

POTENCIAL GENÉTICO Y APTITUD COMBINATORIA DE GERMOPLASMA DE MAÍZ TROPICAL

COMBINING ABILITY AND GENETIC POTENTIAL OF TROPICAL MAIZE GERMPLASM

Hernando Montenegro Torres¹, Froylán Rincón Sánchez^{1*}, Norma Angélica Ruiz Torres¹, Humberto de León Castillo¹ y Guillermo Castañón Nájera²

¹ Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro", Postgrado en Producción Agrícola, Departamento de Fitomejoramiento. Buenavista. CP 56315, Saltillo, Coah. Tel y Fax: 01 (844) 411-0220. Correo electrónico: frincon@uaaan.mx ² Instituto Tecnológico Agropecuario # 2, Conkal, Yucatán.

*Autor responsable

RESUMEN

El comportamiento de 57 accesiones de maíz fue evaluado a través de cruzas de prueba usando dos poblaciones y dos líneas endogámicas como probadores, con el propósito de identificar su potencial genético. La evaluación se realizó en dos ambientes, Cotaxtla, Ver. (Primavera-Verano 1997) y Tepalcingo, Mor. (Otoño-Invierno 1998-99), para lo cual se establecieron dos experimentos. El experimento I consistió en las cruzas obtenidas entre 42 accesiones con dos poblaciones, POB21 (Tuxpeño) y POB32 (ETO). El experimento II incluyó las cruzas parciales de 31 accesiones con las líneas CML-247 y CML-254. Los experimentos se establecieron en diseños de bloques incompletos, en látice simple 9x10 y 6x7, respectivamente, con dos repeticiones por localidad. Los probadores de amplia y reducida base genética fueron eficientes para identificar el potencial genético y la habilidad combinatoria de las accesiones utilizadas. Las mejores cruzas fueron seleccionadas con base en su comportamiento *per se* y en los efectos genéticos aditivos y no aditivos. De los análisis genéticos del Experimento I (criollos por poblaciones) se identificaron a las accesiones TAM131, CUBA137, JAL285 y SIN70 como los de mayores efectos de aptitud combinatoria general (ACG). De las mejores cruzas identificadas en el Experimento II, las accesiones PUERGP5A, CUBA134, CUBA28, CUBA72 y CUBA79 obtuvieron los valores más altos de ACG, mientras que las cruzas con altos valores de aptitud combinatoria específica (ACE) fueron CHIS567xPOB21, PUERGP5AxPOB21, OAX220xPOB32 y CUBA79xCML254. En la identificación de accesiones para ser utilizados en fases posteriores de mejoramiento, se puede considerar además del comportamiento *per se*, su aptitud combinatoria.

Palabras clave: *Zea mays* L., variedades criollas, aptitud combinatoria general, aptitud combinatoria específica.

SUMMARY

The performance of 57 maize accessions was evaluated through testcross using two populations and two inbred lines as testers in order to identify their genetic potential. The evaluation was carried out in two environments, at Cotaxtla, Ver. under rainfed conditions (during the Spring-Summer season of 1997 cycle), and Tepalcingo, Mor. under irrigation (during the Fall-Winter season of 1998-99). Two experiments were established. Experiment I consisted of crosses between 42 accessions with POB21 (Tuxpeño) and POB32 (ETO). Experiment II included partial crosses between 31 accessions with the two inbred lines CML-247 and CML-254. The experiments were set up as an incomplete block design in lattice arrangements of 9x10 and 6x7 with two replications, respectively. The broad and narrow genetic

base testers were efficient to identify the genetic potential and combining ability of the evaluated accessions. The best crosses were selected based on their performance *per se* and the additive and non-additive genetic effects. Genetic analyses of Experiment I (landraces by populations) were useful to identify the accessions TAM131, CUBA137, JAL285 and SIN70, as the best general combining ability (GCA) effects. From the best-identified crosses of Experiment II, accessions PUERGP5A, CUBA134, CUBA28, CUBA72 and CUBA79 obtained the best GCA values. Crosses having the best values of specific combining ability (SCA) included: CHIS567xPOB21, PUERGP5AxPOB21, OAX220xPOB32 and CUBA79xCML254. In the identification of accessions to be used in a breeding program, besides the *per se* performance it is convenient to consider the genetic effects such as combining ability.

Index words: *Zea mays* L., landrace varieties, general combining ability, specific combining ability.

INTRODUCCIÓN

En el siglo XX y lo que va del XXI se han obtenido importantes logros en el incremento del rendimiento de grano de maíz y se ha obtenido mayor uniformidad en los materiales mejorados como resultado del proceso de selección, lo cual ha ocasionado una reducción de la base genética utilizada (Plucknett *et al.*, 1992). En los programas de mejoramiento genético modernos para maíz, el enfoque principal ha sido orientado a desarrollar paquetes tecnológicos para producir variedades con alta uniformidad y potencial de rendimiento (Vasal *et al.*, 1999). Este conjunto de factores han contribuido a reducir las opciones de diversidad genética utilizada en el desarrollo de variedades mejoradas. La diversidad genética del germoplasma de maíz tropical, así como los criterios de selección aplicados en la evaluación del potencial genético, justifica emprender estudios de diversidad genética, asociados a características de rusticidad, tolerancia a enfermedades y alto rendimiento (Castillo-González y Goodman, 1989; Pollak, 1993; LAMP, 1991). Profundizar en el conocimiento del germoplasma desde las etapas iniciales, constituye una estrategia importante para

orientar las investigaciones y hacer un uso eficiente de recursos humanos y económicos.

