COMPORTAMIENTO DE CRUZAS DE MAÍZ OBTENIDAS POR IRRADIACIÓN Y SELECCIÓN

PERFORMANCE OF MAIZE CROSSES OBTAINED BY IRRADIATION AND SELECTION

José Alfredo Carrera Valtierra[1*] y Tarcicio Cervantes Santana[2†]

[1]Centro Regional Universitario Centro Occidente, Universidad Autónoma Chapingo. Periférico Independencia Poniente No. 1000, Col. Lomas del Valle. 58170, Morelia, Mich. Tel. Fax: 01 (443) 316-1489. [2]Genética, Colegio de Postgraduados. Km. 36.5 Carr. México-Texcoco. 56230, Montecillo, Texcoco, Edo. de México.
**Autor para correspondencia* (carrera6412@yahoo.com.mx)

RESUMEN

La inducción de mutaciones se ha usado para incrementar la variabilidad genética y mejorar caracteres de importancia agronómica. En los últimos 15 años se han liberado 1019 variedades que se obtuvieron directamente de mutaciones. En el presente trabajo se evaluaron compuestos de líneas mutantes tropicales (CLMT) obtenidos por irradiación con ^{60}Co en cruzas con compuestos de líneas F_1S_1 (CLF) obtenidos de híbridos subtropicales, con la finalidad de identificar material útil para el mejoramiento genético de maíz de la región subtropical de México. Los materiales mutantes lograron una mayor varianza de dominancia (σ^2_D=5.4) en rendimiento de mazorca que los materiales no mutantes. Las cruzas 'CLMT-27 x CML-311', '(LMT-6)S_4-bk-1-7-1p-9p x CML-176' y '(LMT-6)S_4-bk-1-7-1p-8p x NC-300', derivadas de material irradiado, produjeron rendimientos de 13.7, 10.8 y 10.0 t ha^{-1}, y fueron estadísticamente iguales (P ≤ 0.05) al mejor testigo 'Pioneer 30G40' que rindió 13.7 y 11.2 t ha^{-1}, en dos experimentos. Los compuestos de líneas mutantes 'CLMT-27', 'CLMT-3' y 'CLMT-9' presentaron una media de ACG en rendimiento de 11.7, 9.7 y 9.1 t ha^{-1}, respectivamente, y pueden ser incluidas en programas de mejoramiento genético de maíz.

Palabras clave: *Zea mays*, materiales mutantes, aptitud combinatoria, rendimiento.

SUMMARY

The induction of mutations has been used to increase the genetic variation and to improve agronomic traits. In the last 15 years, 1019 varieties derived from mutations have been released. In this work we evaluated tropical composite mutant lines (CLMT) crossed with composite lines F_1S_1 (CLF) obtained from subtropical hybrids, in order to select useful germplasm for maize breeding in the subtropical region of México. Results showed that the mutant materials achieved a higher dominance variance (σ^2_D =5.4) for ear yield than the non mutant materials. 'CLMT- 27 x CML-311', '(LMT-6)S_4-bk-1-7-1p-9p x CML-176' and '(LMT-6)S_4-bk-1-7-1p-8p x NC-300' derived from mutant materials, yielded 13.7, 10.8 and 10.0 t ha^{-1}, respectively, and were statistically equal (P ≤ 0.05) than the commercial hybrid 'Pioneer 30G40' which yielded 13.7 and 11.2 t ha^{-1} in two experiments. Composite 'CLMT-27', 'CLMT-3' and 'CLMT-9' had an average GCA for yield of 11.2, 9.7 and 9.1 t ha^{-1}, respectively, so they could be included in maize breeding programs.

Index words: *Zea mays*, mutant germplasm, combining ability, yield.

INTRODUCCIÓN

Después del descubrimiento de la inducción de mutaciones por Muller (1927) en *Drosophila* y por Stadler (1930) en cebada (*Hordeum vulgare*), este método empezó a tener mayor uso por los mejoradores de plantas para incrementar la variabilidad genética (Sinha y Joshi, 1985) y mejorar caracteres de importancia agronómica (Cervantes y Cervantes, 1996). Hasta el año 2000 se han obtenido 2252 variedades mutantes, de las cuales 1585 se obtuvieron directamente después de un tratamiento mutagénico y subsecuentes generaciones de selección, y 667 de la cruza de variedades mutantes por no mutantes (Maluszynky *et al*., 2000). De las 2252 variedades mutantes sólo 68 corresponden a maíz (*Zea mays* L.) y el resto a cereales autógamos, debido a la alta probabilidad para inducir mutaciones en este tipo de plantas (Micke *et al*., 1987). Es decir, la inducción de mutaciones en el mejoramiento de plantas ha tenido éxito, y este método continuará en uso pues en los últimos 15 años se han obtenido 1019 variedades mutantes (Ahloowalia *et al*., 2004).

A pesar de los grandes esfuerzos por generar material mutante, en los programas de mejoramiento genético sólo se usa 2.2 %, mientras que 87 % proviene de variedades comerciales adaptadas para generar nuevo germoplasma (Mba *et al*., 2004). El uso reducido del material mutante se debe a que los primeros trabajos de inducción de mutaciones se basaron en caracteres de herencia cualitativa

Recibido: 22 de Abril del 2005.
Aceptado: 10 de Octubre del 2006.

