



CRUZAS DIALÉLICAS ENTRE POBLACIONES NATIVAS DE MAÍZ DE YUCATÁN Y POBLACIONES MEJORADAS

[DIALLELIC CROSSES AMONG MAIZE LANDRACES FROM YUCATAN AND IMPROVED POPULATIONS]

L. A. Dzib-Aguilar¹, J. C. Segura-Correa^{2*}, R. Ortega-Paczka³ y L. Latournerie-Moreno⁴

¹Universidad Autónoma Chapingo, Centro Regional del Sureste. Apartado postal Núm. 43 Administración Central Núm. 1. C.P. 97000. Mérida, Yucatán, México. luisdzib@prodigy.net.mx. ²Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Apartado postal 4-116 Itzimmá, C.P. 97100 Mérida, Yucatán, México. ³ Universidad Autónoma Chapingo, Dirección de Centros Regionales. C.P 56230. Chapingo, Estado de México. ⁴Instituto Tecnológico de Conkal, Km. 16.3 Antigua Carretera, Mérida-Motul, Conkal, Yucatán.

Email: scorrea@uady.mx

*Corresponding Author

RESUMEN

Se estimó la aptitud combinatoria general (ACG) y específica (ACE) de dos dialelos formados cada uno con cinco poblaciones de maíz. El primer dialelo incluyó poblaciones precoces: Nalxoy Blanco, Nalxoy Amarillo, Xmehen-nal de Yaxcabá, V-533 y VS-536. El segundo incluyó maíces tardíos y precoces: Dzit-Bacal de Kantunil, Dzit-Bacal de Presumida, Dzit-Bacal de Bulukax, V-533 y VS-536. Se usaron bloques al azar con cuatro repeticiones, 10 cruzas F₁ y cinco progenitores por dialelo. Los datos se analizaron con el Método 2, Modelo I de Griffing. Para rendimiento de grano, en poblaciones precoces, la ACG explicó 86% de la variación y la ACE 14%. Las poblaciones VS-536, Nalxoy Blanco y Nalxoy Amarillo presentaron ACGs de 0.21, 0.18 y 0.10. Con base en la ACE la mejor crusa fue Nalxoy Blanco x VS-536 (0.27). Para rendimiento de grano en poblaciones tardías, la ACG contribuyó con 78% de la variación y ACE con 22%. El mejor progenitor fue Dzit-Bacal de Bulukax (ACG = 0.21) y las mejores cruzas Dzit-Bacal de Bulukax x VS-536 (ACE = 0.54) y Dzit-Bacal de Kantunil x VS-536 (ACE = 0.10). Los materiales más rendidores fueron combinaciones de poblaciones nativas x variedades mejoradas, propuestos como base para programas de mejoramiento.

Palabras clave: *Zea mays*; aptitud combinatoria; cruzas dialélicas; población local nativa.

SUMMARY

The general (GCA) and specific combining ability (SCA) of two diallelic sets consisting of five maize populations each were evaluated. The first set included early mature populations: Nalxoy Blanco, Nalxoy Amarillo, Xmehen-nal from Yaxcabá, V-533 and VS-536. The second included late and early mature populations: Dzit-Bacal from Kantunil, Dzit-Bacal from Presumida, Dzit-Bacal from Bulukax, V-533 and VS-536. Complete randomized blocks designs with four replicates were used, with 10 F₁ crosses and five parental populations in each diallel. Data were analyzed using Griffin's method 2, Model I. For grain yield, in the early mature populations, the GCA effects explained 86% of variation and SCA 14%. VS-536, Nalxoy Blanco and Nalxoy Amarillo populations had GCA's of 0.21, 0.18 and 0.10. Based on the SCA, the best cross was Nalxoy Blanco x VS-536 (0.27). For grain yield, in the late mature populations, GCA explained 78% variation and SCA 22%. The best parent population was Dzit-Bacal from Bulukax (GCA = 0.21), and the best crosses were Dzit-Bacal from Bulukax x VS-536 (SCA = 0.54) and Dzit-Bacal from Kantunil x VS-536 (SCA = 0.10). The most productive populations were the crosses of local landraces and improved populations, proposed as base for plant breeding programs.

Key words: *Zea mays*; combining ability; diallelic crosses; landraces.

INTRODUCCIÓN

En la Península de Yucatán el maíz es el alimento básico de la población rural y principal cultivo con 432,118 ha sembradas en el 2005 (INEGI, 2006 a,b,c); en el estado de Yucatán se cultivaron 161,135 ha de maíz, de las cuales 78.6% se sembró con semilla de poblaciones nativas y 21.4% con semilla mejorada (INEGI, 2005). La milpa es un sistema de cultivo de maíz asociado con otras plantas en diferentes variantes de roza-tumba-queima (Chávez *et al.*, 2004), el cual impera en la región, siendo su propósito producir alimentos y otros satisfactores base material de la vida familiar y comunal. Los milperos de Yucatán generalmente obtienen sus semillas de la cosecha anterior o la adquieren dentro o fuera de su comunidad, de personas que también la seleccionaron a partir de las mazorcas cosechadas. Casi la totalidad de las poblaciones de maíz de las cuales los milperos seleccionan sus semillas son poblaciones nativas, a las que comúnmente se les llama variedades criollas, aunque ese nombre se presta a confusión, debido a que también se han encontrado sembradas en el sistema milpa, generaciones avanzadas de maíces mejorados y poblaciones derivadas de cruza y mezclas de maíces mejorados con poblaciones nativas (Gómez *et al.*, 2004).