La variabilidad genética es esencial para los programas de mejoramiento continuo de muchas especies cultivadas y una fuente potencial es el uso de germoplasma exótico o inadaptado (Oyervides *et al.*, 1985). Muchos complejos raciales han sido identificados y utilizados en la formación del maíz híbrido, como Chandelle, Haitian amarillo y Perla, de los cuales Tuxpeño, Cuba cristalino, Coastal cristalino tropical, ETO y Tuson son los de mayor uso en el mundo (Vasal *et al.*, 1999).

En el Proyecto Latinoamericano de Maíz (LAMP) se han evaluado más de 12000 accesiones procedentes de 12 países y se ha identificado germoplasma con potencial para incrementar el rendimiento. Algunas de estas accesiones con buen comportamiento en la mayoría de los países deberían incluirse para unir esfuerzos cooperativos de mejoramiento (Salhuana *et al.*, 1998). Tallury y Goodman (1999) identificaron el aporte del germoplasma tropical en híbridos de cruza simple, ya que con dosis de 50 a 60 % de germoplasma tropical produjeron 8 t ha⁻¹ de grano, equivalente a la media de producción de los híbridos comerciales usados como testigos. Con base en estos resultados, los mismos autores concluyeron que las líneas endogámicas con germoplasma tropical no sólo son una fuente útil para aumentar la diversidad genética de híbridos comerciales de maíz, sino que también son competitivas al cruzarse con materiales templados, ya que producen híbridos con altos rendimientos.

Después de analizar el comportamiento de los patrones heteróticos de 25 razas mexicanas de maíz y 300 cruza interracial evaluadas en tres ambientes contrastantes, Crossa *et al.* (1990) recomendaron que éstos pueden ser usados para: introducir los patrones heteróticos encontrados a través de las razas a nuevas variedades comerciales o poblaciones; buscar razas con mejores características agronómicas que pertenezcan al patrón heterótico de la raza; mejorar complejos genéticos basados en patrones heteróticos raciales y de orígenes geográficos; establecer selección recíproca recurrente entre dos razas que exhiban heterosis; o desarrollar híbridos basados en líneas derivadas de accesiones estudiadas en cada ambiente.

En la evaluación de germoplasma es común el uso de probadores que debido a su constitución genética facilitan la discriminación y selección más eficiente. Vasal *et al.* (1999) afirman que los probadores son esenciales para el éxito de un programa de mejoramiento de híbridos y que todo tipo de materiales, incluyendo poblaciones, sintéticos, híbridos y líneas endocriadas, son usados como

probadores, y que en los últimos años el uso de líneas endocriadas como probadores se ha incrementado significativamente. Por su parte, Comstock (1979) menciona que en la selección recíproca recurrente las poblaciones son ligeramente superiores como probadores una de otra, que las líneas endocriadas extraídas de esas poblaciones.

Los objetivos del presente trabajo fueron: a) evaluar y seleccionar accesiones de maíz tropical con buen comportamiento en rendimiento y características agronómicas; b) estimar los efectos de aptitud combinatoria general (ACG) y específica (ACE) con base en el potencial de rendimiento de grano para identificar las mejores accesiones; c) identificar el mejor probador para discriminar las accesiones sobresalientes; y d) identificar las mejores cruza por probadores. Las hipótesis asociadas a los objetivos fueron que las accesiones de maíz en estudio muestran amplia variabilidad genética, y por tanto puede aplicarse selección con base en características agronómicas y habilidades combinatorias, y que de los probadores participantes en las cruza de prueba, al menos uno presenta capacidad de discriminación de las accesiones.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron 57 accesiones procedentes del banco de germoplasma de maíz del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT); de éstas, 36 corresponden al germoplasma del Caribe y 21 procedentes de diferentes sitios del trópico mexicano. Los materiales fueron identificados en evaluaciones preliminares, con diferentes criterios de selección. Las accesiones fueron sometidas a cruzamientos de prueba utilizando cuatro probadores: POB21 (Tuxpeño) y POB32 (ETO), y dos líneas avanzadas CML-247 y CML-254 derivadas de P24 y P21 del CIMMYT (CIMMYT, 1998). Los cruzamientos se realizaron en el Campo Experimental de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) en Tepalcingo, Mor., durante el ciclo de Otoño-Invierno (OI) 1996-1997. Con base en las cruza obtenidas se establecieron dos experimentos: El experimento 1 incluyó las cruza de prueba entre los criollos y las dos poblaciones, que fueron 84 cruza (42 accesiones con dos probadores), y la POB21 y POB32 usadas como testigos. El experimento 2 consistió en la evaluación de las cruza parciales derivadas del cruzamiento de los criollos con las líneas CML-247 y CML-254, en el cual participaron 31 accesiones. Los dos experimentos se evaluaron en diseños de bloques incompletos en látice simple 9x10 y 6x7, respectivamente.

