozano-del Río JA, López UN (2009) Aptitud combinatoria general y específica de germoplasma tropical de maíz. *Trop. Subtrop. Agroecosyst.* 10: 101-107.

Griffing B (1956) Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing system. *Austr. J. Biol. Sci.* 9: 463-493.

Haro RPA, García, MCJ, Reyes HV (2007) Determinación materna del contenido de aceite en semillas de girasol. *Rev. Fitotec. Mex.* 30: 39-42.

Lippman ZB, Zamir D (2007) Heterosis: revisiting the magic. *Trends Genet.* 23: 60-66.

Morales RMM, Ron JP, Sánchez JJG, Ramirez JLD, De la Cruz

- EL, Mena SM, Hurtado PS, Chuela MB (2007) Relaciones fenotípicas entre híbridos comerciales y germoplasma exótico de maíz en Jalisco. México. *Rev. Fitotec. Mex.* 30: 285-294.
- Palemón AF, Gómez MNO, Castillo GF, Ramírez VP, Molina GJD, Miranda CS (2012) Potencial productivo de cruzas intervarietales de maíz en la región semicálida de Guerrero. *Rev. Mex. Cs. Agríc.* 3: 157-171.
- Polanco F (2008) *Bases para una Política de Innovación de la Cadena de Valor del Maíz*. Foro Consultivo Científico y Tecnológico. México. 244 pp.
- Preciado OER, Terrón ADI, Gómez NOM, Robledo EIG (2005) Componentes genéticos en poblaciones heteróticamente contrastantes de maíz de origen tropical y subtropical. *Agron. Mesoamer.* 16: 145-151.
- Reyes LD, Molina JDG, Oropeza MAR, Moreno ECP (2004) Cruzas dialélicas entre líneas autofecundadas de maíz derivadas de la raza tuxpeño. *Rev. Fitotec. Mex.* 27: 49-56.
- Sámamo GD, Rincón FS, Ruiz NAT, Espinoza VJ, De León HC (2009) Efectos genéticos en cruzas directas y recíprocas formadas a partir de líneas de dos grupos germoplásmicos de maíz. *Rev. Fitotec. Mex.* 32(3): 67-74.
- SIAP (2012) *Avance de Siembras y Cosechas en el Estado de Nuevo León*. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. [www.siap.sagarpa.gob.mx](http://www.siap.sagarpa.gob.mx) (Cons. 26/06/2013).
- Springer NM, Stupar RM (2007) Allelic variation and heterosis in maize: How do two halves make more than a whole? *Genome Res.* 17: 264-275.
- Wong RR, Gutiérrez RE, Palomo EGA, Rodríguez SH, Córdoba HO, Espinoza BA, Lozano JIG (2007) Aptitud combinatoria de componentes del rendimiento el líneas de maíz para grano en la comarca lagunera, México. *Rev. Fitotec. Mex.* 30(2):181-189.
- Zavala GF, Salinas GEG, Piñera FJ (2010) *Conocimiento de la Diversidad y Distribución Actual del Maíz en Nuevo León*. Informe Final. CONABIO. Universidad Autónoma de Nuevo León. 150 pp.