(Aestveit, 1963); posteriormente, con el uso de la irradiación recurrente se pudo generar y acumular variación (Frydenberg y Sandfaer, 1965; Vasti y Jensen, 1984) de herencia cuantitativa (Daly, 1973; Arias y Frey, 1973; Rao y Reddi, 1975). Otro problema fue la dificultad de detectar y aislar genes de herencia cuantitativa, cuyos efectos son pequeños (Gaul, 1965) pero importantes en el mejoramiento genético de los cultivos. A pesar de esta dificultad, Cervantes *et al*. (1999) lograron aumentar la media y la varianza genética en caracteres cuantitativos de cebada (*Hordeum vulgare* L.) y Cervantes y Cervantes (1996) con irradiación recurrente de semilla de trigo (*Triticum aestivum* L.) y selección obtuvieron líneas más rendidoras que la variedad original.

El maíz, que es una planta alógama, tiene el problema de acumular mutaciones recesivas deletéreas en los alelos dominantes, las cuales después de varias generaciones de irradiación generan una alta carga genética (Gaul, 1961) que para eliminarla se requiere de un largo proceso de autofecundación y selección (Micke *et al*., 1987). Estas mutaciones ocasionan características agronómicas desfavorables (Borojevic, 1965) que reducen su valor genético. Por ello, la prueba *per se* es el método menos apropiado para seleccionar germoplasma mutante de maíz. Una alternativa consiste en cruzar el material mutante con material no irradiado; mediante este método, Harris *et al*. (1972) encontraron que las cruzas que contenían líneas irradiadas rindieron más que las que contenían sólo líneas no irradiadas.

Los objetivos del presente trabajo fueron: a) Estimar los valores de las componentes varianza genética aditiva (σ^2_A) y de dominancia (σ^2_D), y la aptitud combinatoria general (ACG) de compuestos de líneas mutantes tropicales (CLMT), en cruzas con compuestos de líneas F_1S_1 (CLF) obtenidos de híbridos subtropicales; b) Conocer el comportamiento agronómico en cruzas de los compuestos CLMT con líneas subtropicales (LS) y tropicales (LT) del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT); y c) Conocer el comportamiento agronómico de líneas mutantes tropicales (LMT) derivadas de los compuestos CLMT en cruzas con la línea subtropical CML-179 y la línea templada NC-300 de origen tropical adaptada a condiciones templadas de EE. UU. La finalidad del estudio fue identificar material útil para el mejoramiento genético de maíz de la región subtropical de México bajo la hipótesis de que los compuestos de líneas mutantes tropicales y sus líneas derivadas de mutaciones inducidas por la irradiación recurrente con rayos gamma de ^{60}Co, podrían contener genes nuevos que no se encuentran en el material no irradiado y que al cruzarlas con éste podrían incrementar el rendimiento de grano y mejorar otras características agronómicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención del material genético

Compuestos de líneas mutantes tropicales (CLMT) y líneas mutantes tropicales (LMT). El Colegio de Postgraduados (CP) proporcionó al Programa de Maíz del Centro Regional Universitario Centro Occidente (CRUCO) de la Universidad Autónoma Chapingo, 27 CLMT $[R_5M_6S_{12}]F_3\#$. Los compuestos CLMT fueron derivados de la variedad 'CP-561', proveniente de la población 'Mezcla Tropical Blanca' (Pob. 22) del CIMMYT (CIMMYT, 1998). Dicha población fue irradiada por primera vez (R_1) en enero de 1985 y posteriormente durante cuatro generaciones más (R_4) con una dosis acumulada de 217.5 krad, seis generaciones de segregación mutacional (M_6) y 12 autofecundaciones (S_{12}). Posteriormente, mediante cruzas fraternales se recombinaron por tres generaciones ($F_3\#$). Las líneas LMT con cuatro autofecundaciones $[(R_5M_6S_{12})F_3\#]S_4$ fueron derivadas de los compuestos CLMT $(R_5M_6S_{12})F_3\#$ mediante el método genealógico.

Líneas subtropicales (LS), tropicales (LT), CML-179 del CIMMYT y NC-300 de Carolina del Norte. Las 56 líneas de origen subtropical (LS) y tropical (LT), proporcionadas por el CIMMYT, contienen germoplasma diverso (CIMMYT, 1998). La línea subtropical CML-176 fue derivada de la cruza 'Población 62 x Población 67', y la línea NC-300 fue derivada de la cruza '[línea de Pioneer X 105A x (línea de Pioneer X 306B x H-5)]' de origen tropical, la cual fue adaptada a las condiciones templadas de EE. UU. por el Dr. Goodman (Gerdes *et al*., 1993); en ambos casos, estas líneas fueron usadas como progenitores machos.

Compuestos de líneas F_1S_1 (CLF) derivados de híbridos subtropicales comerciales. En el ciclo primavera-verano del 2001 en Morelia, Mich. se autofecundaron 26 híbridos subtropicales comerciales de maíz (F_1S_1) de varias empresas: cinco de Ceres, cinco de Asgrow, cinco de Hartz, cuatro de Berentsen, cuatro de Dekalb, tres de Pioneer y uno de Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP).

