

SELECCIÓN MASAL PARA LA ADAPTACIÓN A CLIMA TEMPLADO DE RAZAS TROPICALES Y SUB-TROPICALES DE MAÍZ DE MÉXICO

Alberto Pérez-Colmenárez¹, José Molina-Galán², Ángel Martínez-Garza²,
Pedro García-M.¹ y Delfino Reyes-López³

RESUMEN

México es considerado el lugar donde se encuentra la mayor diversidad genética del maíz (*Zea mays* L.). Sin embargo, el aprovechamiento de esa diversidad se ha limitado al desarrollo de variedades e híbridos de germoplasma proveniente de razas adaptadas a cada región agrícola por lo que la adaptación de germoplasma se presenta como una opción para ampliar la variabilidad genética en los programas de mejoramiento genético. La selección masal visual (SMV), utilizando el aspecto de planta y mazorca como criterio de selección, es una estrategia en los programas de mejoramiento para adaptar germoplasma exótico. Considerando el valor potencial que ofrece el germoplasma exótico, a partir del año 1989 se sometieron tres razas de maíz de clima subtropical y siete del trópico de México a selección masal visual (SMV) para adaptación en Montecillo, estado de México, donde prevalecen condiciones de clima templado. Durante el ciclo primavera-verano de 1998 en Montecillo y Tecámac fueron evaluadas la variedad original de cada raza, ocho o nueve ciclos de SMV obtenidos de cada raza y cinco variedades locales, en un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. En general, el último ciclo de selección de las razas superó en rendimiento a las variedades locales, lo cual sugiere que SMV fue un método efectivo en la adaptación de germoplasma. El avance genético promedio por ciclo de selección para rendimiento de mazorca por planta fue de 24,6 % en Pepitilla, 18,2 % en Olotillo, 12,5 % en Nal-Tel, 10,2 % en Tabloncillo, 9,1 % en Tepecintle, 6,6 % en Tuxpeño, 5,6 % en Comiteco, 4,5 en Zapalote Chico, 3,7 % en Vandeño y 2,5 % en Celaya.

Palabras clave adicionales: Avance genético, genotecnia, germoplasma exótico, *Zea mays*

ABSTRACT

Mass selection for adaptation to temperate climate of tropical and sub-tropical races of mexican maize

Mexico is the place with the major genetic diversity of maize (*Zea mays* L.); however, plant breeding programs have been limited to the obtainment of improved open pollinated varieties and hybrids from races adapted to specific agricultural regions, so the adaptation of exotic germplasm is an option to broaden the genetic variability of breeding programs. Visual mass selection (VMS) using the plant and ear aspect as selection criterion is an important strategy in maize breeding programs to adapt exotic germplasm. Considering the potential value that the exotic germplasm has to improve maize, in 1989 three subtropical and seven tropical mexican maize races were submitted to VMS for adaptation in Montecillo, México, where temperate climate conditions prevail. The original varieties, eight or nine VMS cycles of each race plus five local varieties were evaluated for yield in the 1998 spring-summer period at Montecillo and Tecámac, México, in a randomized completely block design with four replications. In general, the last cycle of selection surpassed the yield of local varieties, suggesting that VMS was an effective method to adapt exotic germplasm. The mean genetic advance per VMS cycle for ear yield per plant was 24.6 % in Pepitilla, 18.2 % in Olotillo, 12.5 % in Nal-Tel, 10.2 % in Tabloncillo, 9.1 % in Tepecintle, 6.6 % in Tuxpeño, 5.6 % in Comiteco, 4.5 % in Zapalote Chico, 3.7 % in Vandeño, and 2.5 % in Celaya.

Additional key words: Genetic advance, plant breeding, exotic germplasm, *Zea mays*

Recibido: Febrero 13, 2007

Aceptado: Septiembre 28, 2007

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA), CIAE Portuguesa. Apdo. 102. Araure, estado Portuguesa. Venezuela. e-mail: perezcol@cantv.net; pejoga@cantv.net.

² Colegio de Posgraduados. C.P. 56230 Montecillo, estado de México. México. e-mail: jmolina@colpos.colpos.mx.

³ Unidad Académica de Ingeniería Agrohídrica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. San Juan Acateno, Teziutlan. Puebla. México. e-mail: delfino.reyes@fia.buap.mx

INTRODUCCIÓN

México es considerado el centro de origen y lugar donde se encuentra la mayor diversidad genética de maíz (Goodman, 1988), con la existencia de alrededor de 50 razas (Sánchez y Goodman, 1992). Sin embargo, a pesar de la amplia variabilidad genética, sólo se han desarrollado cultivares de las razas Tuxpeño en el trópico húmedo, Celaya y Cónico Norteño en el Bajío, y Chalqueño y Cónico en los Valles Altos (Castillo, 1994), lo que indica que el aprovechamiento de la variación genética en la obtención de variedades e híbridos se ha limitado al uso de germoplasma localmente adaptado. Esto sugiere buscar opciones orientadas a incorporar una nueva variabilidad genética en los programas de mejoramiento genético (Goodman, 1985).

