

Aptitud combinatoria de líneas de maíz QPM de dos grupos heteróticos del CIMMYT en la búsqueda de híbridos de cruce simple para la zona tropical y subtropical de México

Salvador Mena Munguía, Mario Abel García Vázquez, J. Jesús Sánchez González, Florencio Recendiz Hurtado, José Ron Parra, Norberto Carrizales Mejía y Rogelio Lepiz Ildelfonso

Departamento de Producción Agrícola. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Guadalajara. 45110, Zapopan, Jalisco, México.

Resumen: El consumo humano de maíz en México es de cerca de 150 kg per capita, sin embargo aproximadamente 31.2% de la población padece desnutrición, por lo tanto es importante incrementar la calidad nutricional de el grano de maíz a través de alternativas como el gen opaco-2 modificado ó QPM a la vez que se puedan desarrollar híbridos con alto rendimiento para las áreas tropicales y subtropicales de México. Los objetivos del presente trabajo fueron i) determinar la ACG de 14 líneas QPM tropicales de CIMMYT y ii) encontrar las mejores cruza simples a través de su aptitud combinatoria específica. Se utilizaron dos grupos de líneas provenientes del Centro Internacional de mejoramiento en maíz y trigo (CIMMYT); 5 del grupo heterotico "A" y 9 del grupo heterotico "AB" , el diseño II de Carolina del Norte se usó para definir su ACG, las cruza para el diseño se sembraron en un diseño bloques al azar con dos repeticiones en 6 localidades (3 en México, 1 en Guatemala, 1 en la India y 1 en Colombia) en el ciclo agrícola 2002B. Se aplicó análisis de varianza combinado a través de 6 localidades mediante el paquete estadístico SAS considerando ambientes y repeticiones como efectos aleatorios y los genotipos como efectos fijos. Hay 10 cruza simples con rendimiento similar a los mejores testigos de grano normal a través de las localidades de prueba. Se encontraron 2 líneas con alta ACG; la línea 1 con 0.538 y la línea 11 con 0.717 que pueden ser usadas en programas de formación de híbridos QPM. Las mejores cruza simples pueden ser usadas como híbridos per-se o estimar las mejores cruza dobles.

Abstract: Human consumption of maize in Mexico is about 150 kg-per capita; however, approximately 31.2% of the population suffers from malnutrition. Hence, it may be important to increase the nutritional quality of the maize grain by means of a cross strategy such as using opaco-2 modified gene or QPM (quality protein maize), while at the same time increasing the yield of high hybrids in tropical and subtropical regions in Mexico. The objectives of this study were: 1) to determine the general combinatorial ability (GCA) of 14 CIMMYT tropical QPM lines and 2) to detect the best single crosses for specific combinatorial ability (GCE): Two line groups originating from the International Center of Maize and Wheat Improvement (CIMMYT) were utilized: five from the heterotic group "A", and nine from the heterotic group "AB". North Carolina's Design II was used to determine its ACG. In the agricultural cycle 2002-B, the crosses for design were sown in random blocks with two repeats in six locations (3 in Mexico, 1 in Guatemala, 1 in India and 1 in Colombia). An analysis of the combined variance was made for the six locations by means of the SAS statistical program, considering environment and repeats as random effects and genotypes as fixed effects. There are 10 single crosses with the same yield as the best grain across the test locations. Two lines were identified with a high GCA, line 1 with 0.538 and line 11 with 0.717, and can be used for QPM hybrid performance programs. The best single crosses can be used as hybrids per se or to estimate the best double crosses.

Introducción

El consumo per cápita de maíz en México es de 150 kg al año y si a esto se agrega que 31.2 millones de Mexicanos sufren de desnutrición que va desde moderada hasta severa (SAGARPA 1999), por lo cual es necesario mejorar la calidad nutricional de los alimentos que consume. Por tanto, la formación de híbridos de maíz de alta calidad de proteína QPM con buen rendimiento y características deseables para las regiones tropicales y subtropicales de México permitirá sustituir gradualmente a las variedades actuales de maíz.

