

# **SELECCIÓN RECÍPROCA RECURRENTE EN POBLACIONES DE MAÍZ PARA TRÓPICO SECO Y BAJÍO MEXICANO**

Armando Muñoz Urbina, Enrique Navarro Guerrero, José Espinoza Velázquez.

Programa de Doctorado en Fitomejoramiento, Subdirección de Postgrado, Universidad  
Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, Saltillo Coahuila, México. 25315

## RESUMEN

En este trabajo se consideró el patrón heterótico correspondiente al tipo de grano: dentado/cristalino, observable en dos experimentos de selección recíproca recurrente (SRR), en las poblaciones de madurez intermedia, denominadas: Pob. A y Pob. B, en el experimento I, y las poblaciones de madurez tardía, denominadas: Pob. 43 y Pool 23, en el experimento II. Los ensayos fueron evaluados en Celaya, Gto., y Gómez Palacio, Dgo. para medir en ellas comportamiento agronómico y heterosis. Los análisis de varianza combinados permitieron detectar diferencias ( $P < 0.05$  o  $P < 0.01$ ) entre mestizos, para todas las variables bajo estudio. También se practicó un Análisis de Componentes Principales, lo cual permitió agrupar a los mestizos con respecto a los tres primeros componentes, mismos que explicaron más del 80% de la variabilidad de los datos. La ganancia genética estimada para rendimiento mediante la SRR fue mayor para las poblaciones de madurez intermedia ( $AG = 1.637 \text{ t ha}^{-1}$ ), superior en 43% al observado en las poblaciones de madurez tardía. Cabe señalar que aunque se espera una mayor ganancia entre las poblaciones de madurez intermedia, también se espera que se suscite una mayor heterosis entre las poblaciones de madurez tardía, ya que éstas presentaron una mayor distancia genética ( $D^2$  de Mahalanobis); de ellas, la mayor divergencia se presentó entre Pob. A y Pool 23, por lo que un programa de hibridación que las incluya pudiera resultar en combinaciones heteróticas sobresalientes.

**Palabras clave:** *Zea mays*, heterosis, ganancia genética, componentes principales, distancia genética.

## ABSTRACT

Reciprocal recurrent selection in maize populations for dry tropic and Mexican Bajío. This assay deals with the heterotic dent-flint pattern in two experiments of reciprocal recurrent selection (RRS). The populations under study are of intermediate maturity, named as follows: Pob. A and Pob. B in the Experiment I, and the late maturity populations Pob. 43 and Pool. 23, in the Experiment. II. These experiments were established at locations in Celaya, Gto. and Gómez Palacio, Dgo., Mexico, in order to evaluate the populations agronomic performance and heterosis. The combined analysis of variance detected differences ( $P < 0.05$  and  $P < 0.01$ ), among top crosses for all traits. An analysis of main components was also practiced through which the top crosses were grouped according to the first three main components, which explained more than 80% of the variability. The estimated genetic gain for yield through the RRS was higher by 43% for the populations of intermediate maturity ( $AG = 1.637 \text{ t ha}^{-1}$ ) as compared to the ones of late maturity. In spite of these, the highest heterosis is expected between the late maturity populations given the greater genetic distance ( $D^2$  of Mahalanobis) among them; however, the greater divergence was shown between the groups Pob. A and Pool. 23 which could be eligible for a hybridization program that includes them in outstanding heterotic combinations.

**Key words;** *Zea mays*, heterosis, genetic gain, main components, genetic distance.

## INTRODUCCIÓN

El objetivo central en la aplicación de esquemas de selección recíproca recurrente (SRR), en poblaciones de maíz, es el de generar fuentes de germoplasma que permita identificar materiales sobresalientes, de utilidad en la obtención y derivación de líneas con mayor potencial heterótico para la formación de híbridos de alta productividad.

Entre los patrones heteróticos en uso, se encuentra el de contraste entre grupos de maíces de grano dentado y cristalino, procedimiento que ha permitido identificar materiales de buen comportamiento y alta heterosis para la cruce poblacional. Martín y Hallauer (1980) señalan que con el uso de poblaciones mejoradas a través de la SRR aumenta la probabilidad en el desarrollo de líneas e híbridos superiores, logrando además que a través de la cruce entre poblaciones se confiera mayor énfasis a la selección para la expresión de heterosis.

Por otra parte, cuando se desea generar mayor información acerca de los materiales y de las características evaluadas en conjunto, la aplicación de una prueba multivariada puede ser, generalmente, un mejor procedimiento, ya que ésta tiene la ventaja adicional de valorar correctamente la correlación entre las variables (Manly, 1990). Entre las pruebas multivariadas que se utilizan para medir similitud morfológica se encuentra la "distancia generalizada de Mahalanobis" que puede ser útil para explicar las relaciones entre poblaciones.

Por otra parte, el análisis de componentes principales (CP), permite reducir la cantidad de datos por interpretar sin perder mucha de la información que se busca; por lo tanto, es una herramienta adecuada para analizar la estructura de observaciones multivariadas cuando se busca la dependencia entre ellas y se desconocen los patrones de interrelación.

En el programa de mejoramiento genético del Instituto Mexicano del Maíz Dr. Mario E. Castro Gil (IMM) se aplicó la metodología de SRR en cuatro poblaciones sintéticas de maíz para las regiones de Trópico Seco y Bajío con el fin de : a) predecir el avance genético por SRR; b) determinar las variables más importantes y la relación que permita explicar la variabilidad existente; y c) medir la divergencia genética entre las poblaciones.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El material genético utilizado se originó de los complejos germoplásmicos provenientes del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), los cuales fueron sintetizados por investigadores del IMM en nuevas poblaciones con base en características de interés (Cuadro 1).