La introducción y posterior adaptación de germoplasma exótico han sido practicadas para ampliar la base genética en programas de mejoramiento (San Vicente y Hallauer, 1993) y disponer de una fuente de genes de resistencia a enfermedades y plagas (Russell y Guthrie, 1991), y alelos favorables para rendimiento, incremento de la variabilidad genética para la calidad de proteína y para resistencia a estreses bióticos y abióticos (Bhatnagar et al., 2004; Betrán et al., 2006) e incremento de la heterosis (Goodman, 1992).

Los métodos de selección recurrente fueron desarrollados para mejorar de manera sistemática características heredables de una población (Paterniani, 1990; Hallauer, 1994), siendo la selección masal el método más antiguo y simple utilizado en maíz (Pandey y Gardner, 1992). Este método tomó gran interés después que Gardner (1961) sugirió y desarrolló la selección masal estratificada como un procedimiento para controlar el efecto ambiental en el rendimiento individual de las plantas. Debido a las limitaciones de tipo práctico de este método, Molina (1983) propuso efectuar la selección masal en forma visual, método al que denominó selección masal visual estratificada.

Numerosos estudios han sido realizados utilizando la selección masal estratificada como método para mejorar el rendimiento y sus componentes (Paterniani, 1990; Pandey y Gardner, 1992; Hallauer, 1994), para modificar caracteres agronómicos de importancia económica

(Hallauer, 1985), así como en la adaptación de poblaciones exóticas a áreas específicas (San Vicente y Hallauer, 1993; Pérez et al., 2000).

El objetivo del presente trabajo fue estimar la respuesta a la selección masal visual, mediante el rendimiento de mazorca por planta, de diez razas de maíz provenientes del trópico y subtropico de México para adaptación al área de Montecillo, estado de México, donde prevalecen condiciones de clima templado.

MATERIALES Y MÉTODOS

El material genético estuvo constituido por el ciclo original de nueve colecciones y de una variedad de polinización libre, representativas de diez de las 25 razas de maíz descritas por Wellhausen et al. (1951), varios ciclos mejorados de cada una de las mismas más 5 variedades testigos (Cuadro 1). Todas las variedades están adaptadas al trópico y subtropico de México.

La selección para adaptación se inició a partir del año 1989 en Montecillo, estado de México. Las variedades introducidas fueron sometidas a selección masal visual (Molina, 1983), obteniéndose ocho ciclos de selección en Zapalote Chico y Tuxpeño, y nueve ciclos de selección en las ocho razas restantes.

La selección en cada variedad se realizó en parcelas de 15 surcos de 10 m de longitud, con una separación de 0,80 m entre surcos y 0,30 m entre plantas, estableciéndose lotes de selección de 510 plantas. En cada lote se efectuaron cruzamientos fraternales entre las plantas más sanas y de mejor aspecto visual. A la cosecha se escogieron las 200 mejores mazorcas en cuanto a sanidad y aspecto; con igual número de semillas de cada mazorca se formó un compuesto balanceado. Este procedimiento de selección se siguió en cada ciclo de selección.

En el ciclo primavera-verano de 1998, en los campos experimentales del Colegio de Postgraduados ubicados en Montecillo y Tecámac, en el estado de México, se evaluaron la variedad original de cada raza, seis o siete compuestos de cada una de las colecciones incluídas en el estudio de las cuales hubo semilla disponible, y cinco variedades locales utilizadas como testigos. Montecillo se localiza en 19° 29' N a una altitud de 2250 msnm. Según García (1988), posee un clima templado húmedo con precipitación anual

de 645 mm en el verano y temperatura que varía entre 12 y 18 °C. Los suelos pertenecen al orden Mollisol y presentan alta salinidad y alcalinidad. Por su parte, Tecámac se localiza en 19° 41' N, con altitud de 2294 msnm, con clima seco y

lluvias en verano, precipitación anual de 560 mm y temperatura que oscila entre 11,9 y 17,2 °C. Los suelos pertenecen al orden Verstisol, de textura franco-arcillosa, ligeramente alcalinos y de baja fertilidad.