Para lograr lo anterior es menester contar con híbridos de maíz QPM de buen rendimiento y adaptación a las zonas tropicales y subtropicales de México mismos que es factible obtener a partir de los grupos heteróticos de líneas identificadas por el CIMMYT. El proceso contempla estimar la aptitud combinatoria general de las 14 líneas de maíz QPM seleccionadas para ser usadas como progenitores de los híbridos deseables e identificar las mejores cruza simples de maíz QPM por medio de la aptitud combinatoria específica, se parte de dos hipótesis; que existe diferencia para los efectos de aptitud combinatoria general entre las líneas de maíz evaluadas, así como para los efectos de aptitud combinatoria específica en las cruza simples formadas y que es factible seleccionar híbridos de maíz

con alta calidad de proteína, rendimiento de grano y características agronómicas superiores a los testigos regionales en diferentes ambientes, mediante la metodología utilizada.

Mertz y col. (1963) consignan que el maíz de alta calidad de proteína ó QPM (por sus siglas en inglés; Quality Protein Maize) tiene su origen en el descubrimiento del denominado maíz Opaco-2 (O₂), mutante de endospermo que se correlaciona con el incremento en los niveles de Lisina y Triptófano.

Duddley y colaboradores (1977) explican que el esquema empleado para la incorporación de los genes modificadores a maíces con alto contenido de proteína fue la selección interpoblacional por endospermo duro en poblaciones convertidas a opaco-2, posteriormente, por medio de selecciones adicionales, sistematizadas y monitoreadas de laboratorio se logró obtener una frecuencia estable de genes modificadores que no afectan al gen opaco-2, finalmente esta estrategia permitió obtener familias de apariencia cristalina aceptable de acuerdo con su contenido de proteína y triptófano.

Por otro lado, la aptitud combinatoria se define como "el comportamiento relativo de líneas ó variedades usadas como progenitores" (Allard 1975, Brauer 1981 y Robles 1982). Este comportamiento puede ser específico ó general. El primero se evalúa por la capacidad de rendimiento de cada una de las cruza así como por el

Cuadro 1. Líneas que integran los grupos heteróticos participantes en el estudio.

Líneas del grupo heterótico "A"	Líneas del grupo heterótico "AB"
L1. (CML147 x CL-RCW01)-B-4-1	L8. (CLQ-6203 x CL-04321)-B-10-1
L2. (CML147x CL-RCW01)-B-10-2	L9. (CLQ-6203 x CL-04321)-B-15-1
L3. (CML147x CL-RCW01)-B-39-1	L10. (CLQ-6203 x CL-04321)-B-18-1
L4. (CML147xCL-RCW01)-B-61-2	L11. (CLQ-6203 x CL-04321)-B-21-1
L5. (CML173 x CL-RCW01)-B-15-3	L12. (CLQ-6203 x CL-04321)-B-23-1
	L13. (CLQ-6203 x CL-04321)-B-24-1
	L14. (CLQ-6203 x CL-04321)-B-26-3
	L15. (CLQ-6203 x CL-04321)-B-7-1
	L16. (CLQ-6203 x CL-04374)-B-7-2

potencial de cada combinación híbrida en particular. Y el segundo se mide por el promedio de rendimiento de una línea o variedad al aparearse con varias otras.

Sprague y Tatum (1942) clasifican dicha aptitud en general y específica y establecen que el término de aptitud combinatoria general (ACG) se usa para designar el comportamiento promedio de una línea en diferentes combinaciones híbridas, mientras que el término de aptitud combinatoria específica (ACE) es para aquellos casos en los cuales ciertas combinaciones son relativamente mejores o peores de lo que se esperaría en el comportamiento promedio de las líneas involucradas.

Materiales y métodos

El material genético que se utilizó en el presente trabajo fue proporcionado por el Centro Internacional de Mejoramiento en Maíz y Trigo (CIMMYT) y consistió en dos grupos de líneas pertenecientes a grupos heteróticos complementarios, las líneas fueron derivadas a partir de la generación F₂ de cruza entre líneas elite QPM × líneas elite normales.

En el cuadro 1 se enlistan las líneas derivadas por reciclaje, por selección genealógica y elegidas para el presente trabajo.