Obtención de cruzamientos

Cruzas entre compuestos de líneas mutantes tropicales (CLMT) con compuestos de líneas F_1S_1 (CLF) (Experimento I). Los 27 compuestos CLMT y los 26 compuestos CLF fueron sembrados en un lote en otoño-invierno 2001 en Ziracuaretiro, Mich. (1250 msnm). De los 27 compuestos se seleccionó aleatoriamente a nueve, los cuales se cruzaron con tres compuestos CLF

provenientes de diferente empresas semilleras, y sólo el híbrido Z-21 de Hartz participó en dos ocasiones, por lo que se obtuvieron 27 cruzas (9 compuestos CLMT x 3 compuestos CLF). El sistema de cruzamientos se realizó bajo el diseño genético I de Carolina del Norte (Comstock y Robinson, 1949), en donde cada macho se cruzó con tres hembras diferentes. Los CLMT se usaron como machos y los compuestos CLF como hembras.

Cruzas entre compuestos de líneas mutantes tropicales (CLMT) con líneas subtropicales (LS) y tropicales (LT) del CIMMYT (Experimento II). Los 27 compuestos de líneas mutantes tropicales (CLMT) de maíz y las 56 líneas subtropicales (LS) y tropicales (LT) del CIMMYT se sembraron en otoño-invierno 2001 en Ziracuaretiro, Mich. De los 27 compuestos CLMT se eligió aleatoriamente a 16, y de las 56 líneas del CIMMYT se seleccionó a 9 LS y 13 LT. Los 16 compuestos CLMT se cruzaron aleatoriamente con las 22 líneas del CIMMYT, y se obtuvieron 37 cruzas. El compuesto CLMT-27 participó en ocho cruzas (por ser un compuesto de alto rendimiento), CLMT-9 en cinco cruzas, CLMT-2 en cuatro cruzas, CMLT-12 en tres cruzas, CLMT-3, 4, 8, 10 y 14 en dos cruzas, y CLMT-5, 7, 11, 13, 20, 22 y 26 en una cruza.

Cruzas simples entre líneas CML-176 y NC-300 con líneas LMT (Experimento III). En el ciclo otoño-invierno 2004 en Ziracuaretiro, Mich. se sembraron las líneas probadoras CML-311 y CML-321 que combinaron bien con los compuestos CLMT y las nuevas líneas CML-176 del CIMMYT y NC-300 de Carolina del Norte, así como 133 líneas LMT derivadas de los compuestos CLMT-6, CLMT-20, CLMT-22 y CLMT-29. Debido a que las líneas CML-311 y 321 fueron más tardías que las líneas LMT, no fue posible obtener cruzas. La línea NC-300 y CML-176 se cruzaron cada una con ocho líneas LMT, por lo que en total se formaron 16 cruzas simples.

Evaluación del material genético.

Las 27 cruzas formadas entre los nueve compuestos CLMT con los 27 compuestos CLF (experimento I), las 37 cruzas entre los 16 compuestos CLMT con las nueve líneas LS y 13 LT del CIMMYT, las tres cruzas entre compuestos CLMT x CLMT C_{51}, C_{22} y C_{13}, los testigos subtropicales (TS): 'Leopardo', 'Lince', 'Pioneer 30G40' y 'T-39R x CML-330' y los testigos tropicales (TT): 'H-515' y 'H-516' (Experimento II), fueron evaluados en dos experimentos independientes, en la primavera-verano (P-V) del 2002, en condiciones de temporal o secano en Morelia, Mich. (1941 msnm, suelo ácido y clima C (w_1) (w) b (i') g), a una densidad de 87 mil plantas ha^{-1}.

En ambos casos, el diseño experimental fue de bloques completos al azar con cuatro repeticiones; el tamaño de parcela fue un surco de 5 m de longitud, con una distancia entre surcos de 0.80 m. La fertilización se hizo con la fórmula 220N-60P-00K y el manejo agronómico consistió de deshierbes y aporques. Las 16 cruzas formadas entre la línea CML-176 y NC-300 con las líneas LMT y los testigos 'Bengala', 'DK-2002', 'Pioneer 30G88' y '30G40', 'H-358' y '1851W' (Expto. III) fueron evaluados en el ciclo P-V del 2005 en Morelia y Álvaro Obregón, Mich. (1820 msnm, suelo alcalino y clima C (w_0) (w) b (i') g), el primero en condiciones de temporal y el segundo en punta de riego, respectivamente, a una densidad de 78 mil plantas ha^{-1}. En ambos sitios, el diseño experimental fue de bloques completos al azar con cuatro repeticiones, con parcela de dos surcos de 5 m de longitud, separados a con una distancia de 0.80 m; la fertilización se hizo con la fórmula 250N-00P-00K.

Variables medidas y análisis estadístico

Los caracteres evaluados fueron: rendimiento de mazorca (REN), en t ha^{-1}, el cual se calculó con el rendimiento promedio por planta multiplicado por la densidad de población; altura de planta y mazorca (AP y AM), en metros, la primera de la base del tallo hasta la hoja bandera y la segunda de la base de tallo a la inserción de la última mazorca en 10 plantas; días a floración masculina (DFM), en días, desde el momento de la siembra a la floración de 50 % de las plantas en la parcela; resistencia a *Fusarium* (FUS), en porcentaje de plantas marchitas; resistencia a *Cercoscopora* (CERCOS), en escala de 0 a 9, donde 0 fue sin daño y 9 follaje totalmente dañado.