**Cuadro 1.** Descripción de los complejos germoplásmicos.

Población <sup>1</sup>	Origen <sup>2</sup>	Tipo de grano <sup>3</sup>	
Poblaciones de Madurez Intermedia (Exp. I)			
Pob. A	Cl Sint—2	Tep. 93-94	D
$\times$			
Pob. B	Cl Sint—2	Tep. 93-94	C
Poblaciones de Madurez Tardía (Exp. II)			
Pob. 43	Cl Sint—2	Tep. 93—94	D
$\times$			
Pool 23	Cl Sint—2	Tep. 93—94	C

1. Pob AC1 Sint-2=(Pob 43 x Pool 20); Pob BC1 Sint-2=(Pool 19 x Pool 3).

2. Tep. = Tepalcingo, Morelos. Ciclo 1993-1994.

3. D= Dentado, C= Cristalino.

De cada población se obtuvieron las familias de medios hermanos a través del procedimiento de selección recíproca recurrente (SRR), siguiendo la propuesta de Comstock *et al.*, (1949).

## **Procedimiento Experimental**

En el ciclo B (P-V 1995) se evaluaron las familias de medios hermanos (mestizos), bajo condiciones de riego en las localidades de Celaya, Gto. y Gómez Palacio, Dgo. Se establecieron cuatro experimentos por localidad. El Experimento I constituido por el complejo germoplásmico dentado Pob. A(B) (Pob. B como probador) y el Experimento II por el complejo germoplásmico cristalino Pob. B(A) (Pob. A como probador). El Experimento III se refiere al complejo germoplásmico dentado Pob. 43(23) (Pool 23 como probador), y el Experimento IV por el complejo germoplásmico cristalino Pool 23(43) (Pob. 43 como probador). En ambas localidades se utilizó el diseño de bloques completos al azar con dos repeticiones y en cada experimento se incluyeron como testigos los híbridos AN-447, AN-EXP.1 y AN-EXP.2, que son híbridos sobresalientes generados por el IMM. La parcela experimental consistió de un surco por entrada con una longitud de 4.40 m y una distancia entre surcos de 0.75 m, siendo la distancia entre plantas de 0.22 m, determinándose así una densidad de población de 60 600 plantas ha<sup>-1</sup>. Se efectuó un análisis combinado para evaluar las características agronómicas relativas a rendimiento (REN), porcentaje de mazorcas podridas (MZP), porcentaje de mazorcas con *Fusarium* (MZF), días a floración masculina (FMA), días a floración femenina (FFE), altura de planta (APL) y altura de mazorca (ANZ). A las variables en porcentaje se les aplicó la transformación

angular:  $x' = \text{Arco Seno } (x + 0.5/100)^{1/2}$ .

El análisis de varianza combinado (Cuadro 2), que conjunta a las localidades de prueba, se realizó de manera correspondiente al diseño de bloques al azar, bajo el siguiente modelo estadístico:

$$Y_{ijk} = m + L_k + R_{jk} + M_i + (ML)_{ik} + E_{ijk}$$

donde:

$i = 1, 2, \dots, m$  (mestizos)

$j = 1, 2, \dots, r$  (repeticiones)

$k = 1, 2, \dots, l$  (localidades)

$Y_{ijk}$  = Observación del  $i$ -ésimo mestizo en la  $j$ -ésima repetición en la  $k$ -ésima localidad.

$m$  = Media general.

$L_k$  = Efecto de la  $k$ -ésima localidad.

$R_{jk}$  = Efecto de la  $j$ -ésima repetición, en la  $k$ -ésima localidad.

$M_i$  = Efecto del  $i$ -ésimo mestizo.

$(ML)_{ik}$  = Efecto de la interacción del  $i$ -ésimo mestizo con la  $k$ -ésima localidad.

$E_{ijk}$  = Error experimental.

La ganancia genética esperada por ciclo para rendimiento, se determinó con la ecuación siguiente:

$$\Delta G = k_1 l/4\sigma^2 A_{12} / \sigma P_{12} + k_2 l/4\sigma^2 A_{21} / \sigma P_{21}$$

donde:

$K$  = Coeficiente de selección estandarizado.

$\sigma^2A$  = Varianza aditiva.

$\sigma^2P$  = Desviación estándar fenotípica.

**Cuadro 2.** Componentes del análisis de varianza combinado, considerando los mestizos y localidades como efectos aleatorios.

Fuentes de variación	g.l.	C.M.	E.C.M.
Localidades	(l-1)		
R:L	(r-1)l		
Genotipos <sup>1</sup>	(g-1)		
-Mestizos (M)	(m-i)	M8	$\sigma^2e + r\sigma^2ml + rl\sigma^2m$
-Testigos (T)	(t-1)	M7	$\sigma^2e + r\sigma^2t1 + r1\sigma^2t$
M vs T	1	M6	$\sigma^2e + r\sigma^2m\prime st \times 1 + rl\sigma^2m\prime st$
Gen. x Loc.	(g-1) (l-1)	M5	$\sigma^2e + r\sigma^2gl$
-Mest x Loc	(m-1) (l-1)	M4	$\sigma^2e + r\sigma^2ml$
-Test x Loc	(t-1) (l-1)	M3	$\sigma^2e + r\sigma^2tl$
-M vs T x Loc	1 (l-1)	M2	$\sigma^2e + r\sigma^2m\prime st \times 1$
Error	(r-1) (g-1)1	M1	$\sigma^2e$

<sup>1</sup>Genotipos= M + T.

Las correlaciones fenotípicas entre los caracteres evaluados en el análisis combinado, se estimaron utilizando las fórmulas propuestas por Miller *et al.* (1958).

## Análisis de Componentes Principales

En el análisis de componentes principales (CP) se toman p variables X1, X2, . . . , Xp con el fin de encontrar combinaciones de ellas para producir índices Z1, Z2, . . .

,  $Z_p$ , que no están correlacionados. Los pasos en un análisis de componentes principales comprenden:

1. Codificar las variables  $X_1, X_2, \dots, X_p$  para obtener media cero y varianza uno.
2. Calcular la matriz de covarianza  $C$ . Esta es una matriz de correlación una vez realizado el paso 1.
3. Encontrar los valores eigen  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$  y los correspondientes vectores  $a_1, a_2, \dots, a_p$ . Los coeficientes del  $i$ -ésimo componente principal son dados por  $a_i$  mientras que  $\lambda_i$  estima su varianza.
4. Descartar los componentes principales que sólo representan una pequeña proporción de la variación en los datos.