Las cruza simples formadas mediante el diseño genético II se evaluaron

en seis localidades (tres en México; Veracruz, Puebla, Jalisco y tres en otros países; Turipana en Colombia, Cuyutla en Guatemala y Nueva Delhi en la India) (P/V 2002-2002). Se evaluaron las variables; rendimiento de grano, altura de planta y mazorca, días a floración masculina y femenina, mazorcas por planta y asincronía de la floración (ASI). La estimación de los efectos de aptitud combinatoria general y específica se realizó de acuerdo a lo establecido por Comstock y Robinson (1948) donde los componentes de la varianza observables (δ^2_m , δ^2_h y δ^2_{mh}) se determinan mediante la siembra de las progenies en diseño experimental y en función de los cuadrados medios esperados, tal como se muestra en el cuadro 2. El modelo de análisis de varianza es con efectos aleatorios para machos y hembras.

Resultados y discusión

En el cuadro 3 se presenta el análisis de varianza combinado de los seis experimentos, para las ocho variables, ahí se puede apreciar un nivel alto de significancia para las diferencias entre las cruza probadas, en cuatro de las variables de estudio, lo cual confirma las diferencias genéticas entre cruza. Los ambientes presentaron diferencia significativa para todas las variables estudiadas en siete de ellas al nivel de 1%. En lo que concierne a la interacción cruza × ambientes solo el

Cuadro 2. Análisis de varianza del diseño II de Carolina del Norte en una localidad.

Fuente de variación	G.L.	C. M.	Esperanza de C. M.
Repeticiones	(r-1)		
Machos	(m-1)	M ₄	$\delta^2 + r \delta^2_{fm} + rf \delta^2_m$
Hembras	(f-1)	M ₃	$\delta^2 + r \delta^2_{fm} + rm \delta^2_f$
Machos x Hembras	(m-1)(f-1)	M ₂	$\delta^2 + r \delta^2_{fm}$
Error	(r-1)(mf-1)	M ₁	δ^2
Total	(rmf-1)		

r, m y f se refieren al número de repeticiones, machos y hembras, respectivamente.

δ^2_{mf} = varianza de machos × hembras; δ^2_m = varianza de machos; δ^2_f = varianza de hembras y δ^2 = varianza del error combinado.

Cuadro 3. Cuadrados medios del ANOVA combinado para cada una de las variables de estudio a través de seis localidades, primavera-verano 2002.

F.V.	REND	AP	AM	FM	FF	M/P	ASI
Cruzas	3.1 **	868.5 **	1701.4 **	8.0 **	8.4 NS	0.12 NS	1.15 NS
Repeticiones	8.7 **	4113.1 **	1625.7 NS	16.4 *	35.9 **	0.11 NS	5.47 **
Ambientes	137 **	151134 **	74133 **	3618 **	4482 **	0.22 *	94.4 **
A × C	1.5 **	190.2 NS	1391.7 NS	2.2 **	1.6 NS	0.10 NS	0.91 NS
C. V.	19.5	6.0	34.9	2.1	2.2	31.5	8.6

F.V. = Fuente de Variación; REND = Rendimiento de grano; AP = Altura de planta; AM = Altura de mazorca; FM = Días a floración masculina; FF = Días a floración femenina; M/P = Mazorcas por planta; ASI = Asincronía de la floración; * = Significativo al 5%; ** = Significativo al 1%; NS = No Significativo.

rendimiento de grano y los días a floración masculina exhibieron diferencias significativas al 1%.

Al aplicarse la prueba de comparación múltiple de medias (DMS al 5 %) para identificar las mejores cruzas para la variable rendimiento de grano (cuadro 4) permitió definir un grupo de 18 cruzas como las más destacadas, la lista incluye 8 testigos y 10 cruzas que forman parte del Diseño II.

La cruz (L1 × L11) fue la que mostró el rendimiento de grano más alto (6.77 ton/ha), pero fue estadísticamente, igual al resto del grupo. Cabe destacar que la línea 11, y la línea 1 participan en tres y cuatro de las mejores diez cruzas, respectivamente.

Al analizar las medias de las características agronómicas de los mejores tratamientos para rendimiento de grano (cuadro 4) se advierte que la cruz con el rendimiento más alto (L1 × L11) presenta características agronómicas adecuadas como la coincidencia en ambos tipos de días a floración, un porte regular, buena relación número de mazorcas/planta y bajo porcentaje de acame (4.4).