En México el proceso de mejoramiento genético del maíz lo realizan de manera convencional los fitomejoradores y de manera tradicional los propios productores. El primero ha proporcionado pocas variedades para la milpa tradicional en Yucatán (V-533 y VS-536), debido a que no se contempla comúnmente en su formación la adaptabilidad a las condiciones en que se va a cultivar y las características necesarias para consumo de las familias campesinas (Chávez *et al.*, 2004).

Ante la escasa adopción de los maíces mejorados generados hasta la fecha, por los campesinos de México, en los últimos años ha cobrado considerable auge los programas de mejoramiento genético participativo, en los que colaboran fitogenetistas y campesinos (Ortega, 2000). En estos programas, además del rendimiento, se pone especial interés en reducir la altura de la planta y conservar la calidad de grano de las poblaciones nativas. Hallauer y Miranda (1981) consideran que los fitomejoradores de maíz tienen que tomar dos importantes decisiones en el desarrollo de sus programas de mejoramiento: escoger el germoplasma y escoger el procedimiento de mejoramiento. Ortiz (1993) considera que una tercera decisión fundamental son los criterios de selección. En Yucatán se han iniciado investigaciones en este sentido, intentando mejorar las poblaciones nativas mediante retrocruza limitada y selección (Chávez *et al.*, 2004). Por lo anterior, es necesario realizar trabajos que permitan conocer los efectos genéticos

mediante la aptitud combinatoria general (ACG) y la aptitud combinatoria específica (ACE) de las poblaciones nativas. La ACG se refiere al rendimiento promedio de un progenitor en combinaciones híbridas y la ACE se usa para elegir las combinaciones híbridas que se comportan mejor que los promedios de los progenitores involucrados en su cruzamiento (Sprague y Tatum, 1942). Los cruzamientos dialélicos han sido ampliamente utilizados para estimar los efectos de ACG y ACE, los cuales permiten estimar la acción génica de las diferentes características (Griffing, 1956). La ACG está relacionada con los efectos aditivos de los genes, y la ACE con los efectos de dominancia.

Los objetivos de este trabajo fueron: 1) Estimar la aptitud combinatoria general y específica de poblaciones contrastantes de maíz de la Península de Yucatán; 2) Identificar las poblaciones de maíz con mayor rendimiento de grano y características *per se*, adecuadas como material genético base para iniciar un esquema de mejoramiento participativo; 3) Identificar mediante experimentos de cruza dialélicas los efectos genéticos sobre el rendimiento y características *per se* del maíz.

MATERIAL Y MÉTODOS

El material genético se constituyó por ocho poblaciones de maíz colectadas en la Península de Yucatán en 2003 y 2004, con los siguientes antecedentes: Los maíces precoces Nalxoy Amarillo (NA) de grano amarillo y Nalxoy Blanco (NB) de grano blanco, fueron generados por un milpero de Xoy, Peto, Yucatán, quien cruzó la variedad PR 7822 x Nal-Tel seguido por tres ciclos de selección. El Xmehen-nal de Yaxcabá (XMY) de grano blanco, se generó a partir de una población nativa a la que un milpero le aplicó selección masal visual por cuatro años. La variedad sintética VS-536 es de grano blanco desarrollada por el INIFAP a partir de líneas derivadas de materiales de regiones tropicales húmedas del país (Gámez *et al.*, 1996). La variedad mejorada V-533 de grano amarillo, fue formada en el INIFAP (Aguilar *et al.*, 1990) a partir de poblaciones nativas de la Península de Yucatán. La semilla de la variedad V-533 que se usó en este estudio, es una generación avanzada que un milpero de Yaxcabá Yucatán, ha conservado y seleccionado por el procedimiento tradicional, por aproximadamente ocho generaciones de selección; la razón de no haber usado semilla certificada fue que ya no se dispone de ésta ni en el mercado ni en el INIFAP. Dzit-Bacal de Kantunil (DBK), Dzit-Bacal de Presumida, Q. Roo (DBP) y Dzit-Bacal de Bulukax Q. Roo (DBB), son poblaciones nativas tardías de grano blanco colectadas en 1999 que sobresalieron por su rendimiento de grano al evaluarlas en Yaxcabá, Yucatán (Burgos *et al.*, 2004).

La formación de las cruzas dialélicas (híbridos F_1) entre ocho progenitores se realizó por polinización manual en Muna, Yucatán en 2003. El trabajo original se estableció con el propósito de formar un solo dialelo con las ocho poblaciones; sin embargo, no se logró que las poblaciones nativas tardías coincidieran en la floración con las poblaciones precoces, por tal motivo se procedió a trabajarlos como dos dialelos: un dialelo de precoces, integrado por las poblaciones NA, NB, XMY, V-533 y VS-536; y un segundo formado por poblaciones nativas tardías DBK, DBP y DBB y las mejoradas precoces VS-536 y V-533.