Cuadro 1. Razas de maíz utilizadas, colección representativa de cada raza, ciclos evaluados en cada colección, altitud de distribución y región de origen de las razas

Raza	Colección	Ciclos evaluados	Altitud (msnm)	Región de origen
Pepitilla	Morelos-17	C ₀ , C ₃ al C ₇ y C ₉	1000-1500	Trópico seco
Tabloncillo	Jalisco-63	C ₀ , C ₂ al C ₇ y C ₉	0-1500	Subtrópico
Comiteco	Chiapas-39	C ₀ , C ₃ al C ₇ y C ₉	1100-1500	Subtrópico
Celaya	Guanajuato-20	C ₀ , C ₂ al C ₇ y C ₉	1200-1800	Subtrópico
Vandño	Chiapas-30	C ₀ , C ₂ al C ₇ y C ₉	0-500	Trópico seco
Tepecintle	Chiapas-76	C ₀ , C ₃ al C ₇ y C ₉	100-600	Trópico húmedo
Olotillo	Chiapas-56	C ₀ , C ₂ al C ₇ y C ₉	300-700	Trópico húmedo
Nal-Tel	Yucatán-7	C ₀ , C ₂ al C ₇ y C ₉	100	Trópico húmedo
Zapalote Chico	Oaxaca-48	C ₀ , C ₂ al C ₆ y C ₈	100	Trópico húmedo
Tuxpeño	V-520 C	C ₀ , C ₂ al C ₆ y C ₈	0-500	Trópico húmedo
Testigos	Cónico Compuesto (C ₁₀), Compuesto Universal (C ₀), Compuesto Universal (C ₁₂), México Grupo 10 (C ₀) y México Grupo 10 (C ₆)			

Debido a la alta uniformidad de los lotes experimentales, se usó un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Cada repetición se subdividió en cuatro sub-bloques de 20 variedades cada uno, con el fin de tener lo más compacta posible la repetición en un bloque. El tamaño de la parcela experimental estuvo integrado por dos surcos de 4,50 m de longitud, separados a 0,80 m. La siembra se realizó colocando cuatro semillas cada 0,50 m, para luego aclarar a dos plantas, generando una densidad de población de 50.000 plantas por hectárea. El manejo agronómico de los experimentos se realizó de acuerdo con las prácticas recomendadas para una óptima producción de maíz.

Los datos de los experimentos fueron analizados usando el programa estadístico SAS (versión 6.0, Cary, NC). En este análisis únicamente se consideró el rendimiento de mazorca por planta (RMP), el cual se obtuvo al dividir el peso de mazorca de cada parcela entre el número de plantas por parcela, transformado a materia seca. Se realizó un análisis de varianza combinando las dos localidades. En la derivación de los cuadrados medios esperados y para la realización de las pruebas de F, los materiales genéticos y localidades se consideraron como

factores fijos; estas últimas no fueron consideradas como aleatorias debido a que los dos campos donde se llevó a cabo el estudio poseen condiciones de ambiente muy particulares al haberse acondicionado para el desarrollo de actividades experimentales, por lo que no se podían considerar representativos de los campos de los productores; de este modo el cuadrado medio del error general fue usado para las pruebas de significancia de cada factor de variación (McIntosh, 1983). La suma de cuadrados de materiales genéticos se dividió en ciclos de selección dentro de razas, testigos y el contraste de ciclos de selección contra testigos. La suma de cuadrados de ciclos de selección dentro de cada raza se dividió en el componente lineal, cuadrático y residual, mediante el ajuste de un modelo de regresión lineal-cuadrático. La respuesta a la selección de cada raza se estimó mediante un análisis de regresión lineal simple del rendimiento de mazorca por planta de cada compuesto de selección, sobre el número de ciclos de selección. El avance genético promedio por ciclo de selección se expresó en porcentaje del comportamiento promedio de la variedad original (C₀). Adicionalmente, se obtuvo el

avance genético porcentual acumulado de todos los ciclos de selección obtenidos en cada raza. Se realizó un análisis de regresión lineal simple por intervalos de cuatro y cinco ciclos de selección.

La comparación de medias para el carácter estudiado se efectuó mediante la prueba de Tukey. La diferencia mínima significativa honesta (DSH) de la prueba de medias se calculó con los grados de libertad y el cuadrado medio del error general, considerando el número de medias de cada fuente de variación para la obtención del valor estandarizado.

RESULTADOS

En el análisis de varianza combinado de las dos localidades de prueba para el carácter rendimiento de mazorca por planta (Cuadro 2), se observan diferencias altamente significativas ($P \leq 0,01$) entre localidades, ciclos de selección y ciclos dentro de las razas Pepitilla, Tabloncillo, Olotillo, Tepecintle, Tuxpeño, Comiteco y Nal-Tel. Hubo diferencias significativas ($P \leq 0,05$) entre ciclos de selección en la raza Celaya mientras que no se detectaron diferencias entre Vandeño y Zapalote Chico.