Cuando se efectúa el análisis de varianza combinado de las seis localidades para rendimiento de grano de acuerdo al diseño II de Carolina del Norte (cuadro 5) se puede observar que existen diferencias altamente significativas entre los ambientes de prueba lo que aparentemente se debe a las condiciones ambientales y mal manejo

de las localidades de Colombia y Guatemala, en relación al resto de las localidades.

Las hembras resultaron con diferencias altamente significativas lo que significa que es factible encontrar diferencias en los efectos de aptitud combinatoria general de las líneas que actuaron como hembras a través de localidades, lo mismo sucede con los machos que también presentan diferencias altamente significativas al comparar su comportamiento. En el caso de la interacción hembras × machos (H × M) las diferencias entre las cruzas resultaron no significativas por lo que se espera no encontrar efectos importantes de aptitud combinatoria específica en los cruzamientos formados de acuerdo al diseño II de Carolina del Norte.

Al analizar el comportamiento de las líneas del grupo heterótico "A" que se presentan en el cuadro 6 se aprecia que la que exhibe los valores más altos de aptitud combinatoria general (ACG) son la línea 1 (L1) en tres de los ensayos; Agua Blanca, Pue. (1.07), La Huerta, Jal. (0.57) y Cuyutla, Guatemala (0.70) lo que la convierte en la más consistente a través de los ensayos, enseguida la línea 2 (L2) que presenta el valor más alto y significativo en el ensayo de Nueva Delhi, La India (0.83); también es importante destacar el comportamiento de la línea 4 que obtuvo el valor de ACG más alto (no significativo) en los ensayos de Cotaxtla, Ver. (0.36) y de Turipana,

Cuadro 4. Medias de las características agronómicas de las mejores cruzas para rendimiento de grano a través de seis localidades según la prueba de DMS al 5 % en el ciclo primavera-verano 2002.

Cruza	Rend t/ha	FloMas días	FloFem días	AltPI cm	AltMz cm	#Mz/#PI	Acame %
L1 × L11	6.77	55	55	233	115	0.98	4.4
CML 448 × CML 449	6.63	53	53	220	103	1.03	6.8
L2 × L11	6.61	56	56	237	113	0.97	9.5
Testigo local # 1	6.58	55	56	215	111	0.96	12.6
L4 × L11	6.44	54	55	232	108	0.98	1.5
L1 × L14	6.42	54	54	221	105	0.99	5.7
L1 × L9	6.40	54	55	223	108	1.00	11.4
B53 × L11	6.39	55	55	238	116	0.94	12.6
L1 × L15	6.38	54	54	227	109	0.97	18.1
L2 × L10	6.33	55	56	230	114	1.02	3.5
B27 × L10	6.30	55	56	224	112	0.97	16.1
B27 × L14	6.25	56	56	224	113	0.95	14.3
B27 × L9	6.19	54	55	225	108	0.95	16.1
L2 × L9	6.19	56	56	228	107	0.98	4.0
B53 × L13	6.17	53	54	228	106	0.96	8.5
L4 × L10	6.15	55	55	221	104	1.00	0.9
B27 × L15	6.13	55	56	233	112	0.93	19.2
L4 × L13	6.12	55	55	235	106	1.04	1.8
Valor de DMS	0.69	0.8	0.7	7.3	21.2	0.1	10.4

Cuadro 5. Análisis de varianza del Diseño II de Carolina del Norte combinado a través de seis localidades en el ciclo primavera-verano 2002.

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	F.C.	P>F
AMB	5	866.40	173.28	92.15	.001
Rep (AMB)	6	46.56	7.76	4.13	.001
Hembras	8	57.81	7.22	3.84	.001
Machos	4	93.29	23.32	12.40	.001
H × M	32	73.94	2.31	1.23	.193
AMB × H	40	106.55	2.66	1.42	.058
AMB × M	20	59.43	2.97	1.58	.057
AMB × H × M	160	349.45	2.18	1.16	.142
Error	264	496.44	1.88		
Total	539	2149.88			

C. V. = 19.77

Cuadro 6. Valores de aptitud combinatoria general por localidad (grupo heterótico "A"), ciclo 2002 B.