La evaluación de las 10 cruzas F_1 's y sus progenitores se realizó en las localidades de Muna y Xoy en 2004, para cada dialelo, respectivamente. En Xoy se sembró el 10 de julio y en Muna el 15 de julio. Xoy se localiza a 160 km al sur de Mérida, Yucatán, con clima Aw_1 (x') (i') g, temperatura media anual de 22.5 °C, la precipitación pluvial en el año de evaluación fue 1050 mm, suelos kankab (cambisoles y luvisoles). Muna se localiza a 71 km al sur de Mérida Yucatán, con clima Aw''_o (i') g, temperatura media anual de 24.5 °C y precipitación en 2004 de 1047 mm, suelos kankab (cambisoles y luvisoles). En esta localidad se dieron tres riegos de auxilio a las parcelas experimentales, porque llovió 111 mm menos que en Xoy en la etapa de crecimiento del maíz. En ambas localidades se fertilizó con la fórmula 30-80-00 N-P-K.

El experimento se estableció como un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. El tamaño de la unidad experimental fue de dos hileras de 5 m de longitud sembrados a 1.0 m entre hileras y 0.5 m entre plantas con dos plantas por golpe, y 40,000 plantas ha^{-1} . Las variables medidas fueron: rendimiento de grano en $t ha^{-1}$ al 15% de humedad (RG), días a floración masculina (DFM) y femenina (DFF), altura de planta (AP) y mazorca (AM). Además de la dureza del grano (DG) determinada mediante el índice de flotación (Salinas *et al.*, 1992; Vázquez *et al.*, 2003).

Los datos se analizaron por localidad y combinado por localidades. El análisis genético estadístico se realizó con el Método 2 Modelo I de Griffing (1956), incluyéndose 10 F_1 y cinco poblaciones progenitoras en cada caso. El análisis individual se realizó con ayuda del programa de Burow y Coors (1993). Para el análisis del dialélico a través de localidades (análisis combinado) se apoyó en la metodología propuesta por Singh (1973). La comparación de medias de ACG se realizó mediante la prueba de Tukey. La significancia de la ACG (t_1) y ACE (t_2) se determinó mediante pruebas de t empleando las fórmulas:

$$t_1 = \frac{\sqrt{\frac{(p-1)}{p(p+2)l}} (cme)}{EE}$$

$$t_2 = \frac{\sqrt{\frac{(p^2+p+2)}{(p+1)(p+2)l}} (cme)}{EE}$$

Donde p = progenitores, l = localidades, cme = cuadrado medio del error (Singh, 1973).

El modelo genético de efectos fijos utilizado para estimar el efecto de la habilidad combinatoria general y específica fue: $Y_{ijk} = \mu + g_i + g_j + s_{ij} + l_k + (gl)_{ik} + (gl)_{jk} + (sl)_{ijk} + \varepsilon_{ijk}$.

Donde: Y_{ijk} = Valor fenotípico observado de la cruce con los progenitores i y j, en la localidad k, μ = Media de la población, l_k = Efecto de la k-ésima localidad, g_i (g_j) = Efecto de ACG para el i-ésimo (j-ésimo) progenitor, s_{ij} = Efecto de ACE de las cruces entre el i-ésimo y el j-ésimo progenitor, $(gl)_{ik}$ = Interacción correspondiente a g_i y l_k , $(gl)_{ij}$ = Interacción correspondiente a g_i y l_j , $(sl)_{ijk}$ = Interacción correspondiente a s_{ij} y l_k y ε_{ijk} = Error experimental.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dialelo con las poblaciones precoces

El análisis de varianza para variedades precoces mostró efecto ($P < 0.01$) de localidad y genotipo en todas las características medidas, excepto rendimiento de grano, para localidad (Tabla 1). El efecto de genotipo sobre la dureza de grano se debió a la acción aditiva de los genes como lo indica el efecto de ACG; mientras que la acción no aditiva de los genes (ACE) fue significativa ($P < 0.01$) para altura de planta, de mazorca y dureza de grano. La interacción localidad x genotipo fue significativa para rendimiento y dureza de grano, la cual se debió, a una respuesta diferente de los genotipos en las localidades estudiadas y al origen del germoplasma evaluado.

Los efectos de ACG fueron más importantes que la ACE para rendimiento de grano y floración, por lo que las poblaciones de maíces aquí estudiadas podrían mejorarse mediante selección. Diversos estudios en México han reportado resultados similares al trabajar con líneas de diversos programas de mejoramiento (Gómez *et al.*, 1988; Reyes *et al.*, 2004), con híbridos comerciales (Villanueva *et al.*, 1994) o con razas de maíz (Barrera *et al.*, 2005).

La media de rendimientos de grano de las poblaciones progenitoras fue 2.85 t ha⁻¹ con una amplitud de 2.03 a 3.28 (Tabla 2). NB y VS-536 fueron las variedades más precoces, de porte bajo y dureza intermedia, mientras que NA fue una de las poblaciones más tardías tanto para días a floración masculina como femenina y de porte intermedio (2.59 m de altura de planta y 1.72 m a la mazorca). En cuanto al comportamiento de las cruza F₁, la media para rendimiento de grano fue 3.12 t ha⁻¹ con una amplitud de 2.58 a 3.70, siendo las mejores NB x VS-536 y NA x VS-536 (3.70 y 3.60 t ha⁻¹, respectivamente); superando también el comportamiento de sus progenitores (Tabla 2). Resultados similares reportaron Coutiño *et al.* (1990) al cruzar poblaciones nativas y mejoradas, las cuales superaron en rendimiento de grano a los progenitores.