## Distancia Generalizada $D^2$ de Mahalanobis

La formula cuadrática de la distancia de Mahalanobis se describe de la siguiente manera:

$$D^2 = (\mu_i - \mu_j)' V^{-1} (\mu_i - \mu_j)$$

donde:

$$\mu_i = \begin{bmatrix} \mu_{1i} \\ \mu_{2i} \\ \vdots \\ \mu_{pi} \end{bmatrix}$$

Ahora bien,  $V^{-1}$  es igual a la matriz de covarianza, que es el estimador conjunto de todas las muestras de las variables; por lo tanto, se supone que hay  $m$  muestras, siendo

la  $i$ -ésima muestra de tamaño  $n_i$ , con una matriz de covarianza  $C_i$ , por lo que es apropiado tomar  $C = S(n_i - 1) C_i / S(n_i - 1)$  como estimador conjunto de la matriz de covarianza común. Manly (1990) indica que cuando las covarianzas son estimadas con 100 o más grados de libertad, existe alta confiabilidad en las estimaciones obtenidas con el estadístico  $D^2$  de Mahalanobis.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los análisis de varianza combinados presentaron diferencias significativas en niveles de probabilidad de  $P < 0.05$  y  $P < 0.01$ , entre mestizos, para las características evaluadas en los cuatro grupos de mestizos. Con respecto a la interacción  $Loc \times M$ , se observaron diferencias ( $P < 0.05$  y  $P < 0.01$ ) en las variables REN y MZF debido, principalmente, a que en la localidad de Celaya, Gto. se presentó una mayor incidencia de *Fusarium*. Aunque en Gómez Palacio, Dgo. se tuvieron condiciones de sequía, el comportamiento en REN de mestizos en las poblaciones de madurez intermedia fue similar al de Celaya, Gto. Por otra parte, las poblaciones de madurez tardía presentaron mejor comportamiento en Gómez Palacio, Dgo. Esta cualidad positiva de las tardías en el ambiente de Gómez Palacio, Dgo. podría ser un efecto del mejoramiento a la tolerancia a sequía que se ha efectuado en la Pob. 43 (CIMMYT, 1986).

Al comparar los mestizos con los testigos (M vs T) en la población PA(B) se observó, que en promedio para las dos localidades, los mestizos fueron más precoces ( $P < 0.01$ ) y tuvieron menor APL ( $P < 0.05$ ), aunque presentaron menor rendimiento y

mayor porcentaje de MZF ( $P < 0.01$ ) (Promedios Cuadro 3). Por otra parte, la población PB(A) presentó menor promedio en REM ( $P < 0.01$ ) y mayor porcentaje de MZF ( $P < 0.01$ ) que los testigos. En este experimento, los mestizos no mostraron mayor precocidad que los testigos, pero si presentaron menor APL y ANZ ( $P < 0.01$ )

**Cuadro 3.** Medias de mestizos y testigos, y coeficiente de variación del análisis combinado para cada grupo.

	<b>REN</b> <b>(t ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>MZP<sup>a</sup></b>	<b>MZF<sup>d</sup></b>	<b>FMA</b> <b>(días)</b>	<b>FEE</b> <b>(días)</b>	<b>APL</b> <b>(cm)</b>	<b>AMZ</b>
<b>Complejo dentado PA(B)</b>							
Mestizos	7.63	11.2	19.5	69.1	71.1	205.8	113.7
Testigos	13.25	13.0	11.6	70.7	72.7	214.3	120.1
C.V.	20.62	71.9	48.9	3.7	3.6	9.8	14.9
<b>Complejo cristalino PB(A)</b>							
Mestizos	7.71	13.4	19.4	69.9	71.9	209.6	114.8
Testigos	13.27	14.2	11.9	69.7	71.7	229.5	128.8
C.V.	21.41	59.9	52.9	3.5	3.4	9.6	14.9
<b>Complejo dentado P43 (23)</b>							
Mestizos	7.69	14.0	19.6	72.9	74.9	204.8	111.9
Testigos	11.98	18.4	12.4	71.7	73.7	228.8	120.3
C.V.	24.09	63.0	54.9	3.3	3.2	10.2	16.3
<b>Complejo cristalino Pool 23(43)</b>							
Mestizos	7.78	9.0	12.4	73.1	75.1	205.9	104.9
Testigos	11.92	13.5	12.7	70.4	72.4	214.8	111.7
C.V.	19.69	75.6	69.0	3.5	3.4	9.8	16.5

<sup>d</sup>Datos con transformación angular.

El contraste M vs T indicó que la población P43(23) presentó menor REM y

APL que los testigos, y presentó mayor porcentaje de MZF. La población Pool 23(43) también presentó menor rendimiento que los testigos, pero presentó mayor sanidad con menor porcentaje de MZP y un valor de MZF similar al de testigos. Aunque los testigos presentaron mayor promedio en REM y menor porcentaje de MZF, algunas poblaciones de mestizos presentaron características sobresalientes, como menor porcentaje de MZP, mayor precocidad y menor APL y ANZ. Las variables MZP y MZF presentaron coeficientes de variación altos en los análisis combinados; por lo general, estas características son afectadas por las condiciones ambientales, y a pesar de la transformación de datos (arco seno) no siempre se consigue forzar hacia la normalidad de los datos.

En las poblaciones PA(B), PB(A), P43(23) y Pool 23(43) la media general (que comprende el promedio de mestizos y testigos) fue superada por 63, 75, 65 y 45 mestizos, respectivamente. En las poblaciones de madurez tardía, se presentaron mestizos que superaron los promedios de los testigos, con un comportamiento muy competitivo en Gómez Palacio, Dgo. En los cuadros 4 y 5 se puede observar que en los cuatro complejos germoplásmicos se cuenta con mestizos que presentan buen comportamiento agronómico para la mayoría de las características evaluadas, lo que permite seleccionar líneas adecuadas para su precombinación y así obtener el material básico con buen rendimiento y adaptabilidad para el siguiente ciclo de selección.