La evaluación se realizó en dos localidades: (1) Campo Experimental Cotaxtla del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP) (15 msnm, 18° 50' LN, 96° 10' LO, temperatura media 25°C y precipitación media anual 1675 mm), localizado en Cotaxtla, Ver., durante el ciclo de Primavera-Verano (PV) 1997; (2) Campo Experimental de Tepalcingo, Mor., de la UAAAN (940 msnm, 18° 26' LN, 98° 18' LO, temperatura media anual de 23°C y precipitación media anual 942.9 mm) durante el ciclo OI, 1998-99.

En Cotaxtla, Ver., los materiales se sembraron a una distancia de 20 cm entre plantas y 80 cm entre surcos; en tanto que en Tepalcingo, Mor., la siembra se realizó a una distancia de 19 y 75 cm entre plantas y surcos, respectivamente. Las unidades experimentales estuvieron constituidas por 16 plantas por parcela útil en Cotaxtla, Ver. y por 21 en Tepalcingo, Mor. Las variables que se analizaron fueron: Número de días a 50 % de floración masculina, altura de planta (cm), prolificidad (mazorcas por planta) y rendimiento de mazorca en t ha⁻¹ ajustado a 15 % de humedad.

En los análisis de varianza, los tratamientos (cruzas y testigos), las localidades (Cotaxtla y Tepalcingo) y la interacción localidad por tratamientos, fueron considerados efectos fijos; el resto de los efectos en los modelos fueron considerados efectos aleatorios. Los análisis se realizaron utilizando los procedimientos GLM y MIXED de SAS (SAS, 1990, 1992). Las pruebas de *F* se realizaron utilizando modelos mixtos con el procedimiento GLM, en tanto que los errores estándar fueron calculados con el procedimiento MIXED de SAS. Como criterio de selección se usó el valor del rendimiento superior a la media más dos veces el error estándar, en combinación con los valores de la altura de planta que no superaron al valor de la media más dos veces el error estándar. También se incluyó a las cruzas con valores menores o iguales que la media en los días a floración masculina. Se realizó el análisis genético correspondiente utilizando solamente a las accesiones y probadores en cada uno de los experimentos, con base en la metodología de un arreglo factorial accesión por probador, lo cual permitió estimar los efectos de aptitud combinatoria general (ACG) y específica (ACE) para los progenitores y sus cruzas (Comstock y Robinson, 1948). La estimación de los efectos se realizó de la siguiente manera: $g_i = \mu_i - \mu$; $g_j = \mu_j - \mu$; $s_{ij} = \mu_{ij} - \mu - g_i - g_j$; donde g_i y g_j son los efectos de ACG para los progenitores i, j , respectivamente; s_{ij} , el efecto de ACE de la cruz; μ_i , μ_j y μ , media de las cruzas donde interviene el progenitor i, j , y la media general, respectivamente.

RESULTADOS

Experimento I. Cruzas de criollos por poblaciones como probadores

En el análisis de varianza combinado para las variables rendimiento, floración masculina y altura de planta (Cuadro 1) se observaron diferencias estadísticas ($P \leq 0.01$) entre localidades, accesiones y probadores, excepto en localidades para la altura de planta, donde la diferencia fue al 0.05 de probabilidad.

Cuadro 1. Cuadrados medios del análisis de varianza combinado para las cruzas de criollos por poblaciones usadas como probadores.

Fuente de variación	GL	Rendimiento (t ha ⁻¹)	Floración masculina (días)	Altura de planta (cm)
Localidades (Loc)	1	279.93 **	212072.06 **	35006.87 *
Repeticiones (Rep)/Loc	2	0.69	22.27	1046.15
Bloques/Rep/Loc	24	2.07 *	3.85 **	572.05 **
Accesiones (Acc)	41	3.23 **	12.30 **	430.37 **
Probadores (Prob)	1	103.47 **	77.35 **	1619.30 **
Acc x Prob	41	2.89 **	4.00 *	244.20 *
Acc x Loc	41	2.25 **	3.97 *	226.86
Prob x Loc	1	16.17 **	48.39 **	183.37
Acc x Prob x Loc	41	1.01	3.10	115.13
Error	130	1.20	2.38	163.84
CV (%)		12.03	1.94	5.89

*, ** Significativo al 0.05 y 0.01 de probabilidad.

Tales resultados se atribuyen a la diversidad genética de los materiales que intervinieron en las cruzas con los probadores y a los efectos del ambiente de evaluación. También se observaron diferencias estadísticas en las interacciones ACCxPROB, ACCxLOC y PROBxLOC, excepto en ACCxLOC y PROBxLOC para la variable altura de planta. Lo anterior indica que existe respuesta diferencial tanto de los probadores como de las accesiones a través de las localidades de evaluación; en el caso del rendimiento de grano, se encontró diferencia estadística ($P \leq 0.01$) en las interacciones ACCxPROB, ACCxLOC y PROBxLOC.

En el Cuadro 2 se presentan las cruzas intervarietales (mestizos) ordenadas con base en el rendimiento promedio de los dos probadores (POB21 y POB32) a través de los ambientes de estudio.