El progenitor con el grano más duro fue V-533 (28.91) y el más suave VS-536 (52.54). El 70% de sus cruza tuvieron granos duros y 30% fueron de dureza intermedia (Tabla 2). Esto coincide con Vásquez *et al.* (2003), quienes mencionan que en las poblaciones nativas de México predomina la dureza de grano suave (55%) e intermedia (40%).

Se aprecia en la Tabla 2 que los progenitores más precoces fueron de plantas más bajas y los más tardíos de plantas más altas. La ACG para NA fue positiva y para NB negativa ($P < 0.01$) para las características días a la floración masculina y femenina, altura de planta y mazorca (Tabla 3). En general, los efectos de ACG en todas las características fueron positivas ($P < 0.01$) con excepción de la dureza de grano; sólo V-533

presentó un valor negativo (-7.03). Rendimiento de grano fue negativo en la población XMY (-0.371); es decir que esta población tiende a ser tardía y de mayor porte de planta y mazorca. El rendimiento de grano manifestó valores pequeños de ACG aunque no fueron significativos en su mayoría. Las poblaciones NB y VS-536 que presentaron efectos de ACG altos pero no significativos (0.219 y 0.18,1 respectivamente), estuvieron entre las de mayor rendimiento (Tabla 2). Martín del Campo y Molina (1982) encontraron que las poblaciones de maíz precoces que tuvieron alta ACG presentaron también rendimientos altos. Por otro lado, Reyes *et al.* (2004) mencionan que el alto rendimiento en las cruza se debe a la alta ACG de uno o de los dos progenitores. Esta tendencia se observó en el caso de las cruza NB x VS-536 y NA x VS-536 que encabezaron la lista por alto rendimiento (3.70 y 3.60 t ha⁻¹, respectivamente) y en ambos casos VS-536 fue la que presentó los más altos efectos de ACG aunque no fue estadísticamente diferente (Tabla 2).

Para ACE se observó efecto positivo y significativo sólo para altura de mazorca en la cruza NA x VS-536 (Tabla 4). Esto indica que en la herencia de esta cruza participaron genes no aditivos. La acción no aditiva de los genes fue reducida en las cruza de maíces precoces, una sola cruza en 10 posibles; esta escasa participación de genes no aditivos en las cruza puede deberse a que los progenitores tienen amplia variación genética y a mayores efectos aditivos como se corrobora con los altos valores de ACG encontrados en las variables estudiadas (Tabla 3).

Tabla 1. Cuadrados medios para características agronómicas del dialelo con maíz precoces evaluados en Muna y Xoy, Yucatán, 2004.

Fuente de variación	G.L.	Rendimiento de grano (t ha ⁻¹)	Floración masculina (d)	Floración femenina (d)	Altura de planta (m)	Altura de mazorca (m)	Dureza del grano (%)
Localidad	1	3.307NS	1960.2**	2193.1**	35.046**	20.022**	14207.1**
Bloque (Loc.)	6	2.092NS	3.3NS	5.1NS	0.018NS	0.017*	591.3*
Genotipos	14	1.385**	91.7**	91.6**	0.603**	0.495**	714.0**
ACG	4	3.438**	316.1**	314.6**	2.010**	1.643**	1355.1**
ACE	10	0.565NS	2.0NS	2.4NS	0.040**	0.036**	457.5**
Loc. x gen.	14	2.000**	2.5NS	2.7NS	0.005NS	0.010NS	438.4**
Loc. x ACG	4	6.200**	0.8NS	2.1NS	0.001NS	0.017NS	394.1NS
Loc. x ACE	10	0.320NS	3.1NS	2.9NS	0.007NS	0.007NS	456.1**
Error	84	0.346	2.1	2.0	0.010	0.009	162.9
CV (%)		19.4	2.2	2.0	4.2	5.9	31.9

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$.

Tabla 2. Comportamiento medio de las características evaluadas en maíz precoz en Muna y Xoy Yucatán, 2004.