	Ver	Pue	Jal	Ind	Col	Gua
L1	0.09	1.07*	0.57*	0.17	0.61	0.70*
L2	0.07	0.19	0.29	0.83*	-0.36	0.14
L3	-0.07	-0.95*	-0.81*	-0.44*	0.31	-0.53
L4	0.36	0.59	0.25	-0.16	0.61	-0.20
L5	-0.46*	-0.90*	-0.31	-0.40*	-0.88*	-0.09

* = efecto de aptitud combinatoria general diferente de cero ($p < 0.05$).

Cuadro 7. Valores de aptitud combinatoria general por localidad (grupo heterótico "AB"), ciclo 2002 B.

	Ver	Pue	Jal	Ind	Col	Gua
L8	-0.73*	-0.11	-0.50	-0.17	-0.83	0.72
L9	0.63*	-0.80	-0.08	-0.26	-0.13	0.22
L10	-0.44	0.86	0.24	0.41	-0.20	0.02
L11	0.65*	1.16*	1.03	-0.05	0.49	1.02*
L12	0.13	-0.51	-0.07	0.27	0.22	-0.17
L13	0.23	0.41	0.33	0.34	-0.49	-1.07*
L14	0.17	-0.30	-0.23	-0.03	1.37*	0.28
L15	-0.83*	0.20	-0.08	-0.17	0.29	-0.25
L16	-0.20	-0.91	-0.63*	-0.36	-0.69	-0.77

* = efecto de aptitud combinatoria general diferente de cero ($p < 0.05$).

Cuadro 8. Rendimiento de grano de las cruzas, promedio de rendimiento de grano de las líneas y valores de aptitud combinatoria general, a través de seis localidades ciclo 2002 B.

	L1	L2	L3	L4	L5	Med	A.C.G.
L8	5.15	6.01	5.08	5.96	4.97	5.43	-0.272
L9	6.40	6.19	5.53	5.59	4.57	5.65	-0.073
L10	6.07	6.34	5.42	6.15	5.24	5.84	0.148
L11	6.77	6.61	5.61	6.44	5.82	6.25	0.717*
L12	6.04	5.74	5.25	6.01	5.22	5.65	-0.022
L13	5.93	5.62	5.99	6.12	5.00	5.73	0.040
L14	6.42	5.80	4.92	5.88	5.66	5.74	0.212
L15	6.38	5.89	4.66	5.36	5.22	5.50	-0.139
L16	5.81	5.04	5.19	5.27	4.39	5.14	-0.530*
Med	6.11	5.91	5.29	5.86	5.12		
ACG	0.538*	0.195	-0.468*	0.243	-0.508*		

* = efecto de aptitud combinatoria general diferente de cero ($p < 0.05$).

Colombia (0.61). Se puede concluir que las líneas con tendencia a mejor ACG son las líneas 1 y 2, lo que permite confirmar la primera hipótesis planteada en este trabajo.

Al revisar la misma información para las líneas del grupo heterótico "AB", cuadro 7 destaca por su comportamiento la línea 11 (L11) que es la que alcanza los valores de aptitud combinatoria general más altos en 5 de las 6 localidades de evaluación; la localidad 1 (0.51), la localidad 2 (0.85), la localidad 3 (0.91), la localidad 5 (0.50) y la localidad 6 (0.71). De igual forma destaca en su comportamiento la línea 13 que obtiene el valor más alto de aptitud combinatoria general en el ensayo de la localidad 4 (0.36) y el segundo lugar en la localidad 1 y la localidad 3 después de la línea 11 que es la más consistente a través de los ensayos en las seis localidades, la línea 10 ocupa el segundo lugar en los ensayos de las localidades 2 y 4, finalmente también llama la atención la línea 14 que comparte el primer lugar con el valor más alto (0.50) de aptitud combinatoria general del ensayo de la localidad 5 con la línea 11 aunque se muestra con valores bajos en el resto de los ensayos obteniendo incluso valores negativos en tres de las localidades de evaluación.