Las 10 mejores cruzas intervarietales en rendimiento de mazorca, floración masculina y altura de planta (Cuadro 2), muestran en forma clara la interacción encontrada ACCxPROB, ya que al analizar el orden de clasificación con cada probador, el que mejor combinó fue la POB21 (81 % de las cruzas), en tanto que sólo ocho (19 %) combinaron bien con la POB32. Los probadores tuvieron un comportamiento promedio *per se* de 9.695 y 8.512 t ha⁻¹

Cuadro 2. Medias de rendimiento, floración masculina y altura de planta de cruzas intervarietales entre criollos por poblaciones usadas como probadores.

Accesión	Rendimiento promedio (t ha ⁻¹)	POB21			POB32				
		Rendimiento (t ha ⁻¹)	C	Floración masculina (días)	Rendimiento (t ha ⁻¹)	C	Floración masculina (días)	Altura de planta (cm)	
									Altura de planta (cm)
TAM131	10.456	10.236	14	86	238	10.676 ^{††}	1	82	244
CUBA137	10.167	10.219	15	80	229	10.116	2	81	223
JAL285	9.938	10.243	13	81	224	9.633	5	78	229
SIN70	9.901	10.636 ^{††}	8	80	228	9.165	7	77	230
RDOMGP13	9.835	10.925 ^{††}	3	78	217	8.745	17	81	217
CUBA94	9.780	11.002 [†]	2	81	236	8.559	23	80	211
PUER3	9.750	9.700	21	80	216	9.800	4	77	211
RDOM119	9.728	9.912	17	79	219	9.544	6	78	232
CHIS463	9.686	9.419	27	83	223	9.953	3	80	212
CUBA160	9.667	10.769 ^{††}	7	79	214	8.566	22	79	213
CUBA165	9.610	10.789 ^{††}	6	79	229	8.430	25	80	208
SON72	9.590	10.261	12	80	210	8.919	15	79	231
TAM129	9.537	10.421 ^{††}	11	79	228	8.653	20	80	217
CUBA24	9.513	10.832 [†]	4	79	234	8.194	28	78	231
CHIS567	9.423	11.430 ^{††}	1	82	216	7.416	37	82	206
BRV113	9.208	9.332	28	82	217	9.084	8	77	212
TAM146	9.190	10.629 ^{††}	9	78	211	7.750	34	77	192
DUR102	9.097	9.654	22	77	233	8.540	24	75	206
PUERGP5A	9.089	10.829 ^{††}	5	82	215	7.349	38	79	225
CUBA163	9.081	9.549	25	80	222	8.613	21	79	206
SCRO2	9.065	10.428 ^{††}	10	80	216	7.702	35	78	194
CUBA91	9.064	9.174	30	80	226	8.955	12	79	226
CUBA62	9.008	9.098	32	79	229	8.918	16	78	206
RDOM254	9.008	9.091	33	78	212	8.925	14	76	221
TAM125	8.978	9.026	34	82	221	8.930	13	79	218
CUBA26	8.968	9.260	29	79	212	8.676	19	79	210
CUBA34	8.936	9.751	19	78	223	8.122	29	80	204
RDOM253	8.914	9.788	18	80	218	8.040	31	77	206
COL54	8.893	8.747	36	81	227	9.038	10	81	213
GRO376	8.804	9.527	26	79	225	8.082	30	83	222
COAH53	8.728	8.728	37	82	202	8.728	18	83	226
CUBA57	8.708	9.618	24	80	218	7.798	33	80	203
TAM103	8.687	9.130	31	81	208	8.245	27	78	198
PUER8	8.681	8.391	38	80	223	8.970	11	80	228
OAX220	8.680	8.285	40	83	218	9.076	9	81	229
PUER7	8.654	8.895	35	78	220	8.412	26	80	212
CUBA153	8.587	9.747	20	81	202	7.427	36	79	220
CUBA142	8.579	9.916	16	82	220	7.243	39	80	216
CUBA3	8.123	9.631	23	81	211	6.615	42	79	214
CHIS299	7.740	7.659	42	81	221	7.821	32	79	206
CUBA48	7.648	8.299	39	80	212	6.997	41	81	199
RDOM281	7.648	8.216	41	80	212	7.081	40	78	208
Promedio ‡	9.104	9.695		80	220	8.512		79	215
Error estándar		0.588		0.858	6.933	0.588		0.858	6.933

† Mayor que $\mu + 2$ el error estándar; †† = Cruzas intervarietales seleccionadas; ‡ = Promedio general y promedio de probadores; C = Ordenamiento del rendimiento con base en la respuesta de la accesión con el probador.

para la POB21 y POB32, respectivamente. El Cuadro 3 presenta los valores de las 10 mejores accesiones ordenadas con base en los efectos de ACG a través de ambientes.

De las 10 accesiones identificadas, sólo cuatro (RDOMGP13, CUBA160, TAM131 y SIN70) coinciden

con las seleccionadas en el Cuadro 2. Lo anterior demuestra que en el comportamiento de las cruzas intervienen los efectos aditivos y no aditivos, y evidencia la importancia de hacer el análisis genético para identificar las poblaciones sobresalientes a ser utilizadas en las siguientes fases de un programa de mejoramiento genético.

Cuadro 3. Valores estimados de ACG promedio y por localidad para rendimiento de mazorca de las mejores 10 accesiones y los probadores.