Genotipos	Rendimiento de grano (t ha ⁻¹)	Floración masculina (d)	Floración femenina (d)	Altura de planta (m)	Altura de mazorca (m)	Dureza del grano (%)
Progenitores						
NA	3.27 a	70.25 a	74.00 a	2.59 b	1.72 b	42.54 ab (I)
NB	3.28 a	64.50 b	68.62 b	2.21 c	1.41 c	41.42 ab (I)
XMY	2.03 c	69.87 b	73.87 a	2.65 b	1.79 b	37.58 ab (D)
V-533	2.57 bc	71.62 a	75.62 a	2.84 a	1.98 a	28.91 b (D)
VS-536	3.09 ab	60.25 c	64.12 c	1.79 d	1.01 d	52.54 a (I)
Promedio	2.85	67.30	71.25	2.42	1.58	40.60
Cruzas						
NA x NB	3.02 ab	67.62 bc	71.75 bc	2.35 c	1.50 bc	58.08 a (I)
NA x XMY	2.58 b	70.00 ab	73.62 ab	2.62 a	1.72 a	34.95 b (D)
NA x V-533	3.16 ab	71.12 a	74.75 a	2.70 a	1.80 a	36.37 ab (D)
NA x VS-536	3.60 ab	66.62 cd	70.25 cd	2.38 bc	1.53 bc	58.00 a (I)
NB x XMY	3.09 ab	66.25 cd	69.87 cd	2.29 c	1.45 c	40.16 ab (I)
NB x V-533	3.09 ab	67.75 bc	71.75 bc	2.54 ab	1.65 a	26.04 b (D)
NB x VS-536	3.70 a	62.25 e	66.12 e	2.05 d	1.26 d	37.50 ab (D)
XMY x V-533	2.76 ab	70.25 a	74.37 a	2.66 a	1.81 a	35.96 b (D)
XMY x VS-536	3.10 ab	64.25 de	68.12 de	2.28 c	1.41 dc	35.08 b (D)
V-533 x VS-536	3.13 ab	66.00 cd	69.75 cd	2.40 bc	1.54 bc	35.13 b (D)
Promedio	3.12	67.21	71.03	2.43	1.57	39.83

D = Duro, I = Intermedio; progenitores y cruzas con distinta literal son estadísticamente diferentes (Tukey, P < 0.05).

Tabla 3. Efectos de la aptitud combinatoria general para seis características agronómicas en maíces precoces evaluados en Muna y Xoy, Yucatán, 2004.

Progenitor	Rendimiento de grano (t ha ⁻¹)	Floración masculina (d)	Floración femenina (d)	Altura de planta (m)	Altura de mazorca (m)	Dureza del grano (%)
NA	0.101	1.775**	1.675**	0.099**	0.081**	4.569
NB	0.181	-1.511**	-1.414**	-0.126**	-0.107**	0.587
XMY	-0.371**	1.007**	1.014**	0.086**	0.077**	-2.599
V-533	-0.130	2.132**	2.175**	0.204**	0.189**	-7.027*
VS-536	0.219	-3.403**	-3.450**	-0.263**	-0.240**	4.469
EE	0.140	0.349	0.340	0.024	0.023	3.049

*P < 0.05; **P < 0.01; EE = Error estándar.

Tabla 4. Efectos de la aptitud combinatoria específica para seis características agronómicas en maíces precoces evaluadas en Muna y Xoy, Yucatán, 2004.

Cruzas	Rendimiento dgrano (t ha ⁻¹)	Floración masculina (d)	Floración femenina (d)	Altura de planta (m)	Altura de mazorca (m)	Dureza del grano (%)
NA x NB	-0.298	0.119	0.381	-0.046	-0.046	12.84
NA x XMY	-0.183	-0.024	-0.173	0.011	-0.009	-7.10
NA x V-533	0.154	-0.024	-0.208	-0.030	-0.039	-1.25
NA x VS-536	0.249	1.012	0.917	0.125	0.119*	8.88
NB x XMY	0.244	-0.488	-0.833	-0.092	-0.095	2.09
NB x V-533	0.006	-0.113	-0.119	0.041	-0.003	-7.60
NB x VS-536	0.271	-0.077	-0.119	0.018	0.033	-7.64
XMY x V-533	0.234	-0.131	0.074	-0.053	-0.032	5.50
XMY x VS-536	0.221	-0.595	-0.548	0.033	0.002	-5.87
V-533 x VS-536	0.006	0.030	-0.083	0.035	0.019	-2.401
EE	0.363	0.901	0.878	0.070	0.058	7.875

*P < 0.01; **P < 0.01; EE = Error estándar.

Dialelo con las poblaciones tardías

El análisis de varianza muestra que localidad y genotipo fueron factores importantes ($P < 0.01$) en todas las características estudiadas (Tabla 5). ACG y ACE fueron significativas ($P < 0.05$ ó $P < 0.01$) siendo en todos los casos los efectos de ACG los de mayor importancia en explicar la variación observada. La interacción localidad x genotipo fue significativa ($P < 0.01$) sólo para rendimiento de grano y altura de planta, mientras que la interacción localidad x ACG lo fue para todas las variables (excepto altura de mazorca). Localidad x ACE sólo fue significativa para rendimiento de grano y altura de planta. Lo anterior indica que la respuesta observada principalmente en el rendimiento de grano no solamente se debe al potencial genético de las poblaciones nativas y mejoradas, sino también contribuyen efectos ambientales y de interacción genotipo x ambiente.