Con los datos del diseño genético I (experimento I) de Carolina del Norte (Comstock y Robinson, 1949) se hicieron análisis de varianza de los cuales se obtuvieron las componentes de varianza aditiva (σ^2_A) y de dominancia (σ^2_D), y la aptitud combinatoria general (ACG). En los experimentos II y III se hicieron análisis de varianza y comparación de medias con los procedimientos PROC ANOVA y MEANS, respectivamente (SAS Institute, 1979). Para la comparación de medias se usó la prueba de Diferencia Significativa Honesta (DSH) (Martínez, 1988), cuya fórmula es:

$$DSH = q\,\alpha;\, t,\, \eta\, (s^2/r)^{1/2}$$

donde: $q\,\alpha;\, t,\, \eta$ es el rango estandarizado, con α nivel de significancia para comparar t medias de tratamientos con η = (r-1) (t-1) grados de libertad del error experimental, $(\ )^{1/2}$ es la raíz cuadrada de la varianza; s^2 es el cuadrado medio del error de los tratamientos; y r el número de

observaciones. Para calcular la aptitud combinatoria general (ACG) de cada compuesto CLMT se usó la media de las tres cruzas en que participó.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el experimento I solamente el efecto de hembras dentro de machos fue significativo ($P \leq 0.01$) para alturas de planta y de mazorca y para rendimiento de mazorca. En el experimento II el efecto de cruzas tuvo efecto significativo ($P \leq 0.01$) en días a floración masculina, altura de planta, rendimiento de mazorca y resistencia a *Fusarium*. En el experimento III el efecto híbridos (H) tuvo efecto significativo ($P \leq 0.05$) en días a floración masculina, altura de planta, altura de mazorca, rendimiento de mazorca, resistencia a *Fusarium* y *Cercospora;* en la interacción híbridos x ambientes (H x A) sólo fueron significativos ($P \leq 0.05$) altura de planta, rendimiento de mazorca y resistencia a *Fusarium* (Cuadro 1).

Las estimaciones de varianzas genéticas en la población teórica de maíz que se podría generar por el apareamiento aleatorio entre los nueve compuestos CLMT con los 26 compuestos CLF, indicaron que las varianzas genéticas aditivas (σ^2_A) fueron negativas y no significativas para las variables altura de planta, altura de mazorca y rendimiento de mazorca; sólo en días a floración fue positiva y no significativa (Cuadro 2). En altura de planta, altura de mazorca y rendimiento de mazorca las varianzas de dominancia (σ^2_D) tuvieron valores positivos y significativos ($P \leq 0.01$), y en días a floración masculina fue negativa y no significativa.

Las varianzas con valores negativos son consideradas como estimadores de valor cero, debido a que teóricamente no pueden existir varianzas negativas, y los valores obtenidos pueden deberse a la falta de variación en el carácter correspondiente o la variación es muy pequeña que no puede ser detectada por el modelo (Hocking, 1985).

En los compuestos CLMT el carácter días a floración fue el menos sujeto a selección, por lo que la varianza aditiva (σ^2_A) estimada fue mayor que la de dominancia (σ^2_D); en cambio, en los caracteres directamente seleccionados, que en orden de importancia decreciente fueron rendimiento de mazorca, altura de planta y altura de mazorca, ocurrió lo contrario: la varianza de dominancia (σ^2_D) fue mayor que la aditiva (σ^2_A), con valores de 5.428, 0.053 y 0.046, respectivamente, para la primera, y en la segunda fue de cero. Resultados similares fueron obtenidos en maíz por Grombacher *et al*. (1989) cuando al aumentar los ciclos de selección la varianza genética disminuyó, debido a una disminución de la varianza aditiva y un aumento en la de dominancia (Helms *et al*., 1989). El aumento de la varianza de dominancia sugiere que la selección indujo diversidad genética entre los compuestos CLMT, posiblemente debido a la presencia de variación *per se* de la variedad antes de la irradiación (Warburton *et al*., 2002) y a mutaciones inducidas por la irradiación recurrente de rayos gamma de ^{60}Co (Frydenberg y Sanfaer, 1965; Sinha y Joshi, 1985). Otros resultados similares en maíz fueron obtenidos por Oyervides y Hallauer (1986), Misévic (1990) y Ordás (1991).

En valores de aptitud combinatoria general (ACG) para rendimiento de mazorca útiles para la predicción y obtención de buenas cruzas (Rood y Major, 1981; González *et al*., 1990) en trabajos futuros, los mejores compuestos CLMT fueron CLMT-3 y CLMT-9 con valores promedios de 9.73 y 9.14 t ha^{-1}, respectivamente (Cuadro 3); las peores fueron los compuestos CLMT-14 y CLMT-5 con valores respectivos de 7.49 y 7.22 t ha^{-1} (Cuadro 3). El compuesto CLMT-3 presentó una media de ACG mayor que el compuesto CLMT-9; sin embargo, la varianza fenotípica (s^2) de su estimador de 20.44 fue mayor que la del CLMT-3 que fue de 2.76, lo que indica que ambos compuestos tienen probabilidades similares de combinar bien con otras fuentes de germoplasma, aunque en cruzas futuras el rendimiento de CLMT-9 sería más consistente por tener un estimador menos sesgado.