Accesiones	Combinado			Cotaxtla, Ver.			Tepalcingo, Mor.		
	C†	ACG	t ha ⁻¹	C	ACG	t ha ⁻¹	C	ACG	t ha ⁻¹
TAM131	1	1.353**	10.456	2	2.189**	10.366	16	0.517	10.547
CUBA137	2	1.064*	10.167	4	1.084*	9.261	4	1.043	11.074
JAL285	3	0.834	9.938	3	1.182*	9.359	17	0.486	10.517
SIN70	4	0.797	9.901	16	0.152	8.329	1	1.443*	11.473
RDOMGP13	5	0.731	9.835	13	0.271	8.448	2	1.192*	11.222
CUBA94	6	0.677	9.780	1	2.194**	10.371	35	-0.840	9.190
PUER3	7	0.647	9.750	17	0.130	8.306	3	1.164*	11.194
RDOM119	8	0.624	9.728	7	0.565	8.742	11	0.683	10.714
CHIS463	9	0.582	9.686	9	0.468	8.644	9	0.697	10.728
CUBA160	10	0.564	9.667	15	0.237	8.414	7	0.891	10.921
Probadores									
POB21	1	0.592	9.695	1	0.889**	9.066	1	0.294*	10.324
POB32	2	-0.592	8.512	2	-0.889**	7.287	2	-0.294*	9.737

† C = Clasificación del efecto ACG en cada accesión; *, ** Diferente de cero al 0.05 y 0.01 de probabilidad.

Los valores de ACG ayudaron a identificar a la POB21 como el probador que, en promedio, combinó mejor con las accesiones utilizadas en la evaluación. Por otra parte, con la información del Cuadro 3 es posible identificar los efectos de la interacción ACCxLOC, tomando como referencia el orden de la clasificación (C) para ACG que tienen las accesiones en las localidades de evaluación.

Con los valores de las medias de rendimiento y los de ACG se estimaron los efectos de aptitud combinatoria específica (ACE) para las cruzas intervarietales. Los resultados de las mejores 10 cruzas con alta ACE a través de localidades y por localidad se presentan en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Valores de ACE estimados para rendimiento en mazorca en la evaluación de criollos por poblaciones a través de localidades.

Cruzas	Combinado		Cotaxtla, Ver.		Tepalcingo, Mor.				
	C† ACE	t ha ⁻¹	C ACE	t ha ⁻¹	C ACE	t ha ⁻¹			
CHIS567xPOB21	1	1.415**	11.430	6	1.039	11.095	1	1.792*	11.765
PUERGP5AxPOB21111	2	1.148*	10.829	21	0.534	10.525	2	1.763*	11.134
AX220xPOB32	3	0.987*	9.076	17	0.598	7.528	5	1.376	10.624
CUBA3xPOB21	4	0.917	9.631	4	1.229	10.012	19	0.605	9.250
PUER8xPOB32	5	0.881	8.970	12	0.662	7.227	7	1.100	10.714
CHIS463xPOB32	6	0.858	9.953	2	1.313	9.068	28	0.404	10.838
TAM146xPOB21	7	0.848	10.629	11	0.716	9.554	9	0.980	11.704
TAM131xPOB32	8	0.811	10.676	16	0.630	10.106	8	0.993	11.246
SCRO2xPOB21	9	0.772	10.428	49	-0.164	8.290	4	1.707*	12.566
CUBA142xPOB21	10	0.745	9.915	3	1.282	10.168	32	0.206	9.663

† C = Clasificación del efecto ACE en cada craza a través de ambientes; *, ** Diferente de cero al 0.05 y 0.01 niveles de probabilidad.

Al comparar las cruzas intervarietales seleccionadas con base en el comportamiento *per se* (Cuadro 2), con las cruzas del Cuadro 4, se observa que únicamente cinco cruzas son comunes (CHIS567xPOB21, PUERGP5AxPOB21, TAM146xPOB21, TAM131xPOB32 y SCRO2xPOB21) y sólo en una craza interviene la POB32 como probador. De los valores de ACE promedio en el Cuadro 4, en seis cruzas intervino la POB21 y en cuatro la POB32, lo que indica que las accesiones tienden a combinar mejor con la POB21 que con la POB32. Cuatro de las accesiones que intervinieron con la POB21

(Tuxpeño) corresponden a materiales cristalinos procedentes del Caribe (PUERGP5A, SCRO2, CUBA3 y CUBA142); los dos restantes son materiales originados de la raza Olotillo (CHIS567) y Tuxpeño (TAM146). En el caso de las cruzas con la POB32 (ETO), la expresión del rendimiento está determinada por la divergencia genética de los materiales provenientes de las razas Olotillo (CHIS463) y Tuxpeño (OAX220 y TAM131), lo que indica que los probadores pudieron discriminar a las accesiones en función de su constitución y divergencia genética.

En el Cuadro 5 se presenta el rendimiento de las mejores cruzas intervarietales seleccionadas, así como la contribución relativa de los efectos de ACG de accesiones, probadores y los efectos de ACE.

Cuadro 5. Contribución relativa de los efectos de la accesión y probador en el rendimiento de mazorca de las mejores 10 cruzas seleccionadas a través de ambientes.