El rendimiento de grano presentó una media de 2.53 t ha⁻¹ con una amplitud de 2.04 a 3.06 t ha⁻¹, sobresaliendo la población VS-536 con 3.06 t ha⁻¹, esto era de esperar dado que es una variedad mejorada precoz dentro de poblaciones tardías (Tabla 6). De las poblaciones tardías la mejor fue DBB con 2.52 t ha⁻¹. En general, las tres poblaciones tardías (DBK, DBP y DBB) (mayor de 76 días a floración femenina) fueron de porte alto (más de 3.0 m de altura de planta y mayor de 2.30 m a la altura de mazorca) y de dureza de grano intermedia. En las cruzas F₁ entre germoplasma precoz mejorado y poblaciones nativas, la media para rendimiento de grano fue 2.82 t ha⁻¹ con una amplitud de 2.13 a 3.66 t ha⁻¹, donde las mejores cruzas fueron DBB x VS-536, DBK x VS-536 y DBP x VS-536 (3.66, 3.12 y 3.11 t ha⁻¹, respectivamente), las cuales superaron en rendimiento al comportamiento de sus progenitores en más de 0.5 t ha⁻¹, además son precoces (alrededor de 67 días a la floración femenina) con menor porte (menos de 2.70 de altura de planta) y dureza intermedia. Es decir que la cruce entre poblaciones nativas tardías y el mejorado precoz combina bien y pudiera ser una buena alternativa para mejorar las poblaciones nativas sobre todo que las mejoradas han sido adoptadas por productores por sus buenas características de rendimiento de grano.

Los efectos de ACG para rendimiento fueron positivos para VS-536 ($P < 0.01$) y para DBB ($P > 0.05$), siendo que el resto de las poblaciones presentaron valores negativos (Tabla 7). Las tres poblaciones tardías (DBK, DBP y DBB) presentaron valores altos y significativos de ACG para días a floración masculina y femenina, y altura de planta y mazorca, es decir en promedio en cruzamientos tienden a ser más tardíos y de mayor porte. Contrariamente la VS-536 que es precoz presenta efectos negativos tanto para precocidad como para porte de planta. Es decir que esta población transfiere estas características en sus cruzas con maíz tardío lo que da como resultado híbridos de mejor rendimiento de grano, con precocidad y de menor porte, tal como se observó en las cruzas DBB x VS-536, DBK x VS-536 y DBP x VS-536 (Tabla 6).

Los efectos de ACE fueron reducidos en las cruzas entre maíces tardíos y precoces, pues sólo altura de planta y mazorca presentó efectos positivos significativos para la cruce DBK x DBB (0.1575 y 0.1322, respectivamente), mientras que fueron positivos y altamente significativos para V-533 x VS-536; además esta última cruce fue positiva y significativa para días a la floración femenina, pero negativa y significativa para la dureza de grano (Tabla 8). Sin embargo, en rendimiento, no se encontró efecto positivo y significativo de ACE en ninguna de las cruzas, aun cuando DBB x VS-536 presentó el valor más alto (0.545). Asumiendo que los efectos de ACE son una medida de heterosis (Han *et al.*, 1991), los resultados encontrados indican poca heterosis entre las poblaciones estudiadas. Al respecto Cress (1966) menciona 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. Por otro lado, Barrera *et al.* (2005) al estudiar cruzamientos entre poblaciones nativas por mejorados y realizar selección por siete ciclos, encontraron una reducción de los efectos no aditivos. Lo anterior lo explicaron porque la selección acumuló genes aditivos en las características que estudiaron, lo que dio como resultado la reducción de genes no aditivos en las poblaciones analizadas.

Tabla 5. Cuadrados medios para características agronómicas del dialelo con maíz tardío evaluados en Muna y Xoy, Yucatán, 2004.

Fuente de variación	GL	Rendimiento de grano (t ha ⁻¹)	Floración Masculina (d)	Floración femenina (d)	Altura de planta (m)	Altura de mazorca (m)	Dureza del grano (%)
Localidad	1	39.60**	1038.4**	1056.1**	21.726**	15.294**	33756.3**
Bloque (Localidad)	6	0.17NS	2.3*	2.9NS	0.009NS	0.007NS	376.8NS
Genotipos	14	1.46**	263.9**	277.0**	1.363**	1.229**	1284.7**
ACG	4	3.01**	908.9**	950.2**	4.519**	4.083**	3383.7**
ACE	10	0.84**	5.9**	7.7**	0.1**	0.087**	445.1**
Localidad x genotipo	14	2.57**	2.5NS	2.1NS	0.036**	0.020NS	226.7NS
Localidad x ACG	4	7.70**	5.5**	3.9*	0.06**	0.021NS	535.2**
Localidad x ACE	10	0.52*	1.3NS	1.3NS	0.026*	0.020NS	103.3NS
Error	84	0.25	1.5	1.6	0.013	0.011	128.4
CV (%)		18.5	1.7	1.6	3.9	5.2	21.3

*P < 0.05, **P < 0.01.

Tabla 6. Comportamiento medio de las características evaluadas en maíz tardío en Muna y Xoy Yucatán, 2004.