La cruza 'CLMT-27 x CML-311' del grupo CLMT x LS presentó un rendimiento de 13.70 t ha^{-1} que fue estadísticamente igual ($P \leq 0.05$) al mejor testigo subtropical 'Pioneer 30G40' que rindió 13.75 t ha^{-1}, pero también fue 5 d más tardía (Cuadro 4). El mismo compuesto CLMT-27 participó en las cruzas 'CLMT-27 x CL-02450' (grupo CLMT x LT) y 'CLMT-27 x CML-72' (grupo CLMT x LS) con rendimientos respectivos de 11.05 y 10.22 t ha^{-1}, los cuales fueron estadísticamente igual al testigo 'Lince' que rindió 10.48 t ha^{-1}, pero más tardíos en 3.7 y 2.7 d, respectivamente.

En altura de planta y resistencia a *Fusarium* la cruza 'CLMT-27 x CML-311' fue similar a 'Pioneer 30G40' (Cuadro 4). En las cruzas 'CLMT-27 x CL-02450' y 'CLMT-27 x CML-72', la primera fue 0.50 m más alta y 6.8 % menos enferma que 'Lince'; en cambio, la segunda tuvo igual altura de planta y fue más enferma. Por el buen rendimiento mostrado por cruzas de CLMT-27, en especial con las líneas CML-311, CL-02450 y CML-72, se infiere que dicho compuesto posee buena ACG. El alto rendimiento de la cruza 'CLMT-27 x CML-311' en comparación con las cruzas 'CLMT x CL-02450' y 'CLMT x CML-72' quizás se deba a que la línea CML-311 posee alta ACG, similar a su línea hermana CML-312 (Vergara

Cuadro 1. Cuadrados medios de los análisis de varianza de rendimiento de mazorca y otros caracteres agronómicos. Morelia, Mich., 2002.

F V	gl	Variables					
		DF	AP	AM	REN	FUS	CERCOS
				Experimento I			
Repeticiones	3	49.28	0.01	0.01	6.77		
Machos	8	77.11	0.06	0.05	9.01		
Hembras/Machos	18	42.35	0.07**	0.05**	10.09**		
Error	78	32.79	0.02	0.01	3.82		
CV (%)		6.76	5.76	9.55	24.23		
				Experimento II			
Repeticiones	3	4.91	0.14	0.21	5.33	744.67	
Cruzas	45	42.74**	0.12**	0.08	12.00**	825.87**	
Grupos	3	193.45**	0.25**	0.35**	32.59**	558.85	
Residual	42	32.41**	0.11**	0.06**	10.56**	844.50**	
Error	135	3.00	0.11	0.01	3.94	162.00	
CV (%)		1.98	5.41	9.01	22.84	77.00	
				Experimento III			
Repeticiones	3	46.60	0.04	16.13	0.45	4.13	2.63
Ambientes (A)	1	4334.54	2.06	32.90	364.37	50.20	44.50
Híbridos (H)	21	99.84*	0.07*	16.39**	29.46*	175.96**	3.67**
A x H	21	52.20	0.07**	16.29	3.90*	72.29**	0.91
Error	129	51.62	0.02	16.47	2.33	21.49	0.73
CV (%)		8.36	6.97	15.00	15.63	51.57	48.81

*,** Significativos a $P \leq 0.05$ y 0.01, respectivamente. DF = Días a floración, en días; AP = Altura de planta, en m; AM = Altura de mazorca, en m; REN = Rendimiento de mazorca, en t ha^{-1}; FUS = Resistencia a *Fusarium,* en porcentaje; CERCOS = Resistencia a *Cercospora,* en escala de 0 a 9; gl = Grados de libertad; CV = Coeficiente de variación.

Cuadro 2. Varianzas genéticas estimadas con el diseño genético I para rendimiento de mazorca y otros caracteres agronómicos. Morelia, Mich., 2002 (Experimento I).

Varianza	Variables			
	DF	AP	AM	REN
$\hat{\sigma}^2_A$	11.60	-0.002	-0.002	-0.358
$\hat{\sigma}^2_D$	-2.04	0.053**	0.046**	5.428**

** Significativos a $P \leq 0.01$. $\hat{\sigma}^2_A$ = Estimador insesgado de la varianza aditiva; $\hat{\sigma}^2_D$ = Estimador insesgado de la varianza de dominancia; DF = Días a floración masculina, en días; AP = Altura de planta, en m; AM = Altura de mazorca, en m; REN = Rendimiento de mazorca, en t ha^{-1}.

Cuadro 3. Media ($\bar{X}$) y varianza fenotípica (s^2) de la aptitud combinatoria general (ACG) de los compuestos de líneas mutantes tropicales (CLMT) en los caracteres rendimiento de mazorca y otros caracteres agronómicos. Morelia, Mich., 2002 (Experimento I).

Compuesto	$\bar{X}$				S^2			
	REN (t ha^{-1})	DF (d)	AP (m)	AM (m)	REN (t ha^{-1})	DF (d)	AP (m)	AM (m)
TCS-3	9.73	86.67	2.26	1.15	20.44	4.24	0.020	0.01
TCS-9	9.14	86.08	2.25	1.15	2.76	7.90	0.020	0.01
TCS-12	8.29	86.83	2.14	1.12	1.19	4.70	0.020	0.02
TCS-11	7.98	85.66	2.21	1.09	4.87	1.96	0.030	0.01
TCS-8	7.95	81.50	2.20	1.09	3.80	133.02	0.010	0.01
TCS-7	7.54	81.33	2.19	1.08	5.96	132.80	0.010	0.01
TCS-22	7.44	84.83	2.20	1.01	2.02	3.20	0.009	0.02
TCS-14	7.29	81.83	2.07	1.01	1.56	21.96	0.070	0.05
TCS-5	7.22	87.91	2.33	1.25	2.79	3.53	0.010	0.01

REN = Rendimiento de mazorca; DF = Días a floración masculina; AP = Altura de planta; AM = Altura de mazorca.