La interacción del material genético con localidades resultó altamente significativa, debido a la interacción de localidades con testigos y el contraste ciclos dentro de razas contra testigos, ya que los ciclos de selección dentro de cada raza no interaccionaron con las localidades. En el Cuadro 3 se presenta el porcentaje de la variación genética de cada raza, explicada por la regresión lineal y cuadrática del RMP sobre el número de ciclos de selección masal visual.

El efecto lineal resultó ser el más importante, ya que representó entre 81,7 y 96,7 % de la variación total. Este efecto fue altamente significativo en todas las razas, con excepción de Zapalote Chico, aún cuando el efecto lineal en esta raza fue responsable de 92,1 % de la variación total. El porcentaje de la variación explicada por el efecto cuadrático resultó bajo en todas las razas y sólo en Pepitilla y Tuxpeño alcanzó significancia estadística (Cuadro 3).

Se observa que la efectividad de la selección masal visual no fue constante ya que la respuesta varió considerablemente entre razas (Cuadro 4), y con excepción de Zapalote Chico, en todas las

razas hubo incrementos significativos en el rendimiento de mazorca por planta. Este incremento se manifestó de manera significativa en Pepitilla, Olotillo, Nal-Tel, Tabloncillo y Tepecintle, en las cuales hubo ganancias por ciclo de selección de 24,6; 18,2; 12,5; 10,2 y 9,1 %, respectivamente, en relación con el comportamiento promedio de la variedad original (C_0).

Cuadro 2. Cuadrados medios del análisis de varianza del rendimiento de mazorca por planta (RMP) en compuestos de selección masal visual de razas exóticas de maíz. Análisis combinado de dos localidades de Valles Altos, México

Fuente de variación	G.L.	Cuadrados medios
Localidades (L)	1	220106,9 **
Repeticiones/L	6	3385,9 **
Material genético	79	11387,5 **
Ciclos/Razas	74	11418,8 **
Pepitilla	6	10392,4 **
Tabloncillo	7	5228,1 **
Comiteco	6	2531,7 **
Celaya	7	921,9 *
Vandeño	7	477,4 ns
Tepecintle	6	2869,2 **
Olotillo	7	5057,8 **
Nal-Tel	7	1485,0 **
Zapalote Chico	6	234,3 ns
Tuxpeño	6	2788,9 **
Entre Razas	9	71099,8 **
Variedades testigos (Vt)	4	13616,9 **
Ciclos/Razas vs. Vt	1	160,3 ns
Material genético x L	79	1482,0 **
Ciclos/Razas x L	74	1254,1 **
Pepitilla x L	6	272,7 ns
Tabloncillo x L	7	170,2 ns
Comiteco x L	6	200,8 ns
Celaya x L	7	105,2 ns
Vandeño x L	7	30,3 ns
Tepecintle x L	6	295,2 ns
Olotillo x L	7	656,5 ns
Nal-Tel x L	7	39,2 ns
Zapalote Chico x L	6	87,0 ns
Tuxpeño x L	6	222,3 ns
Entre Razas x L	9	8813,9 **
Variedades testigos x L	4	2756,4 **
(Ciclos /Razas vs. Vt) x L	1	13254,0 **
Error	474	458,3 ns
CV(%)	19,74	

ns, *, **: no significativo, significativo al 0,05 y 0,01 de probabilidad, respectivamente

Cuadro 3. Porcentaje de la variación genética y sus respectivos coeficientes, explicada por la regresión lineal y cuadrática del rendimiento de mazorca por planta (g) sobre ciclos de selección masal visual en razas exóticas de maíz evaluadas en Valles Altos, México

Raza	Porcentajes y coeficientes de regresión			
	Lineal		Cuadrática	
Pepitilla	95,0	19,60 **	4,4	-0,84 **
Tabloncillo	86,2	3,98 **	2,4	0,47
Comiteco	89,1	2,83 **	2,8	0,33
Celaya	96,7	3,32 **	0,1	0,04
Vandeño	92,5	0,97 **	3,7	0,18
Tepecintle	92,0	1,34 **	6,8	0,55
Olotillo	92,1	13,59 **	3,7	-0,58
Nal-tel	84,2	9,46 **	12,1	-0,57
Zapalote Chico	92,1	0,90	2,9	0,13
Tuxpeño	81,7	14,75 **	15,4	-1,05 *

*, **: Significancia al 0,05 y 0,01 de probabilidad, respectivamente

En Tuxpeño y Comiteco, los incrementos fueron moderados (6,6 y 5,6 %) y en Vandeño y Celaya fueron bajos (3,7 y 2,5%); en Zapalote Chico el incremento fue de 4,5 %.