Genotipo	Rendimiento de grano (t ha ⁻¹)	Floración masculina (d)	Floración femenina (d)	Altura de planta (m)	Altura de mazorca (m)	Dureza del grano (%)
Progenitor*						
DBK	2.35 ab	76.87 b	80.75 b	3.15 a	2.35 a	60.59 a (I)
DBP	2.04 b	76.75 b	80.50 b	3.22 a	2.33 a	57.75 a (I)
DBB	2.52 ab	79.62 a	84.25 a	3.28 a	2.34 a	57.12 a (I)
V-533	2.66 ab	72.62 c	76.75 c	2.90 b	1.98 b	33.12 b (D)
VS-536	3.06 a	59.00 d	63.00 d	1.83 c	1.05 c	63.21 a (S)
Promedio	2.53	72.97	77.05	2.88	2.01	54.36
Cruzas						
DBK x DBP	2.76 bc	76.62 ab	80.50 abc	3.23 a	2.37 a	71.38 a (S)
DBK x DBB	2.71 bc	77.75 a	82.12 a	3.40 a	2.49 a	68.00 a (S)
DBK x V-533	2.52 bc	75.00 bc	78.87 bc	2.97 b	2.10 b	45.08 bcd (I)
DBK x VS-536	3.12 ab	66.87 d	70.37 d	2.49 c	1.62 d	60.42 ab (I)
DBP x DBB	2.13 c	76.37 abc	80.75 ab	3.28 a	2.39 a	52.83 abc (I)
DBP x V-533	2.35 bc	74.62 c	78.62 c	3.00 b	2.15 b	47.71 bc (I)
DBP x VS-536	3.11 ab	67.00 d	70.75 d	2.61 c	1.73 cd	53.08 abc (I)
DBB x V-533	2.96 ab	75.37 bc	79.37 bc	2.97 b	2.14 b	39.38 dc (I)
DBB x VS-536	3.66 a	67.50 d	71.25 d	2.63 c	1.70 cd	60.63 ab (I)
V-533 x VS-536	2.90 abc	67.37 d	71.37 d	2.66 c	1.81 c	26.54 d (D)
Promedio	2.82	72.45	76.40	2.92	2.05	52.50

*Progenitores y cruzas con literales distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

Tabla 7. Efectos de la aptitud combinatoria general para seis características agronómicas en maíces tardíos evaluados en Muna y Xoy, Yucatán, 2004.

Progenitor	Rendimiento de grano (t ha ⁻¹)	Floración masculina (d)	Floración femenina (d)	Altura de planta (m)	Altura de mazorca (m)	Dureza del grano (%)
DBK	-0.0750	2.0357**	1.954**	0.1349**	0.1511**	6.759*
DBP	-0.2710*	1.7678**	1.704**	0.1599**	0.1554**	3.109
DBB	0.2143	2.9285**	3.186**	0.1995**	0.1679**	2.335
V-533	-0.0421	0.2678	0.293	-0.0061	-0.0095	-13.397**
VS-536	0.3667**	-7.000**	-7.136**	-0.4882**	-0.4649**	1.193
EE	0.2101	0.2951	0.299	0.0264	0.0244	2.707

*P < 0.05; **P < 0.01, EE = Error estándar.

Tabla 8. Efectos de la aptitud combinatoria específica para seis características agronómicas en maíces tardíos evaluadas en Muna y Xoy, Yucatán, 2004.

Cruzas	Rendimiento de grano (t ha ⁻¹)	Floración masculina (d)	Floración femenina (d)	Altura de planta (m)	Altura de mazorca (m)	Dureza del grano (%)
DBK x DBP	0.3844	0.1964	0.2261	0.0321	0.0297	8.385
DBK x DBB	0.0419	0.1607	0.3690	0.1575*	0.1322*	5.782
DBK x V-533	-0.0845	0.0714	0.0119	-0.0717	-0.0752	-1.401
DBK x VS-536	0.1015	-0.7871	-1.0595	-0.0671	-0.1048	-0.658
DBP x DBB	-0.3470	-0.9464	-0.7559	0.0100	0.0354	-5.733
DBP x V-533	-0.0559	-0.0357	0.0119	-0.0567	-0.0345	4.874
DBP x VS-536	0.2926	-0.3928	-0.4345	0.0303	0.0033	-4.341
DBB x V-533	0.2540	-0.4464	-0.7202	-0.1264	-0.0570	-2.685
DBB x VS-536	0.5451	-1.0535	-1.4166	-0.0082	-0.0366	3.975
V-533 x VS-536	-0.1488	1.4821	1.6011*	0.2414**	0.2458**	-14.377*
EE	0.3103	0.7626	0.7730	0.0700	0.0640	6.993

*P < 0.05; P < 0.01; EE = Error estándar.

CONCLUSIONES

Los mejores progenitores en las poblaciones de maíces precoces de acuerdo con su ACG en rendimiento de grano, fueron las poblaciones VS-536, NB y NA, y en los maíces tardíos fue DBB, por lo que es posible su mejoramiento por selección. Las poblaciones nativas NA, NB, DBB y DBK, al cruzarlas con el maíz mejorado VS-536 mostraron un ligero incremento del rendimiento de grano, disminuyó la altura de la planta y la longitud del ciclo haciéndolas más precoces, además que mantuvieron la dureza de grano de las poblaciones nativas, lo que es favorable para su mejoramiento genético. Por tanto, las combinaciones de poblaciones nativas mejoradas son un material base para el mejoramiento participativo de maíz para el sistema milpa en la Península de Yucatán.

AGRADECIMIENTOS

Al Sistema Nacional de Recursos Fitogenéticos, promovido por Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas de la SAGARPA, por el financiamiento recibido para los trabajos de campo; al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para la realización de los estudios de Doctorado en Ciencias Agropecuarias del autor principal.

REFERENCIAS

Aguilar, G., Castillo, R., Rodríguez, J., Martín, V. 1990. V-533 variedad supertardía de maíz para el sistema milpa de Yucatán y Quintana Roo. SARH. INIFAP. CIFAP-YUC. Campo Experimental de Uxmal.