Cuadro 4. Comparación de medias de grupos genéticos en rendimiento de mazorca y otros caracteres agronómicos. Morelia, 2002 (Expto II), y Morelia y Álvaro Obregón, Mich., 2005 (Experimento III).

Grupos	REN (t ha^{-1})	DF (d)	AP (m)	FUS (%)	CERCOS (0-9)
Testigos		**Experimento II**			
'Pioneer 30G40'	13.75 a	83.00	2.00	11.00	
'Lince'	10.48 ab	83.00	2.00	11.00	
C_{51}	8.16 ab	87.75	2.20	0.00	
'H-516'	7.69 b	87.00	2.00	7.00	
'H-515'	6.16 b	88.00	2.00	42.00	
Cruzas CLMT x LS					
CLMT-27 x CML-311	13.70 a	88.75	2.40	1.30	
CLMT-27 x CML-321	10.90 ab	90.00	2.60	9.00	
CML-331 x CLMT-11	6.02 b	88.00	2.00	25.00	
Cruzas CLMT x LT					
CLMT-27 x CL-02450	11.05 ab	90.50	2.50	4.20	
CLMT-27 x CML-72	10.22 ab	86.75	2.00	52.00	
CLMT-2 x CML-72	5.82 b	89.00	2.00	41.00	
DSH 0.05	5.70	4.97	0.35	36.50	
		Experimento III			
'Bengala'	14.26 a	89.00	2.15	2.30	1.27
'DK-2002'	13.84 ab	91.75	2.12	6.40	2.13
'Pioneer 30G88'	12.09 a-c	88.75	2.26	2.90	1.38
'Pioneer 30G40'	11.18 b-d	87.25	2.26	3.60	0.88
'H-358'	8.95 d-f	91.63	2.31	1.40	1.38
'1851W'	5.94 g	86.88	1.92	4.10	1.23
Media	11.04	89.21	2.17	4.10	1.23
Cruzas LMT x CML-176					
(LMT-6)S_4-bk-1-7-1p-9p	10.85 c-e	87.25	2.19	10.90	2.13
(LMT-6)S_4-bk-1-7-2p-4p	10.81 c-e	87.50	2.16	8.30	2.13
(LMT-6)S_4-bk-1-7-5p-1p	8.11 e-g	88.63	2.20	8.40	1.44
Media	9.53	87.64	2.25	11.00	2.32
Cruzas LMT x NC-300					
(LMT-6)S_4-bk-1-7-1p-8p	10.05 c-f	83.88	2.12	16.40	2.38
(LMT-6)S_4-1-1-3-8p-5p	9.97 c-f	85.00	2.10	12.40	1.12
(LMT-6)S_4-2-1-3-4p-1p	7.47 c-f	81.25	2.00	9.10	1.63
Media	9.04	83.36	2.08	9.50	1.58
DSH 0.05	2.80	2.90	0.27	8.50	1.57

Medias con la misma letra son iguales (Tukey 0.05); a-c = abc; REN = Rendimiento de mazorca; DF = Días a floración masculina; AP = Altura de planta; AM = Altura de mazorca; FUS = Resistencia a *Fusarium*; CERCOS = Resistencia a *Cercospora*.

et al., 2005), buena aptitud combinatoria específica (ACE) debida a divergencia genética (Misévic, 1990; Ordás, 1991), y a la buena adaptación de dicha línea a El Bajío debido a que contiene híbridos de Dekalb y Northrup King que son recomendados para esta región (CIMMYT, 1998).

Otra cruza que presentó alto rendimiento fue 'CLMT-27 x CML-321' con 10.90 t ha^{-1}, la cual fue menor a 'Pioneer 30G40' (13.75 t ha^{-1}) pero igual a 'Lince' (10.48 t ha^{-1}); en esta cruza participó la línea CML-321 que también debe tener alta ACG, pues al igual que las líneas CML-311 y CML-312 en su germoplasma contiene híbridos de Dekalb y Northrup King. Los resultados anteriores fueron similares a los encontrados en maíz por González *et al*. (1990) , e indican que al cruzar líneas de alta ACG se aumentan las probabilidades de encontrar cruzas de alto rendimiento.

Los rendimientos de mazorca de las cruzas de los grupos CLMT x línea (CLMT x LS y CLMT x LT) del experimento II fueron de 9.67 y 8.36 t ha^{-1}, respectivamente, y el de las cruzas LMT x línea (LMT x CML-176 y LMT x NC-300) del experimento III fueron de 9.53 y 9.04 t ha^{-1}, respectivamente. Al comparar el rendimiento de las cruzas del grupo CLMT x LS con las cruzas LMT x CLM-176 (ambas con germoplasma tropical x subtropical), las cruzas CLMT x LS sólo rindieron 1.5 % más

que las cruzas simples LMT x CML-176, y en ambos casos presentaron valores similares de días a floración y altura de planta (Cuadro 4). En cambio, al comparar las cruzas del grupo CLMT x LT con las cruzas LMT x NC-300 (ambas con germoplasma tropical x tropical, aunque NC-300 fue adaptada a condiciones templadas), las cruzas simples LMT x NC-300 rindieron 8.13 % más, fueron 4.26 d más precoces y 0.19 m más bajas de planta que las cruzas CLMT x LT (Cuadro 4). La mayor precocidad de las cruzas LMT x NC-300 se debió que la línea NC-300 de origen tropical se seleccionó para precocidad en condiciones templadas (Goodman, 1992) y en clima subtropical fue más precoz que LMT.