El avance genético acumulado en los ocho o nueve ciclos de selección resultó considerablemente alto en la mayoría de las razas, siendo de 221,4 % en Pepitilla, 163,8 % en Olotillo y 112,5 % en Nal-Tel; en las demás razas osciló entre 91,8 y 22,5%.

En los dos intervalos en que fueron divididos los ciclos de selección (Cuadro 4), se puede

observar que en Pepitilla, Olotillo, Nal-Tel y Tuxpeño la respuesta promedio por ciclo fue considerablemente mayor en el primero de ellos (C₀ a C₅); lo contrario ocurrió en Tabloncillo y Tepecintle, donde la respuesta fue mayor en el segundo intervalo (C₅ a C₉). En las razas Celaya, Vandeño, Comiteco y Zapalote Chico, los cambios fueron graduales a través del proceso de selección, resultando muy semejantes las respuestas observadas en los dos intervalos en los que fueron divididos los ciclos de selección.

Cuadro 4. Avance genético promedio por ciclo de selección (b₁ y b₂ (%)) y coeficiente de regresión lineal (b₁) por intervalos del rendimiento de mazorca por planta (g) de compuestos de selección sobre el número de ciclos de selección en razas exóticas de maíz

Raza	b ₁	b ₁ (%)	b ₁ (%) acumulada	b ₁ (C ₀ a C ₅)	b ₁ (C ₅ a C ₉)
Pepitilla	12,1 **	24,6	221,4	15,6 **	7,5
Tabloncillo	8,3 **	10,2	91,8	7,1 **	14,4 **
Comiteco	5,8 **	5,6	50,4	4,2	6,5
Celaya	3,7 **	2,5	22,5	4,0	4,1
Vandeño	2,6 **	3,7	33,3	2,1	3,8
Tepecintle	6,2 **	9,1	81,9	3,9 **	10,0 **
Olotillo	8,4 **	18,2	163,8	11,1 **	6,6
Nal-Tel	4,3 **	12,5	112,5	6,6	2,4
Zapalote Chico ⁺	2,0	4,5	36,0	1,5	3,3
Tuxpeño ⁺	6,4 **	6,6	52,8	9,4 **	1,7

b₁: coeficiente de regresión lineal; b₁ (%): avance genético por ciclo de selección en % de C₀; b₁ (%) acumulada: avance genético acumulado sobre ciclos de selección; ⁺ Sólo se evaluaron ocho ciclos de selección

Celaya fue la raza que mostró la mayor expresión del rendimiento (Cuadro 5), superando significativamente al resto de ellas; en segundo

lugar estuvo la raza Tuxpeño, la cual resultó estadísticamente igual a Comiteco, pero superior a las demás. Comiteco, Tabloncillo y

Pepitilla resultaron estadísticamente iguales, pero superiores a Olotillo y Tepecintle, que a la vez resultaron estadísticamente iguales, pero

superiores a Vandeño, Nal-Tel y Zapalote Chico, siendo éstas últimas significativamente iguales y las de menor rendimiento.

Cuadro 5. Rendimiento de mazorca por planta de compuestos de selección masal visual en razas exóticas de maíz y de variedades testigo probadas en Valles Altos, México

Raza	Ciclos										Promedio por raza
	C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	
Pepitilla	49,2	-	-	104,8	110,6	127,9	139,1	142,7	-	159,0	119,1 c
Tabloncillo	81,1	-	110,3	109,3	121,3	114,7	123,5	131,0	-	171,8	120,4 c
Comiteco	103,4	-	-	108	116,3	126,1	126,8	146,7	-	149,4	125,3 bc
Celaya	145,9	-	154,7	155,8	163,3	165,7	165,9	169,5	-	181,4	162,8 a
Vandeño	69,7	-	73,9	76,2	77,4	80,6	79,4	86,8	-	94,4	79,8 e
Tepecintle	68,0	-	-	78,0	86,4	86,0	94,7	105,4	-	125,6	92,0 de
Olotillo	46,1	-	86,0	89,2	93,3	105,6	105,9	117,0	-	130,0	96,7 d
Nal-Tel	34,4	-	58,3	58,4	67,5	67,2	71,7	74,2	-	77,1	63,6 f
Zapalote Chico	44,7	-	45,9	50,7	51,1	50,9	54,8	-	60,8	-	51,3 f
Tuxpeño	97,0	-	128,8	137,3	136,5	146,3	149,2	-	151,5	-	132,2 b

Variedades testigos					Tukey DSH		
Cónico Compuesto (C ₁₀)	Compuesto Universal (C ₀)	Compuesto Universal (C ₁₂)	México Grupo 10 (C ₀)	México Grupo 10 (C ₆)	Ciclos	Raza	Material genético
38,1	106,0	150,3	97,3	120,9	32,0	12,4	35,3