**Cuadro 4.** Promedios de algunos de los mejores mestizos de los complejos dentado PA(B) y cristalino PB(A), con respecto a rendimiento en el análisis combinado.

<b>Entrada</b>	<b>REN (t ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>MZP<sup>d</sup> (%)</b>	<b>MZF<sup>d</sup> (%)</b>	<b>FMA (días)</b>	<b>FEE (días)</b>	<b>APL (cm)</b>	<b>AMZ (cm)</b>
Complejo dentado PA(B)							
AN-447 <sup>t</sup>	14.12	8	11	72	74	230	134
48	13.18	0	6	70	72	210	111
AN—EXP1 <sup>t</sup>	12.93	6	1	70	72	213	116
AN—EXP2 <sup>t</sup>	12.70	6	5	71	73	201	112
23	12.52	1	6	70	72	263	149
28	10.78	1	2	68	70	211	98
116	10.76	1	13	67	69	206	116
78	10.69	6	5	70	72	219	121
6	10.20	3	5	68	70	225	120
106	9.98	0	2	68	70	193	105
13	9.95	0	8	69	71	214	118
33	9.82	0	4	70	72	205	114
79	9.79	1	4	67	69	209	108
109	9.65	0	2	67	69	230	125
3	9.44	1	6	68	70	193	99
113	9.40	3	3	68	70	201	109
x General	7.8	5	15	69	71	206	114
Tukey(0.05)	5.2	21.7	39.1	8.3	8.3	65.2	54.7
Complejo cristalino PB(A)							
AN_447 <sup>t</sup>	13.59	9	7	70	72	237	134
AN-EX P1 <sup>t</sup>	13.37	7	4	70	72	227	126
AN- EX P2 <sup>t</sup>	12.45	5	5	70	72	221	126
21	11.24	4	10	69	71	216	118
129	11.16	0	5	69	71	234	135
58	11.06	7	6	71	73	224	121
57	11.05	0	3	70	72	213	121
114	10.99	9	6	69	71	219	133
4	10.94	3	6	68	70	200	108
147	10.81	1	10	69	71	219	113
142	10.56	12	6	67	69	213	108
82	10.37	3	6	69	71	206	109
128	10.28	6	8	68	70	218	109
80	10.07	6	7	71	73	231	129
74	9.99	4	8	72	74	225	123
161	9.77	4	8	71	73	215	124
x General	7.9	7	15	70	72	210	115
Tukey(0.05)	5.45	23.1	40.8	7.9	7.9	65.4	55.5

T Testigos

**Cuadro 5.** Promedios de algunos de los mejores mestizos de los complejos dentado P43(23) y cristalino Pool 23(43), con respecto a rendimiento en el análisis combinado.

Entrada	REN (t ha <sup>-1</sup> )	MZP (%)	MZF (%)	FMA (días)	FEE (días)	APL (cm)	AMZ (cm)
Complejo dentado P43(23)							
86	13.37	7	5	72	74	209	115
AN—EXP1 <sup>t</sup>	13.35	9	8	72	74	228	118
4	12.88	4	2	73	75	215	114
99	12.76	7	5	71	73	199	110
66	12.41	3	3	73	75	230	131
114	11.76	10	9	74	76	208	114
AN-447t	11.73	16	6	72	74	235	123
2	11.63	4	5	71	73	210	106
26	11.45	3	9	74	76	223	126
33	11.25	0	2	72	74	189	104
AN-EXP2 <sup>t</sup>	11.13	7	6	73	75	218	119
45	10.93	6	8	72	74	205	120
25	10.79	6	2	72	74	210	113
63	10.21	4	8	70	72	190	103
× General	7.8	8	16	73	75	206	112
Tukey(0.05)	5.98	26.9	42.6	7.7	7.7	66.8	58.2
Complejo cristalino Pool 23(43)							
AN-447t	12.78	11	13	72	74	228	125
AN-EXP1 <sup>t</sup>	12.42	3	1	70	72	216	115
83	11.98	0	1	73	75	226	104
50	11.63	6	0	72	74	206	100
25	11.45	5	0	73	75	221	103
1	11.03	5	7	71	73	210	108
35	10.88	0	2	72	74	205	108
49	10.82	4	2	74	76	220	115
2	10.71	0	5	70	72	210	115
AN-EXP2 <sup>t</sup>	10.57	7	6	70	72	201	95
73	10.27	2	3	74	76	231	114
37	10.18	4	3	71	73	206	103
100	10.14	1	7	72	74	192	97
48	9.28	5	2	74	76	228	118
12	9.14	6	8	71	73	203	105
107	9.03	4	10	72	74	204	94
34	8.99	3	1	74	76	222	136
98	8.43	0	12	72	74	201	93
× General	7.9	4	7	73	75	206	105
Tukey(0.05)	4.87	17.3	26.2	8.1	8.1	63.2	54.2

T: Testigos

La ganancia genética estimada para rendimiento en el primer ciclo de SRR fue mayor en las poblaciones de Madurez Intermedia ( $DG = 1.637 \text{ t ha}^{-1}$ ) que para las poblaciones de madurez tardía ( $DG = 1.146 \text{ t ha}^{-1}$ ). Menz y Hallauer (1998) reportan una  $DG = 1.42 \text{ t ha}^{-1}$  para el programa de SRR iniciado con las poblaciones BS28 y BS29, el cual se sitúa como valor intermedio a los observados en este trabajo.