Al efectuar el análisis combinado de las seis localidades para la estimación de la aptitud combinatoria general de cada una de las líneas participantes de acuerdo al diseño II de Carolina del Norte, se aprecia en el cuadro 8 que la línea macho que obtuvo el valor más alto y significativo de ACG fue la línea 1 con 0.538 y la línea hembra con el valor más alto y significativo fue la línea 11 (L11) con 0.717 y coincidentemente la cruz de ambas fue la cruz que exhibió el rendimiento de grano más elevado con 6.77 ton/ha de peso como se presentó en el cuadro 4, le sigue la cruz de las líneas L2 × L11 con 6.61 ton/ha aunque estadísticamente son iguales pues ambas junto con otras ocho forman el grupo de las mejores líneas en la prueba de DMS como se mostró con antelación en el cuadro 4.

Conclusiones

Las líneas incluidas en el presente estudio generaron cruzamientos con niveles altos de diversidad tanto para caracteres cuantitativos de importancia económica como para marcadores moleculares basados en secuencias de ADN. Por otra parte, las localidades de evaluación de los cruzamientos fueron tan diversas, que para la mayoría de las variables, los efectos ambientales representaron hasta 40 veces la variación de las cruzas. Estas diferencias eran de esperarse dado que las localidades se ubican en latitudes de 7 a 29° y precipitación de 1000 a 3000 mm, entre otras cosas. La interacción genotipo ambiente contribuyó a explicar la variación observada pero su magnitud no fue de gran importancia.

Los análisis de varianza para cada localidad y en especial el análisis combinado permitieron concluir que en el material experimental los efectos de aptitud combinatoria general fueron los de mayor importancia para rendimiento de grano. La ACG de las líneas hembras fue tres veces mayor que la ACE, mientras que la de los machos cerca de 10 veces.

Estos resultados indican que las líneas incluidas en este estudio podrían ser de gran utilidad en programas de mejoramiento que aprovechan los efectos aditivos predominantemente. Tal es el caso de la línea 1 del grupo heterótico A y la línea 11 del grupo heterótico AB que presentaron los valores más altos y significativos de ACG en este estudio, 0.538 y 0.717 respectivamente. Con lo anterior se acepta la primera hipótesis de este trabajo.

En forma particular, se encontró que las líneas más promisorias para incorporarse a programas de mejoramiento y formación de híbridos de alta calidad de proteína para las regiones tropicales son L1 y L11. La línea 11 participó en tres de las mejores cruzas, mientras que la línea 1 participó en cuatro cruzas sobresalientes. Entre los cruzamientos más destacados se encuentran el L1 × L11, el L2 × L11 los cuales además de buen rendimiento, presentan buenas características agronómicas por lo que son candidatos para producción comercial en las regiones tropicales de México y otras partes del mundo.

Literatura citada

- Allard R. W.** 1975. *Principios de la mejora genética de las plantas*. Editorial Omega, segunda edición, Barcelona, España
- Brauer H. O.** 1981. *Fitogenética aplicada*. Editorial Limusa.
- Duddley, J. W., Alexander D. E. and Lambert R. J.** 1977. *Mejoramiento genético de maíz de proteína modificada*. CIMMYT-PURDUE., pp. 127-143., Editorial Limusa.
- Eberhart, S. A. and Russell W. A.** 1966. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science*. January -February. Vol. 6 36-40.
- Hallauer, A. R., Vazquez C. G. and Córdova O. H.** S/F. *Heterosis and Combining ability of tropical and subtropical Quality Protein Maize inbred lines in the U.S. Corn-Belt*.
- Mertz E., Nelson O. and Bates L. S.** 1964. Mutant gene that changes composition and increases lysine content of Maize endosperm. *Science* 154: 279.

- Robles S. R.** 1982. *Terminología genética y fitogenética*. Editorial Trillas.
- SAGARPA.** 1999. *Situación actual y perspectiva de la producción de maíz en México*. Documento de trabajo, no publicado.
- Sprague, G. F. and Tatum L. A.** 1942. General vs specific combining ability in single crosses of corn. *Jour. Amer. Soc. of Agron.* **34**: 923–930

FECHA EFECTIVA DE PUBLICACIÓN
29 DE JUNIO DE 2007