Letras diferentes indican diferencias significativas entre las medias

- indica compuestos no incluidos en las evaluaciones por no disponer de semilla

DSH = diferencia significativa honesta (Tukey, $P \leq 0,05$) para ciclos de selección, razas y materiales genéticos

De acuerdo al número de días en que ocurrió la antesis, las razas pueden agruparse en: tardías: Olotillo (118 d) y Tuxpeño (115 d); intermedias: Comiteco (108 d), Vandeño (106 d), Pepitilla (102 d), Tepecintle (98 d), Nal-Tel (92 d), Tabloncillo (90 d) y Celaya (90 d) y precoces: Zapalote Chico (74 d). Bajo este agrupamiento, las variedades testigo de la raza Chalqueño quedaron en la categoría de intermedias y Cónico Compuesto SM₁₀ en la precoz.

En la comparación del rendimiento de las razas con el de las variedades testigo, exceptuando Cónico Compuesto SM₁₀, destaca el hecho de que las variedades originales de las razas rindieron menos que las variedades testigo; en cambio, el compuesto del último ciclo de selección los igualó estadísticamente, e inclusive superó a alguna de ellas. El rendimiento de las variedades originales de las razas Nal-Tel y Zapalote Chico fue estadísticamente igual al del testigo Cónico Compuesto SM₁₀, pero el de su compuesto de último ciclo fue mayor.

Con excepción de Nal-tel y Zapalote Chico, el compuesto del último ciclo de selección de todas las razas igualó estadísticamente en rendimiento a

la mejor variedad testigo (Compuesto Universal SM₁₂), aunque en valor numérico la superaron las razas Pepitilla, Tabloncillo y Celaya. Por su parte, el compuesto de último ciclo de selección de Nal-Tel, relativamente precoz, y Zapalote Chico, precoz, igualaron estadísticamente en rendimiento al testigo precoz Cónico Compuesto SM₁₀, aunque mostraron promedios numéricos más altos (Cuadro 5).

DISCUSIÓN

La diferencia altamente significativa entre localidades (Cuadro 2) se atribuye a las marcadas diferencias climáticas y edáficas entre ellas y la diferencia altamente significativa encontrada entre razas es un indicador de las diferencias en la capacidad de rendimiento existente entre éstas. Las diferencias altamente significativas entre ciclos de selección dentro de las razas Pepitilla, Tabloncillo, Olotillo, Tepecintle, Tuxpeño, Comiteco y Nal-Tel (Cuadro 2) reflejan la existencia de variación genética para rendimiento dentro de ellas.

El hecho de no haber detectado diferencias

significativas en la interacción de ciclos de selección dentro de razas con localidades (Cuadro 2) es un indicador de que las diferencias entre ciclos fueron consistentes y que no cambiaron su comportamiento al cambiar de localidad. El significativo y elevado incremento lineal observado en el rendimiento en todas las razas, con excepción de Zapalote Chico, demuestra la efectividad de la selección masal visual en la adaptación de poblaciones exóticas de maíz a condiciones climáticas diferentes a las de su origen; en el caso específico del presente trabajo, de maíces tropicales y subtropicales, a condiciones ecológicas de Valles Altos.

Estos resultados son similares a los obtenidos por Genter (1976), San Vicente y Hallauer (1993) y Pérez et al. (2000) quienes utilizaron el método de selección masal en la adaptación de poblaciones exóticas. Aun cuando la selección masal visual modificó favorablemente las frecuencias génicas de las razas introducidas hasta lograr su adaptación, se observaron diferencias significativas en la respuesta a la selección entre ellas (Cuadro 5). Estas diferencias podrían atribuirse a la capacidad de adaptación de cada raza, de modo que el avance genético dependerá del grado de adaptación existente en el material exótico introducido; esta sería la razón por la cual la mayor respuesta a la selección se observó en las razas que estuvieron menos adaptadas. Estos resultados concuerdan con los de Genter (1976) quien señala que entre menos adaptada esté una población, mayor será la respuesta a la selección en los primeros ciclos de selección, ya que al practicar la selección para adaptación ésta reducirá la frecuencia de individuos menos productivos e incrementará el rendimiento en la población.

En las razas Pepitilla, Olotillo, Nal-Tel y Tuxpeño (Cuadro 5) se obtuvieron incrementos significativos en rendimiento en los tres primeros ciclos de selección lo que explica la mayor respuesta promedio por ciclo obtenida en el primer intervalo (C_0 a C_5) (Cuadro 4). Al respecto, Genter (1976) señala que entre menos adaptadas estén las generaciones previas, mayor será el porcentaje de incremento potencial. A diferencia de las razas anteriores, en Tabloncillo y Tepecintle los mayores incrementos ocurrieron en los ciclos

de selección más avanzados; este resultado podría atribuirse a que en Tabloncillo el rendimiento no aumentó en el ciclo 3 y se redujo en el ciclo 5, mientras que en Tepecintle se redujo en el ciclo 5 (Cuadro 5). Es probable que algunas condiciones ambientales desfavorables durante la obtención de estos ciclos de selección hayan influenciado el comportamiento de este material genético.