### **Correlaciones Fenotípicas**

En las dos poblaciones de madurez intermedia se observaron valores calculados similares (Cuadro 6). De los niveles más significativos, destaca la correlación positiva entre FMA y FFE, APL y ANZ, y MZF con MZP, mientras que la variable REN presentó una alta correlación negativa con MZF. En las poblaciones de madurez tardía, P43(23) y Pool 23'(43), (Cuadro 7) también se presentaron valores altos de correlación fenotípica entre las mismas variables. Con excepción al caso de la población Pool 23(43), donde REN presentó valores más reducidos de correlación negativa con MZP ( $r = -0.18$ ) y MZF ( $r = -0.37^{**}$ ). Esta población obtuvo los promedios más bajos de MZP y MZF de las cuatro poblaciones de mestizos. Por otra, parte la presencia de correlaciones negativas obtenidas entre REN con MZP, MZF, FMA y FFE, tanto en los complejos dentados como cristalinos, es una condición que pudiera favorecer la selección ya que al elegir los mestizos más rendidores, indirectamente se seleccionan materiales más precoces y con menor porcentaje de MZP y MZF.

**Cuadro 6.** Correlaciones fenotípicas para la población PA(B) y PB(A), arriba y abajo de la diagonal, respectivamente.

	<b>REN</b>	<b>MZP</b>	<b>MZF</b>	<b>FMA</b>	<b>FEE</b>	<b>APL</b>	<b>AMZ</b>
REN		-0.31**	-0.65**	-0.24*	-0.24*	0.25*	0.08
MZP	-0.35**		0.38**	0.11	0.12	-0.01	0.06
MZF	-0.71**	0.40**		0.20*	0.20*	-0.19	-0.09
FMA	-0.25*	0.22*	0.15		1.00**	-0.14	-0.04
FEE	-0.25*	0.22*	0.14	1.00**		-0.13	-0.03
APL	0.25*	-0.01	-0.11	0.04	0.04		0.72**
AMZ	0.21*	-0.02	-0.12	0.13	0.13	0.70**	

\*Diferencias al 5%; \*\* Diferencias al 1%.

**Cuadro 7.** Correlaciones fenotípicas para la población P43(23) y Pool23(43), arriba y abajo de la diagonal, respectivamente.

	<b>REN</b>	<b>MZP</b>	<b>MZF</b>	<b>FMA</b>	<b>FEE</b>	<b>APL</b>	<b>AMZ</b>
REN		-0.37**	-0.69**	-0.41**	-0.41**	0.33**	0.18
MZP	-0.18		0.38**	0.17	0.17	-0.05	0.04
MZF	-0.37**	0.19		0.26**	0.25**	-0.22*	-0.05
FMA	-0.37**	0.15	0.01		1.00**	-0.02	0.16
FEE	-0.37**	0.14	0.01	1.00**		-0.01	0.17
APL	0.32**	-0.01	-0.32**	0.13	0.13		0.70**
AMZ	0.12	0.08	-0.21*	0.15	0.15	0.72**	

\*Diferencias al 5%; \*\* Diferencias al 1%.

Las correlaciones fenotípicas entre REN y APL fueron positivas y significativas en las cuatro poblaciones de mestizos; en promedio, la altura de planta de las poblaciones

fue más baja que la de los testigos. En el programa de mejoramiento de maíz del CIMMYT (1986) la reducción en la altura de planta, lejos de perjudicar otras características convenientes, mejoró la capacidad de la población de responder a densidades mayores de plantas, lo cual indica que la reducción en este carácter puede influir positivamente en cuanto a resistencia al estrés calórico.

### **Análisis de Componentes Principales**

A través del análisis de CP se observó que las variables FMA, FEE, y REN presentaron una mayor influencia sobre el CP1 en las cuatro poblaciones de mestizos (Cuadros 8 y 9), teniendo siempre una relación opuesta, es decir que los mestizos con alto rendimiento tienden a ser más precoces (REN se correlacionó negativamente con FMA y FEE). El CP2 separó a los mestizos con respecto a APL y AMZ las cuales presentaron un comportamiento opuesto a MZF, indicando que existen mestizos con altos promedios de APL y ANZ, que presentaron bajos porcentajes de MZF (MZF se correlaciono negativamente con APL y ANZ). Las variables MZP y MZF son las que tuvieron mayor influencia en el CP3 en las cuatro poblaciones de mestizos y presentaron un comportamiento opuesto a REM, FMA y FEE; es decir que de acuerdo al porcentaje de variabilidad explicado por este componente, existen mestizos con alto rendimiento y tardíos que presentan bajos porcentajes de MZP y MZF; la relación negativa de REM con MZP y MZF también se detectó en la estimación de las correlaciones fenotípicas (Cuadros 6 y 7)

**Cuadro 8.** Elementos del vector propio asociados a los primeros tres componentes principales de los mestizos de madurez intermedia.

<b>Característica Agronómica</b>	<b>CP1</b>		<b>CP2</b>		<b>CP3</b>	
	<b>PA(B)</b>	<b>PB(A)</b>	<b>PA(B)</b>	<b>PB(A)</b>	<b>PA(B)</b>	<b>PB(A)</b>
REN	-0.428	0.469	-0.022	-0.244	-0.403	0.263
MZP	0.247	-0.358	-0.147	0.029	0.463	-0.356
MZF	0.413	-0.424	0.010	0.210	0.465	-0.459
FMA	0.477	-0.474	-0.300	-0.358	-0.423	0.374
FEE	0.476	-0.471	-0.307	-0.358	-0.419	0.381
APL	-0.302	0.134	-0.602	-0.546	0.141	-0.427
AMZ	-0.198	0.088	-0.657	-0.584	0.178	-0.356
Valor propio	2.567	2.544	1.640	1.937	1.477	1.253
Var. explicada	36.671	36.348	23.431	27.671	21.099	17.897
Var. acumulada	36.671	36.348	60.101	64.019	81.200	81.916

**Cuadro 9.** Elementos del vector propio asociados a los primeros tres componentes principales de los mestizos de madurez tardía.