Folleto técnico Núm. 4. Mérida Yucatán, México. 12 p.

Barrera, E., Muñoz, A., Márquez, F., Martínez, A. 2005. Aptitud combinatoria en razas de maíz mejoradas por retrocruza limitada. I. Caracteres agronómicos. Revista Fitotecnia Mexicana 28: 231-242.

Burgos, L., Chávez, J., Ortíz, J. 2004. Variabilidad morfológica de maíces criollos de la península de Yucatán. En: Manejo de la Diversidad de los Cultivos en los Agroecosistemas Tradicionales. Chávez, J., Tuxill, J., Jarvis, D. (eds). Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos. Cali Colombia. pp. 58-66.

Burow, M., Coors, G. 1993. Diallel analysis and simulation. University of Wisconsin Madison. Department of Agronomy. Madison, Wisconsin. USA. 60 p.

Coutiño, B., Ángeles, H., Martínez, A. 1990. Variabilidad genética en cruza dialélicas de maíz (*Zea mays* L.) formadas con poblaciones tropicales sobresalientes. Agrociencia 24: 143-156.

Cress, C.F. 1966. Heterosis of the hybrid related to gene frequency differences between two populations. Genetics 53: 269-274.

Chávez, J., Canul, J., Burgos, L., Márquez, F. 2004. Beneficios potenciales del mejoramiento participativo de maíz en el sistema-roza tumba y quema de Yucatán, México En: Manejo de la Diversidad de los Cultivos en

- los Agroecosistemas Tradicionales. Chávez, J., Tuxill, J., Jarvis, D. (eds). Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos. Cali, Colombia. pp. 175-187.
- Gómez, A., Ávila, M., Ángeles, H., Díaz, C., Ramírez, H., Alejo, A., Terrón, A. 1996. Híbridos y variedades de maíz liberados por el INIFAP hasta 1996. Publicación Especial No.16. INIFAP-SAGAR. Toluca, México. 103 p.
- Gómez, M., Latournerie, L., Arias, L., Canul, J., Tuxill, J. 2004. Sistema informal de abastecimiento de semillas de los cultivos de la milpa de Yaxcabá, Yucatán En: Manejo de la Diversidad de los Cultivos en los Agroecosistemas Tradicionales. Chávez, J., Tuxill, J., Jarvis, D. (eds). Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos. Cali, Colombia. pp. 150-156.
- Gómez, N., Valdivia, R., Mejía, H. 1988. Dialélico integrado con líneas de diferentes programas de maíz para la región cálida. Revista Fitotecnia Mexicana 11: 103–120.
- Griffing, B. 1956. Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. Australian Journal of Biological Sciences 9: 436-439.
- Hallauer, A. R., Miranda J. B. 1981. Quantitative genetics in maize breeding. Iowa State University Press. Ames. 468 p.
- Han, G.C., Vasal, S.K., Beck, D.L., Elias, E. 1991. Combining ability of inbred lines derived from CIMMYT (*Zea mays* L.) germplasm. Maydica 36: 57-64.
- INEGI. 2005. Anuario Estadístico del Estado de Yucatán. INEGI. pp. 601, 617 y 705.
- INEGI. 2006 a. Anuario Estadístico del Estado de Campeche. INEGI. p. 333.
- INEGI. 2006 b. Anuario Estadístico del Estado de Yucatán. INEGI. p.705.
- INEGI. 2006 c. Anuario Estadístico del Estado de Quintana Roo. INEGI. p. 299.
- Martín del Campo, S., Molina, J. 1982. Aptitud combinatoria, heterosis y estabilidad en tres grupos de poblaciones de maíz en el centro-norte de México. Agrociencia 47: 103-116.
- Ortega, R. 2000. Los proyectos de conservación *in situ* y el mejoramiento participativo de maíz en México. Revista de Geografía Agrícola 31: 97-108.
- Ortiz, J. 1993. El fitomejoramiento como disciplina científica. Ciencia (núm. especial) 85-94.
- Reyes, D., Molina, J., Moreno, E. 2004. Cruzas dialélicas entre líneas autofecundadas de maíz derivadas de la raza Tuxpeño. Revista Fitotecnia Mexicana 27: 49-56.
- Salinas, Y., Martínez, F., Gómez, J. 1992. Comparación de métodos para medir la dureza del maíz (*Zea mays* L.) Archivos Latinoamericanos de Nutrición 42: 59-63.
- Singh, D. 1973. Diallel analysis for combining ability over several environments-II. Indian Journal of Genetics Plant Breeding 33: 469-481.
- Sprague, G., Tatum, L. 1942. General vs specific combining ability in single crosses of corn. Journal of the American Society of Agronomy 43: 923-932.
- Vázquez, M., Guzmán, L., Andrés, J., Márquez, F., Castillo, J. 2003. Calidad de grano y tortillas de maíces criollos y sus retrocruzas. Revista Fitotecnia Mexicana 26: 321-238.
- Villanueva, C., Castillo, F., Molina, J. 1994. Aprovechamiento de cruzamientos dialélicos entre híbridos comerciales de maíz: Análisis de progenitores y cruzas. Revista de Fitotecnia Mexicana 17: 175-185.

Submitted April 23, 2010 – Accepted July 28, 2010
Revised received August 17, 2010