Cruzas	Rendimiento (t ha ⁻¹)	ACE			
		Media general (Accesión)	ACG (Probador)	ACG (AccxProb)	ACE
CHIS567xPOB21	11.430	9.104	0.320	0.592	1.415
RDOMGP13xPOB21	10.925	9.104	0.731	0.592	0.499
PUERGP5AxPOB21	10.829	9.104	-0.014	0.592	1.148
CUBA165xPOB21	10.789	9.104	0.506	0.592	0.588
CUBA160xPOB21	10.769	9.104	0.563	0.592	0.510
TAM131xPOB32	10.676	9.104	1.353	-0.592	0.811
SIN70xPOB21	10.636	9.104	0.797	0.592	0.144
TAM146xPOB21	10.629	9.104	0.086	0.592	0.848
SCRO2xPOB21	10.428	9.104	-0.039	0.592	0.772
TAM129xPOB21	10.421	9.104	0.433	0.592	0.293

Las cruzas intervarietales fueron seleccionadas con base en la expresión del rendimiento, precocidad y altura de planta indicadas en el Cuadro 2. La contribución relativa de los efectos genéticos indica que los valores más altos de ACG correspondientes a las accesiones TAM131, SIN70 y RDOMGP13, así como los valores de ACE (ACCxPROB) correspondientes a las cruzas PUERGP5AxPOB21, CHIS567xPOB21, TAM146xPOB21,

TAM131xPOB32 y SCRO2xPOB21, coinciden con los resultados indicados en los Cuadros 3 y 4. Sin embargo, en dos de las cruzas seleccionadas (CUBA165xPOB21 y TAM129xPOB21) la contribución al rendimiento está determinado por los efectos balanceados de la accesión, el probador y la interacción ACCxPROB. Por ello se sugiere incorporar los valores de aptitud combinatoria al proceso de selección.

Experimento II. Cruzas de criollos por líneas como probadores

Aquí se analiza el comportamiento de 31 accesiones en combinación con dos líneas probadoras (CML247 y CML254). Debido a que no fue posible formar todas las cruzas por problemas de sincronía en la floración, la interacción ACCxPROB se estimó con sólo ocho cruzas comunes. En el Cuadro 6 se presenta el análisis de varianza combinado para las variables rendimiento de mazorca, floración masculina y altura de planta.

Cuadro 6. Cuadros medios del análisis de varianza combinado para las cruzas obtenidas del cruzamiento entre criollos y líneas usadas como probadores.

Fuente de variación	GL	Rendimiento (t ha ⁻¹)	Floración masculina (días)	Altura de planta (cm)
Localidades (Loc)	1	155.98 *	104163.38 **	27105.06 *
Repeticiones (Rep)/Loc	2	4.76	2.02	416.07
Bloques/Rep/Loc	24	2.07 *	3.85 **	572.05 **
Accesiones (Acc)	30	2.94 **	9.92 **	266.23 **
Probadores (Prob)	1	0.91	33.45 **	1709.77 **
Acc x Prob	7	2.73 *	2.39	258.55 *
Acc x Loc	30	2.65 **	3.76 **	95.67
Prob x Loc	1	11.52 **	3.14	831.68 **
Acc x Prob x Loc	7	2.06	2.02	191.36
Error	52	1.05	1.36	108.68
CV (%)		10.933	1.421	4.692

*. ** Significativo al 0.05 y 0.01 de probabilidad.

Con respecto a los efectos principales, se encontraron diferencias estadísticas entre localidades y entre accesiones en rendimiento, floración masculina y altura de planta, lo que muestra la variación tanto en condiciones ambientales como en diversidad genética entre las accesiones. En cambio, los probadores mostraron diferencia estadística sólo en los días a floración y altura de planta.

La interacción ACCxLOC fue significativa ($P \leq 0.01$) para rendimiento de mazorca y floración masculina, no así para la altura de planta, lo que indica un comportamiento diferente de las accesiones en respuesta a las condiciones ambientales de evaluación. Los cuadros medios de las cruzas obtenidas entre accesiones con los dos probadores (ACCxPROB) mostraron diferencias estadísticas ($P \leq 0.05$) para las variables rendimiento de mazorca y altura

de planta, en tanto que en los días a floración masculina no se detectó diferencia estadística. La interacción PROBxLOC mostró diferencias ($P \leq 0.01$) en el rendimiento en mazorca y la altura de planta, pero no en los días a floración. Es importante resaltar que las diferencias estadísticas entre los efectos anteriores son aproximadas debido a que se tiene un experimento desbalanceado.

De las cruzas evaluadas (Criollos x líneas), se seleccionaron las mejores 10 con base en el rendimiento en mazorca a través de localidades (Cuadro 7).

Cuadro 7. Medias de rendimiento de mazorca, ACG y características agronómicas de las mejores 10 cruzas entre criollos por líneas usadas como probadores a través de localidades.