<b>Característica agronómica</b>	<b>CP1</b>		<b>CP2</b>		<b>CP3</b>	
	<b>P43(23)</b>	<b>P23(43)</b>	<b>P43(23)</b>	<b>P23(43)</b>	<b>P43(23)</b>	<b>P23(43)</b>
REN	-0.494	0.352	0.186	0.388	-0.198	-0.111
MZP	0.292	-0.185	-0.031	-0.100	0.556	0.733
MZF	0.421	-0.078	-0.157	-0.432	0.419	0.425
FMA	0.475	-0.631	0.322	0.022	-0.385	-0.226
FEE	0.476	-0.628	0.330	0.019	-0.376	-0.237
APL	-0.197	-0.118	0.578	0.605	0.308	0.205
AMZ	-0.047	-0.171	0.626	0.535	0.303	0.346
Valor propio	2.711	2.299	1.875	2.073	1.194	1.100
Var. explicada	38.728	32.847	26.788	29.616	17.051	15.709
Var. acumulada	38.728	32.847	65.516	62.463	82.567	78.172

La ordenación de los mestizos de acuerdo al CP1 y CP2 (mestizos considerados en los Cuadros 4 y 5) facilita que los patrones de variabilidad dentro de un gran conjunto de datos puedan ser más fácilmente comprendidos. En la Figura 1 se observa que el CP1 separó a los mestizos de la población PA(B) en dos grandes grupos, ubicando a los de mayor precocidad y rendimiento en el extremo superior izquierdo (-,+) del CP1 (28, 106, 79, 3, 113), y los de menor rendimiento y más tardíos en el extremo inferior opuesto (+,-). El CP2 separó a los mestizos de acuerdo a la altura de planta y de mazorca ubicando a los de menor altura (106, 3, 113) en la parte superior (-,+) del CP2 y a los de mayor altura (23, 48, 109) en la parte inferior (-,-). Con respecto a los mestizos de la población P3(A) se observó un comportamiento similar al complejo dentado excepto

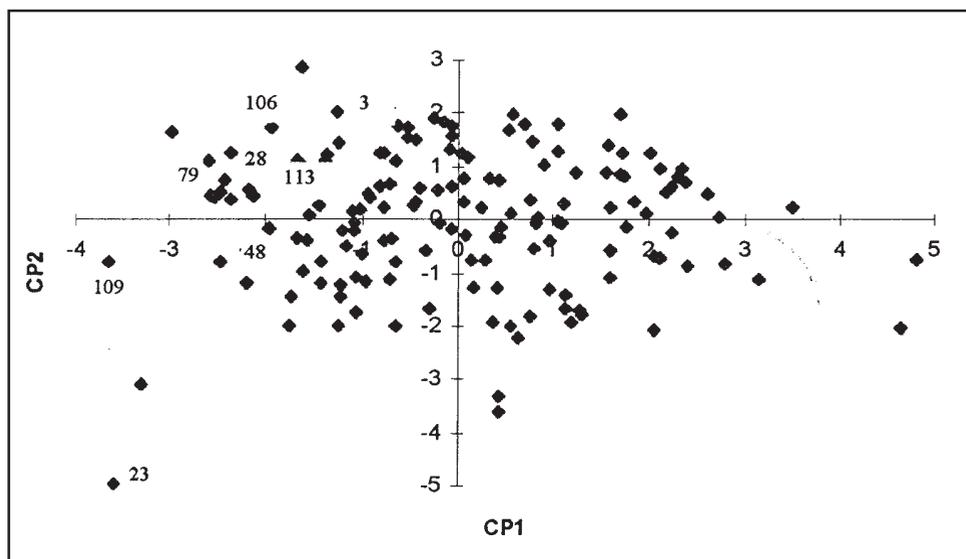
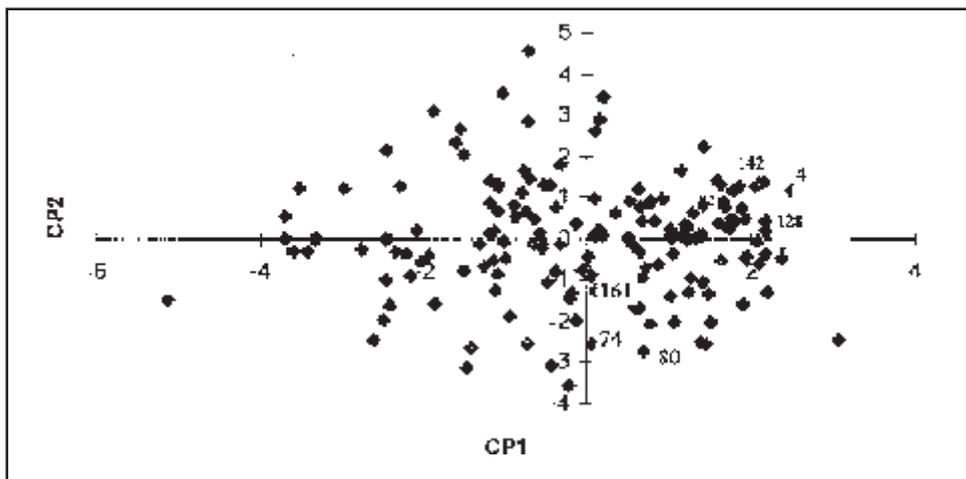


Figura 1. Distribución de los 154 mestizos del complejo dentado PA(B), sobre el primer (CP1) y segundo (CP2) componente principal.

que los mestizos de mayor precocidad y rendimiento (4, 142, 82, 128), se ubican en el extremo superior derecho (+,+) del CP1 (Figura 2) y los de menor rendimiento y más tardíos (80, 74, 161) en el extremo inferior derecho (+,-).