En el experimento III ninguna cruza simple de los grupos LMT x CML-176 y LMT x NC-300 superó en rendimiento de mazorca a los híbridos de reciente liberación 'Bengala', 'DK-2002' y 'Pioneer 30G88'. En el grupo LMT x CML-176 las cruzas simples hermanas '(LMT-6)S_4-bk-1-7-1p-9p x CML-176' y '(LMT-6)S_4-bk-1-7-2p-4p x CML-176' rindieron 10.85 y 10.81 t ha^{-1}, y fueron estadísticamente iguales ($P \leq 0.05$) que el testigo 'Pioneer 30G40' y que la cruza simple subtropical 'H-358' del INIFAP, pero superiores ($P \leq 0.05$) a la cruza simple '1851W' de Syngenta introducida de EE. UU. No obstante, estas dos cruzas fueron más susceptibles a *Fusarium* debido a que no se hizo selección para este carácter durante el proceso de irradiación.

En el grupo LMT x NC-300 las cruzas simples '(LMT-6)S_4-bk-1-7-1p-8p x NC-300' y '(LMT-6)S_4-1-1-3-8p-5p x NC-300'; con rendimientos de 10.0 y 9.9 t ha^{-1}, igualaron al híbrido 'H-358' y superaron al '1851W', fueron más precoces pero más susceptibles a *Fusarium* (Cuadro 4). Estos resultados indican que con una muestra pequeña de cruzas de maíz (10 cruzas CLMT x LS, 27 cruzas CLMT x LT, 8 cruzas LMT x CML-176 y 8 cruzas LMT x NC-300) es posible igualar o superar el rendimiento de algunos híbridos comerciales de maíz para cuya liberación fue necesario descartar miles de cruzas después de ser evaluadas en varios ambientes y años. Los rendimientos obtenidos entre material mutante y no mutante pueden ser el resultado de la irradiación recurrente de rayos gamma de ^{60}Co a semilla de la variedad 'CP-561', los cuales indujeron mutaciones (Frydenberg y Sanfaer, 1965; Sinha y Joshi, 1985) e incrementaron la variabilidad genética *per se* (Cervantes *et al.*, 2002), de modo que la selección pudo originar divergencia genética al aumentar la varianza de dominancia, como se manifestó con el mayor rendimiento debido a heterosis (Moll *et al.*, 1965).

CONCLUSIONES

El rendimiento de mazorca presentó la mayor varianza de dominancia (5.4) que días a floración masculina (-2.0) debido a que durante el proceso de irradiación recurrente con rayos gamma de ^{60}Co fue el carácter más seleccionado. El alto rendimiento de 13.7 t ha^{-1} obtenido en la cruza 'CLMT-27 x CML-311' del grupo CLMT x LS es similar al del híbrido 'Pioneer 30G40' , y el rendimiento de 10.85 t ha^{-1} de la cruza simple '(LMT-6)S_4-bk-1-7-1p-9p x CML-176' del grupo LMT x CML-176 superó al de las cruzas simples 'H-358' y '1851W'. Se infiere entonces que con la irradiación recurrente de rayos gamma de ^{60}Co aplicada a la semilla de la variedad 'CP-561', se indujo variación genética la cual mediante selección elevó la divergencia genética y aumentó la varianza de dominancia que se manifestó en mayor rendimiento debido a heterosis. Los compuestos de líneas mutantes tropicales CLMT-27, CLMT-3 y CLMT-9 mostraron un rendimiento de la ACG de 11.16, 9.73 y 9.14 t ha^{-1}; respectivamente, y pueden ser incluidos en programas de mejoramiento genético de maíz.

BIBLIOGRAFÍA

Aestveit K (1963) Heterosis and selection in barley. Genetics 49:159-164.

Ahloowalia B S, M Maluszynky, K Nichterlein (2004) Global impact of mutation-derived varities. Euphytica 135:187-204.

Arias J, K J Frey (1973) Grain yield mutations induced by ethyl methanesulfonate treatment of oat seeds. Rad. Bot. 13:73-85.

Borojevic K (1965) The effect of irradiation and selection after irradiation on the number of kernels per spike in wheat. *In*: The Use of Induced Mutation in Plant Breeding. Suppl. to Rad. Bot. 5:505-513.

Cervantes S T, F Castillo G, E Domínguez G (1999) Cambios en la media y en la varianza de caracteres cuantitativos de cebada por irradiación recurrente. Agrociencia 33:251-259

Cervantes S T, C T Cervantes M (1996) Selección de líneas de trigo de alto rendimiento a partir de compuestos irradiados. Agrociencia 30:509-514.