Las razas Celaya, Vandefño, Comiteco y Zapalote Chico mostraron incrementos graduales en el rendimiento a través de todo el proceso de selección (Cuadros 4 y 5), lo que explica la falta de diferencias en la respuesta entre el primero y segundo intervalo de selección. Es importante destacar que la ganancia promedio por ciclo de selección observada en Celaya, Vandefño, Comiteco y Zapalote Chico durante todo el proceso de selección, es la más frecuentemente observada al practicar el método de selección masal para incrementar rendimiento de grano en poblaciones tropicales (Paterniani, 1990; Pandey y Gadner, 1992). El comportamiento observado en estas cuatro razas podría atribuirse a que presentaron gran adaptabilidad.

Aún cuando en Tabloncillo y Tepecintle la respuesta media en el rendimiento por ciclo de selección fue muy similar (Cuadro 4), en Tabloncillo los cambios fueron de mayor magnitud, aunque algo inconsistentes, con un incremento considerablemente superior a los ocurridos en Tepecintle cuyos cambios fueron graduales y más consistentes (Cuadro 5). Estas diferencias en el comportamiento entre ambas razas podrían deberse a que Tepecintle presentó mayor adaptabilidad que Tabloncillo, no obstante que el ciclo más avanzado de Tabloncillo fue significativamente superior al de Tepecintle (Cuadro 5).

La respuesta cuadrática negativa y significativa observada en Pepitilla y Tuxpeño (Cuadro 3), podría ser atribuida a una disminución en el avance genético en los ciclos de selección más avanzados (Cuadro 4) debido a una reducción en la variabilidad genética, como consecuencia de una mejor adaptación de estas dos razas conforme se avanzó en el proceso de selección. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Allard y Hanshe (1964), quienes mencionan que al mejorar la adaptación en una población, la variabilidad disminuye, teniendo como resultado una reducción en la capacidad para el cambio.

El mayor efecto de la selección se produjo en Pepitilla y Olotillo, provocando cambios significativos entre el ciclo original y los primeros ciclos de selección, a partir de los cuales los porcentajes de incremento fueron decreciendo conforme las razas se fueron adaptando y se hicieron más productivas (Cuadro 5). Estos incrementos representaron un avance genético promedio por ciclo de selección de 24,6 % en Pepitilla y 18,2 % en Olotillo, lo que hace considerar a estas dos razas como las menos adaptadas de las diez consideradas en el presente estudio. Estos resultados son similares a los obtenidos por Genter (1976) quien observó un incremento medio de rendimiento de 24,3 % por ciclo, al evaluar diez ciclos de selección masal para adaptación en un compuesto formado por 25 razas provenientes del trópico de México.

En términos generales, los materiales originarios del sub-trópico mostraron una tendencia a presentar mayor ganancia promedio en el segundo intervalo (C_5 a C_9), en comparación con la ganancia promedio observada en el primero (C_0 a C_5), mientras que con varios de los materiales tropicales la tendencia fue al contrario. Estos resultados pudieran explicarse por lo propuesto por Genter (1976). En consecuencia, los materiales del trópico se podrían considerar menos adaptados a los Valles Altos que los del sub-trópico, debido a la mayor diferencia climática existente entre ellos, en comparación con la existente entre los de los Valles Altos y el sub-trópico, por lo que se podía esperar que dichos genotipos presentaran una mayor ganancia en los primeros ciclos, como evidentemente la mostraron las razas Pepitilla, Olotillo, Nal-tel y Tuxpeño. En este mismo sentido, era de esperarse que las razas Tabloncillo, Comiteco y Celaya del sub-trópico presentaran una mayor ganancia en el segundo intervalo (C_5 a C_9) en comparación con la observada en el primero (C_0 a C_5), como en efecto ocurrió. No obstante, a pesar de que estas tendencias se pueden considerar claras en las razas tropicales Pepitilla, Olotillo, Nal-Tel y Tuxpeño y en las sub-tropicales Tabloncillo y Comiteco, no se puede decir lo mismo con el resto de las razas estudiadas.

Estos resultados sugieren que las diferencias en la respuesta a la selección estuvieron más

determinadas por el grado de adaptación que poseen las razas objeto de estudio, que por el origen de éstas (trópico o sub-trópico).