**Figura 2. Distribución de los 164 mestizos del complejo cristalino PB(A), sobre el primer (CP1) y segundo (CP2) componente principal.**

Con respecto a la distribución de los 135 mestizos de la población P43(23) se observa que los mestizos 86, 4, 66 y 114, que poseen alto rendimiento y mayor altura de planta y de mazorca, se sitúan en el cuadrante superior izquierdo (-,+). El cuadrante inferior izquierdo (-,-) contiene aquellos mestizos de alto rendimiento, menor altura de planta y de mazorca como son los mestizos 99, 33 y 63 (Figura 3). Por otra parte, la distribución de los 113 mestizos de la población Pool23(43) se presenta en la Figura 4. En el cuadrante superior izquierdo (-,+), se sitúan los mestizos 49, 73, 48 y 34, que son

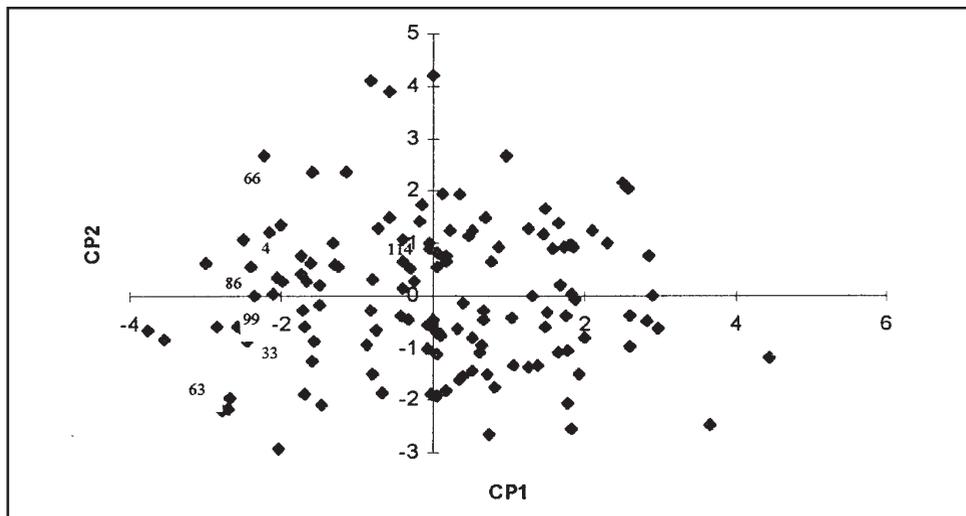


Figura 3. Distribución de los 135 mestizos del complejo dentado P43(23), sobre el primer (CP1) y segundo (CP2) componente principal.

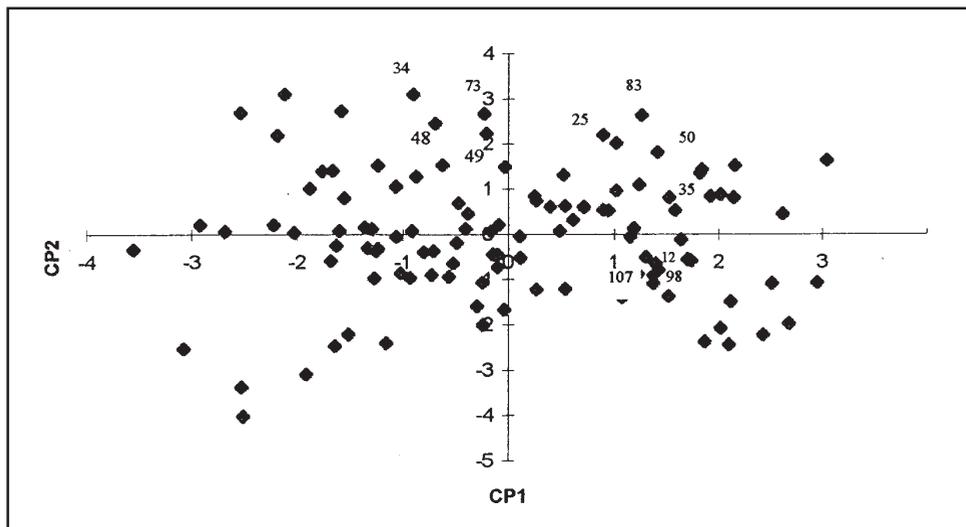


Figura 4. Distribución de los 113 mestizos del complejo cristalino Pool23(43), sobre el primer (CP1) y segundo (CP2) componente principal.

más tardíos y de mayor altura de planta y mazorca. Los mestizos 83, 50, 25 y 35 que presentan alto rendimiento y bajo porcentaje de mazorcas con *Fusarium* se localizan en el cuadrante superior derecho (+, +). Los mestizos con alta precocidad y menor altura de planta y mazorca, pero con alto porcentaje de mazorcas con *Fusarium* se sitúan en el cuadrante inferior derecho (+, -) y comprenden las entradas 12, 107, y 98. Como puede apreciarse, el análisis de componentes principales fue eficiente para ubicar los diferentes grupos de mestizos conforme a las características evaluadas en cada experimento, lo que permite seleccionar mestizos que presentan características agronómicas deseables.

### Distancia Genética

La distancia calculada por la  $D^2$  de Mahalanobis entre las 4 poblaciones permite señalar un rango de valores de  $D^2$  de 0.670 a 10.670 (Cuadro 10), y que las poblaciones PA(B) y PB(A) fueron las de menor divergencia con distancia  $D^2 = 0.670$ . La mayor divergencia se dió entre las poblaciones PA(B) y Pool 23(43) con un valor de  $D^2 = 10.670$ , seguida de las poblaciones PB(A) y Pool 23(43) donde  $D^2 = 8.389$ .