Cruzas	Rendimiento (t ha ⁻¹)	ACG	Floración masculina (días)	Altura de planta (cm)	Prolificidad
CUBA79xCML254	12.278 [†]	1.259*	82	221	1.09
PUERG5AxCML254	11.998 [†]	2.618**	83	244	1.09
CUBA134xCML254	11.130 [†]	1.750**	84	236	1.22
CUBA28xCML254	11.126 [†]	1.745**	81	235	1.37
CUBA72xCML254	10.856 [†]	1.475*	84	238	1.15
COAH53xCML254	10.232	0.535	86	236	1.12
CUBA77xCML254	10.148	0.768	82	230	1.07
SIN70xCML247	10.005	0.624	81	216	0.93
CHIS429xCML247	9.974	0.593	83	223	0.90
CUBA130xCML254	9.957	0.577	84	219	1.09
Promedio	9.380		82	222	1.03
Error estándar	0.580		0.655	6.299	0.05

[†] Mayor que $\mu + 2$ el error estándar; *, ** Diferente de cero al 0.05 y 0.01 niveles de probabilidad.

Los mejores rendimientos fueron por lo general con cruzas muy tardías y altas, tomando como referencia el promedio de estas características en la evaluación. Sin embargo, la cruzada CUBA79xCML254, que obtuvo el rendimiento más alto de mazorca, presentó una floración y altura de planta por debajo de la media a través de localidades. El índice de prolificidad (mazorcas por planta) indica que en general, todas las plantas produjeron una o más mazorcas, excepto en las cruzas SIN70xCML247 y CHIS429xCML247; la prolificidad es una característica deseable como criterio de selección.

Al analizar el rendimiento de las cruzas con los dos probadores (datos no presentados) en comparación con la media general, se encontró que 74 % de las cruzas entre accesiones y la línea CML254 fueron superiores a la media, mientras que con la CML247 sólo 30 % de las cruzas superaron a la media. Por otra parte, de las cruzas con rendimientos inferiores a la media general, 70 % correspondió a las cruzas con la línea CML247 y 26 % de las cruzas con la línea CML254. Estos resultados indican que la línea CML254 fue mejor que CML247. Los valores

estimados de ACG para la línea CML254 fueron 0.796, 0.046 y 0.421 t ha⁻¹, correspondientes a la localidad de Cotaxtla, Ver., Tepalcingo, Mor., y el promedio a través de localidades respectivamente, lo que apoya los resultados y análisis anteriores, ya que la línea CML247, presentó resultados similares negativos.

DISCUSIÓN

En el análisis de los dos experimentos (criollos por poblaciones y líneas usadas como probadores) se confirmó la variación genética de las 57 accesiones utilizadas en la evaluación (Cuadros 1 y 6). De igual manera, se pudo observar la divergencia genética de los probadores de amplia y reducida base genética utilizados para discriminar a las accesiones de germoplasma de maíz. Sin embargo, las líneas usadas como probadores no fueron estadísticamente diferentes para la variable rendimiento (Cuadro 6), aún cuando provienen de germoplasma diferente (CIMMYT, 1998). Las condiciones ambientales en las evaluaciones fueron contrastantes, ya que el factor localidades fue significativo (Cuadros 1 y 6). En un intento por explicar las diferencias ambientales en cada experimento, en el Cuadro 8 se presentan las medias de localidades de las variables rendimiento de mazorca, floración masculina y altura de planta.

Cuadro 8. Medias de localidades para rendimiento de mazorca, floración masculina y altura de planta en cada experimento.

Localidades	Rendimiento (t ha ⁻¹)	Floración masculina (días)	Altura de Planta (cm)
Experimento I: Criollos x poblaciones			
Cotaxtla, Ver.	8 b [†]	54 b	227a
Tepalcingo, Mor.	9 a	105 a	207b
Promedio	9	80	217
Error estándar	0	0.377	2.710
Tukey(0.05)	0	2.309	15.903
Experimento II: Criollos x líneas			
Cotaxtla, Ver.	8 b	56 b	236a
Tepalcingo, Mor.	10 a	109 a	210b
Promedio	9	83	223
Error estándar	0	0.272	3.470
Tukey(0.05)	1	0.888	12.705

[†] Medias con la misma letra en cada columna no son diferentes estadísticamente (Tukey, 0.05).

En la localidad de Tepalcingo, Mor., se expresó mejor el potencial de rendimiento de las cruzas, aunque fueron más tardíos y con menor altura de planta, debido en parte a lo largo del ciclo agrícola en Otoño-Invierno.

Considerando que las cruzas obtenidas entre las accesiones con los dos grupos de probadores representan en ambos casos una muestra aleatoria, se puede observar una diferencia relativa en la expresión del potencial del rendimiento de mazorca y los días a floración. Así, las cruzas de criollos por las líneas (CML247 y CML254) fueron más tardías que el promedio de las cruzas entre los criollos por las poblaciones (POB21 y POB32). El error estándar de la media es mayor al usar las líneas como probadores, excepto en la floración masculina, donde se obtuvo un valor de 0.272 comparado con 0.377 obtenido en las cruzas de criollos por poblaciones.

El análisis genético y las estimaciones de ACG de los probadores permitieron determinar que en el Experimento I la POB21 fue la que mejor discriminó a las accesiones, en tanto que en el Experimento II la línea que mejor combinó fue CML254.

La estimación de los efectos de ACG y ACE en las cruzas entre accesiones con las poblaciones usadas como probadores (Cuadros 3 y 4), muestran que estos efectos dependen en parte de la interacción de los genotipos con el ambiente de evaluación, por lo que es posible identificar accesiones con buen comportamiento en cada ambiente de evaluación. Sin embargo, la selección de genotipos con base en los efectos promedio de ACG y ACE permite predecir el comportamiento de los genotipos en una amplia diversidad de ambientes con características similares o mega-ambientes.