Cervantes S T, M A Oropeza R, D Reyes L (2002) Selección para rendimiento y heterosis de líneas endogámicas de maíz irradiado. Agrociencia 36:421:431

CIMMYT (1998) A Complete Listening of Improved Maize Germplasm from CIMMYT. Maize Special Report. México, D. F. 94 p.

Comstock R E, H F Robinson (1949) The components of genetic variance in populations. Biometrics 4:254-266.

Daly K (1973) Quantitative variation induced by gamma rays and fast neutrons in *Arabidopsis thaliana*. Rad. Bot. 13:149-154.

Frydenberg O, J Sandfaer (1965) Vitality, productivity and ratio sensitivity of recurrent irradiated barley populations. *In*: The Use of Induced Mutations in Plant Breeding. Report of the FAO/IAEA/Eucarpia Tech. Meeting. Pergamon Press. Rome. pp:465-476.

Gaul H (1961) Use of induced mutants in seed-propaged species. *In*: Symposium on Mutations and Plant Breeding. Cornell University, Ithaca, N. Y. National Academy of Sciences. Washington. pp:206-251.

Gaul H (1965) The concept of macro and micromutants in barley. *In*: The Use of Mutations in Plant Breeding. Report of the

FAO/IAEA/Eucarpia Tech. Meeting. Pergamon Press. Rome. pp:407-428.

Gerdes J T, C F Behr, J G Coors, W F Tracy (1993) Compilation of North American Maize Breeding Germplasm. W F Tracy, J G Coors, J L Geadelmann (eds). Crop Science Society of América, Madison, Wis. U.S.A. 202 p.

González G J J, J D Molina G, A Martínez Garza (1990) Implicaciones del rendimiento *per se* y la ACG de las líneas de maíz (*Zea mays L.*) en la predicción de cruzas simples de alto rendimiento. Agrociencia S. Fitoc. 1:29-42.

Goodman M M (1992) Choosing and using tropical corn germplasm. *In*: 47th Annual Corn & Sorghum Research Conference. Dolores Wilkinson (ed). Publication No. 47. December 9-10, Chicago Ill. Washington, D. C. pp: 47-64.

Grombacher A W, W A Russell, W D Gutrie (1989) Effects of recurrent selection in two maize synthetics on agronomic traits of S_1 lines. Maydica 34:243-352.

Harris R E, C O Gardner, W A Compton (1972) Effects of mass selection and irradiation in corn measured by random S_1 lines and their test crosses. Crop Sci. 12:594-598.

Helms T C, A Hallauer, O S Smith (1989) Genetic variability estimates in improvement and nonimprovement "Iowa Stiff Synthetic" maize populations. Crop Sci. 29:959-962.

Hocking R R (1985) The Analysis of Linear Models. Brooks/Cole Publishing Co. Monterey, Cal. pp:316-350.

Maluszynsky M, K Nichterlein, L Van Zanten, B S Ahloowalia (2000) Officially Released Mutant Varieties. The FAO/IAEA Database. Mutation Breeding Review No. 12. FAO/IAEA, Vienna, 84 p.

Martínez G A (1988) Diseños Experimentales. Métodos y Elementos de Teoría. Trillas. México. 756 p.

Mba CH, R Afza, B P Froster (2004) Improving Crops Trough Induced Mutatios. FAO/IAEA Agriculture and Biotechnology Laboratory. Seibersdorf, Austria. 43 p.

Micke A, B Donini, M Maluskinky (1987) Induced mutation for crop improvement. A review. Trop. Agric. (Trinidad) 64:259-278.

Misévic D (1990) Genetic analysis of crosses among maize populations representing different heterotic patterns. Crop Sci. 30:977-1001.

Moll R H, J H Lonnquist, J Velez F, E C Johnson (1965) The relationship of heterosis and genetic divergence in maize. Genetics 52:139-144.

Muller H J (1927) Artificial transmutation of the gene. Science 66:84-87.

Ordás A (1991) Heterosis in crosses between American and Spanish population of maize. Crop Sci. 31:931-935.

Oyervides-García M, A R Hallauer (1986) Selection-induced differences among strains of Iowa stalk synthetic maize. Crop Sci. 26:506-511.

Rao E V V B, V R Reddi (1975) A radiation-induced highly productive mutant in sorghum. Rad. Bot. 15:29-32.

Rood S B, D J Major (1981) Diallel analisis of leaf number, leaf development rate, and plant height of early maturing maize. Crop Sci. 12:837-867.

SAS Institute (1979) SAS Users Guide. SAS Institute Inc. Cary, N. C. U.S.A. 494 p.

Sinha R P, M G Joshi (1985) Study of induced quantitative variation in hexaploid triticale. Mutation Res. 147:45-49.

Stadler L J (1930) Some genetic effects of x-rays in plants. J. Heredity 21:3-19

Vasti S M, J Jensen (1984) Radiosensitivity of a recurrently irradiated barley populations. Env. Exp. Bot. 24: 9-15

Vergara A N, S A Rodríguez H, H S Córdoba O (2005) Aptitud combinatoria general y específica de líneas de maíz (*Zea mays* L.) tropical y subtropical. Agron. Mesoam. 16:137-143.

Warburton M L, X Xianchun, J Crossa, J Franco, A E Albrencht, M Frisch, M Bohn, D Hoisington (2002) Genetic characterization of CIMMyT inbred maize lines and open pollinated populations using large scale fingerprinting methods. Crop Sci. 42:1832-1840.