**Cuadro 10.** Distancia  $D^2$  de Mahalanobis entre las cuatro poblaciones de mestizos.

	Población		
	PA(B)	PB(A)	P43(23)
Pool23(43)			
PA(B)		0.670	6.930
PB(A)			4.221
P43(23)			3.380
Pool 23(43)			

El método encadenamiento completo (Gutiérrez, 1994) del análisis de conglomerados se utilizó para construir el fenograma representado en la Figura 5. Los resultados indican que la asociación entre las poblaciones se inicia a valores  $D^2=0.670$  formando tres grupos [PA(B), PB(A)], [P43(23)] y [Pool 23(43)]. Al nivel  $D^2=3.380$  se forman dos grupos [PA(B), PB(A)] y [P43(23), Pool23(43)], y finalmente al nivel  $D^2= 10.670$  se formó un solo grupo [PA(B), PB(A), P43(23), POO123(43)]. El nivel de divergencia estimado entre las poblaciones de madurez tardía fue mayor que el estimado entre las poblaciones de madurez intermedia, por lo que se espera presenten mayor heterosis. Las poblaciones de madurez tardía, presentaron mestizos que superaron en rendimiento a varios de los testigos y el promedio de los 10 mestizos con alto rendimiento

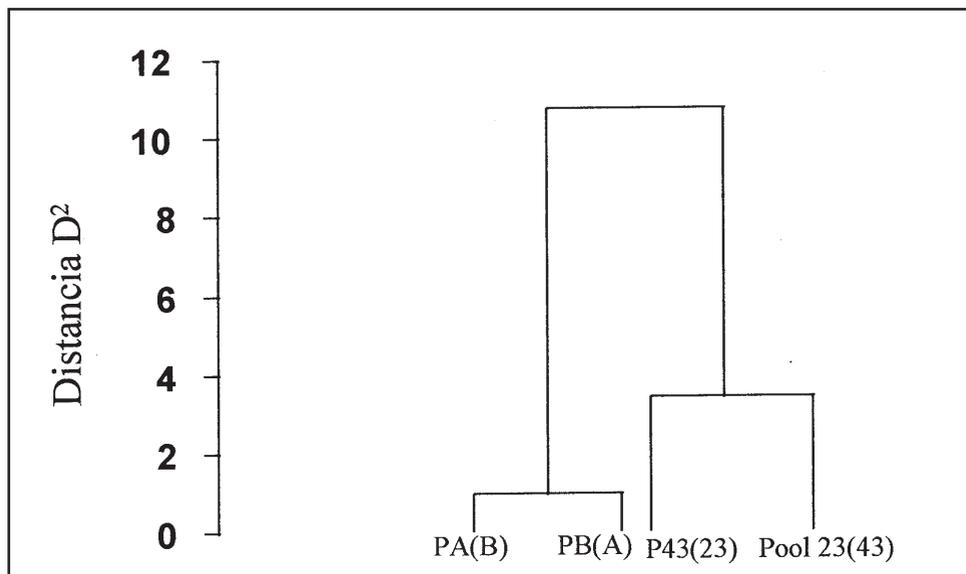


Figura 5. Fenograma que sitúa la divergencia entre las cuatro poblaciones de mestizos utilizando el estadístico  $D^2$ .

comprendieron el 98.7 y 91.4% del rendimiento promedio de los testigos, mientras que las poblaciones de Madurez Intermedia comprendieron el 81.2 y 83.0% (poblaciones dentada y cristalina, respectivamente). Entre las poblaciones PA(B) (complejo dentado) y Pool 23(43) (complejo cristalino) se detectó la mayor divergencia, estas poblaciones pueden ser consideradas en la obtención de híbridos con alto rendimiento. Cortez *et al.* (1985) señalan que la práctica de considerar tipo de grano, como criterio de clasificación de poblaciones heteróticas, proporciona buenos resultados, obteniendo la mejor respuesta heterótica en la cruce de cristalino por dentado. En el caso de las poblaciones P(A) y Pool23, también se aprovecharía el patrón heterótico de madurez intermedia por tardío, ya que los materiales divergentes, dan las mejores respuestas heteróticas, y mejoran la eficiencia en la creación de híbridos. Finalmente, se señala con respecto a la formación de híbridos, que los que se desarrollan a partir de poblaciones mejoradas, producen rendimientos más altos. Por lo tanto, este esquema de SRR debe ser continuado por más ciclos, antes de iniciar la selección de líneas.

## CONCLUSIONES

El primer ciclo de SRR redituó en avance genético estimado para rendimiento y fue 43 % más alto para las poblaciones de madurez intermedia.

El análisis de componentes principales permitió ubicar grupos de mestizos con características sobresalientes, con alto rendimiento y resistencia a enfermedades.

El estadístico  $D^2$  de Mahalanobis permitió clarificar la relación entre las poblaciones y detectó divergencia genética entre las poblaciones originales (poblaciones de madurez

tardía) con las poblaciones que incluyen parte de su germoplasma (poblaciones de madurez intermedia). La notable distancia entre las poblaciones P(A) y Pool 23, ciclo intermedio y tardío, respectivamente, es un indicador útil para probar el patrón heterótico en cuanto a madurez de ciclos vegetativos.

## LITERATURA CITADA

- CIMMYT Personal de Maíz. 1986: Mejoramiento de la excelencia: Logros en el mejoramiento con la raza Tuxpeño. CIMMYT, México, D.F. México. 27 pp.
- Comstock. R.E.; H.F. Robinson; P.H. Harvey. 1949. A breeding procedure designed to make maximum use of both general and specific combining ability. *Agron. J.* 41:360—367.
- Cortez, H.; A. Rodríguez; M. Gutiérrez; J. Durón; R. Girón; M. Oyervides .1985. Evaluation of broad-base improved populations of maize (*Zea mays* L.) I. Cumulative gene effects and heterosis. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coah., México. 43p.
- Gutiérrez, G.P. 1994. Análisis Estadístico Multivariado. Facultad de Ingeniería. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco. México. 92 pp.
- Manly, B.F.J. 1990. *Multivariate Statistical Methods a Primer*. Chapman and Hall. London. 159 pp.
- Martin, J.M.; A.R. Hallauer. 1980. Seven cycles of reciprocal recurrent selection in BSSS and BSCB1 maize populations. *Crop Sci.* 20:599-603.
- Menz, M.A.; A.R. Hallauer. 1998. Reciprocal recurrent selection of two tropical corn popu-

lations adapted to Iowa. Literature Update on Maize. 4:25.

Miller, P.A., J.C. Williams, H.F. Robinson, and R.E. Comstock. 1958 Estimates of genetic and environmental variances and covariances in upland cotton and their implications in selection. *Agron. J.* 50:126—131.