CONCLUSIONES

La selección masal visual fue efectiva para adaptar a condiciones de clima templado las razas tropicales y subtropicales de maíz consideradas en este estudio. En las razas Pepitilla, Olotillo, Nal-Tel y Tuxpeño, los mayores incrementos en rendimiento ocurrieron en los primeros cuatro ciclos de selección; en Tabloncillo y Tepecintle, a partir del quinto ciclo (C_5), y en Celaya, Vandéño, Comiteco y Zapalote Chico los incrementos fueron constantes durante el proceso de selección. De acuerdo con el comportamiento observado a través del proceso de selección y la magnitud del avance genético obtenido, se considera a las razas Pepitilla, Olotillo y Tabloncillo como las razas con menor grado de adaptación, Tuxpeño y Tepecintle como de mediana adaptabilidad, y a Celaya, Comiteco, Vandéño, Zapalote Chico y Nal-Tel como las de mayor adaptabilidad. Los resultados sugieren que las diferencias en la respuesta a la selección estuvo más determinada por el nivel de adaptación que poseían las razas utilizadas, que por el origen de éstas (trópico o sub-trópico).

LITERATURA CITADA

1. Allard, R.W. y P.E. Hanshe. 1964. Some parameters of population variability. *Adv. Agron.* 16: 281-325.
2. Betrán, F.J., K. Mayfield, T. Isakeit y M. Menz. 2006. Breeding maize exotic germplasm. *In*: K. Lamkey y M. Lee (eds.). *Plant Breeding*. Blackwell Publishing. Ames, Iowa. pp. 352-367.
3. Bhatnagar, S., F.J. Betran y L.W. Rooney. 2004. Combining abilities of quality protein maize inbreds. *Crop Sci.* 44: 1997-2005.
4. Castillo, G. 1994. Aprovechamiento de la diversidad genética del maíz en México. *Memorias del II Congreso Latinoamericano de Genética*. Sociedad Mexicana de Fitogenética. Monterrey, México. pp.78-98.

5. García E. 1988. Modificaciones al sistema de Copen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. Universidad Nacional Autónoma de México. México DF. 217 p.
6. Gardner, C.O. 1961. An evaluation of effects of mass selection and seed irradiation with thermal neutrons on yield of corn. *Crop Sci.* 1:241-245.
7. Genter, C.F. 1976. Mass selection in a composite of Mexican races of maize. *Crop Sci.* 16: 556-558.
8. Goodman, M. 1985. Exotic maize germplasm: Status prospects and remedies. *Iowa State J. Res.* 59(4): 497-527.
9. Goodman, M. 1988. The history and evaluation of maize. *Crit. Rev. Plant Sci.* 7: 197-220.
10. Goodman, M. 1992. Choosing and using tropical corn germplasm. *Annu. Corn and Sorghum Res. Conf. Am. Seed Trade Assoc.* Washington, DC. Proc. 47: 47-64.
11. Hallauer, A.R. 1985. Compendium of recurrent selection methods and their application. *Crit. Rev. Plant Sci.* 3: 1-33.
12. Hallauer, A. R., 1994. Recurrent selection in maize. *Plant Breeding Rev.* 9: 115-179.
13. McIntosh, M.S. 1983. Analysis of combined experiments. *Agron. J.* 75: 153-155.
14. Molina, J.D. 1983. Selección masal visual estratificada en maíz. *Publicación Especial. Centro de Genética, Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.* 36 p.
15. Pandey, S. y C.O. Gardner. 1992. Recurrent selection for population, variety and hybrid improvement in tropical maize. *Adv. Agron.* 48: 1-87.
16. Paterniani, E. 1990. Maize breeding in the tropics. *Crit. Rev. Plant Sci.* 9: 125-154.
17. Pérez, C., J.D. Molina y A. Martínez. 2000. Adaptación a clima templado de una variedad de maíz tropical mediante selección masal visual estratificada. *Agrociencia* 34: 533-542.
18. Russell, W.A. y W.D. Guthrie. 1991. Registration of BS17 (CB)C4 and BS16(CB) C4 maize germplasm. *Crop Sci.* 31: 238-239.
19. San Vicente, F.M. y A.R. Hallauer. 1993. Mass selection for adaptation in Antigua maize (*Zea mays* L.) composite. *J. Iowa Acad. Sci.* 100: 9-12.
20. Sánchez, J. y M. Goodman. 1992. Relations among Mexican and some North American and South American races of maize. *Maydica* 37: 41-51.
21. Wellhausen, E.J., L.M. Roberts, E. Hernández y P.C. Mangelsdorf. 1951. Razas de maíz en México. Su origen, características y distribución. Folleto Técnico No 5. Oficina de Estudios Especiales. Secretaría de Agricultura y Ganadería. México. 237 p.