La expresión del potencial genético de las cruzas seleccionadas en el Experimento I (Cuadros 2 y 5) indican que la identificación de las mejores cruzas intervarietales con base en el comportamiento *per se* (rendimiento de mazorca, altura de planta y floración), es el resultado de la combinación diferencial de la accesión, el probador y la interacción ACCxPROB. Desde el punto de vista de la identificación de germoplasma con propósitos de utilización en programas de mejoramiento genético, se pueden considerar tanto los efectos de ACG (Cuadro 3) como los efectos de ACE (Cuadro 4), dependiendo de los objetivos específicos.

De esta manera, las mejores accesiones con base en los efectos de ACG (Cuadro 3) podrían incluirse en programas de mejoramiento para obtener variedades sintéticas de amplia adaptación. Asimismo, las cruzas identificadas entre las accesiones por líneas (Cuadro 7) podrían considerarse en un programa de mejoramiento para la formación de híbridos y para introducir variación genética en programas de selección recíproca recurrente.

De acuerdo con los análisis genéticos del experimento criollos por poblaciones, las accesiones TAM131, CUBA137, JAL285 y SIN70, se identificaron como las de mayores efectos de ACG para las variables en estudio, en tanto que las mejores cruzas entre los criollos por líneas fueron PUERGP5A, CUBA134, CUBA28, CUBA72 y CUBA79, con valores más altos de ACG que facilitarían la participación en las subsiguientes etapas de mejoramiento.

Se observaron cruzas con valores altos de ACE a través de ambientes, como CHIS567 x POB21, PUERGP5A x POB21, OAX220 x POB32 y CUBA79 x CML254 (1.415, 1.148, 0.987 y 1.218 t ha⁻¹, respectivamente), en las cuales se podrían implementar métodos de mejoramiento para la formación de cruzas simples o híbridos intervarietales.

CONCLUSIONES

Los grupos de probadores de amplia y reducida base genética permitieron constatar la diversidad genética de las accesiones y su potencial. La POB21 y la línea CML-254 fueron los probadores que se identificaron como los de mayor capacidad para rendimiento y para discriminar las accesiones en estudio.

En la selección de cruzas con base en el potencial de rendimiento de mazorca *per se*, se encuentran confundidos los efectos genéticos aditivos y no aditivos.

Se identificaron grupos de accesiones con base en la expresión fenotípica promedio y a los efectos de aptitud combinatoria general y específica, los cuales podrían ser utilizados en fases posteriores del mejoramiento genético.

BIBLIOGRAFÍA

- Castillo-González F, M M Goodman (1989) Agronomic evaluation of Latin American maize accessions. *Crop Sci.* 29:853-861.
- CIMMYT (1998) A complete listing of improved maize germplasm from CIMMYT. Maize Program Special Report. México, D.F. 94 p.
- Comstock R E (1979) Inbred lines vs the populations as testers in reciprocal recurrent selection. *Crop Sci.* 19:881-886.
- Comstock R E, H F Robinson (1948) The components of genetic variance in populations of biparental progenies and their use in estimating the average degree of dominance. *Biometrics* 4: 254-266.
- Crossa J, S Taba, E J Wellhausen (1990) Heterotic patterns among Mexican races of maize. *Crop Sci.* 30:1182-1190.
- LAMP (1991) Catálogo de germoplasma de maíz. Tomo I y II. Proyecto Latinoamericano de Maíz (LAMP), November, 1991. Database manager GRIN, Database management unit, Beltsville, MD.
- Oyervides G M, A R Hallauer, H Cortez M (1985) Evaluation of improved maize populations in Mexico and the U.S. *Corn Belt. Crop Sci.* 25:115-120.
- Pollak L M (1993) Evaluation of Caribbean maize accessions in Puerto Rico. *Tropical Agric.* 70(1):8-12.
- Plucknett D L, J T Williams, N J H Smith, N M Anishetty (1992) Bancos genéticos: un recurso mundial. *In: Los Bancos Genéticos y la Alimentación Mundial.* Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura y Centro Internacional de Agricultura Tropical. Costa Rica. pp: 19-34.
- Salhuana W, L M Pollak M Ferrer, O Paratori, G Vivo (1998) Breeding potential of maize accessions from Argentina, Chile, USA, and Uruguay. *Crop Sci.* 38: 866-872.
- SAS (1990) SAS/STAT User's Guide, Version 6, Fourth Edition, Vol. 1. Cary, N.C.: SAS Institute, Inc.
- SAS (1992) SAS Technical Report P-229. SAS/STAT Software: Changes and Enhancements. Release 6.07. Cary, NC: SAS Institute, Inc.
- Tallury S P, M M Goodman (1999) Experimental evaluation of the potential of tropical germplasm for temperate maize improvement. *Theor. Appl. Genet.* 98 (1): 54-61.
- Vasal S K, H Cordova, S Pandey, H G Srinivasan (1999) Tropical maize and heterosis. *In: J G Coors, S Pandey (eds). The Genetics and Exploitation of Heterosis in Crops.* ASA, CSSA, and SSSA. Madison, WI. pp: 363-373.