

# RESPUESTA A LA SELECCIÓN PARA RESISTENCIA A SEQUÍA EN

## MAÍZ (*Zea mays* L.)

Carlos Hugo Avendaño Arrazate, José Domingo Molina Galán, Esaú del Carmen Moreno Pérez, Jorge Cadena Iñiguez, Juan Francisco Aguirre Medina y Gabriel Rincón Enríquez

### RESUMEN

Se estudió la respuesta a la selección masal para componentes del rendimiento de grano y la estabilidad en dos variedades originales de maíz, Zacatecas 58 y Cafime, en las cuales se aplicaron 19 y 16 ciclos de selección masal para resistencia a sequía, respectivamente. Ambos materiales genéticos se evaluaron en dos localidades (Montecillo y Tecámac, Estado de México) con tres ambientes de humedad del suelo (riego, temporal y sequía). Los estimadores del avance genético por ciclo de selección y los parámetros de estabilidad utilizados indican que en el ambiente de sequía se encontraron los avances genéticos más altos por ciclo para ambas variedades, pero la mayor ganancia acumulada en unidades para los caracteres evaluados,

se obtuvo en condiciones de riego. Los compuestos de selección de Cafime fueron más consistentes que los de Zacatecas 58. El peso de mazorca promedio por planta se incrementó conforme aumentó el número de ciclos de selección en las dos variedades y de manera concomitante se incrementó el coeficiente de regresión. Se deduce que al aumentar la selección masal visual aumenta el rendimiento y la sensibilidad ambiental lineal ( $b_i$ ), pero no la sensibilidad ambiental no lineal ( $S^2d_i$ ). Finalmente, el aumento del rendimiento y de sus componentes estuvo positivamente correlacionado con el coeficiente de regresión lineal del rendimiento sobre el número de ciclos de selección, pero no hubo correlación con las desviaciones de regresión.

### Introducción

El maíz (*Zea mays* L.) es de gran importancia en la alimentación humana y animal en todo el mundo. La preferencia del grano ha motivado que se cultive en áreas agrícolas con problemas de sequía intermitente y esta situación repercute en la disminución del rendimiento. La selección de genotipos para rendimiento en condiciones ambientales favorables o desfavorables, es un procedimiento necesario para determinar el mejor ambiente donde un carácter deseable pueda expresarse, y el resultado se manifieste en mayor ganancia genética por efecto de la selección (Fischer *et al.*, 1989). Los criterios más usados en la selección para un

buen comportamiento estable son la media del rendimiento, la regresión como respuesta de la media del rendimiento en un sitio y las desviaciones de regresión (Finlay y Wilkinson, 1963; Eberhart y Russell, 1966). Finlay y Wilkinson (1963) utilizaron la media de los genotipos en cada uno de los ambientes para aplicar el modelo sobre ambientes; así, los genotipos que expresan pendiente cercana a 1 y alto rendimiento son considerados con buena adaptación a todos los ambientes, mientras que Eberhart y Russell (1966) consideran que un genotipo es estable si su coeficiente de regresión ( $b_i$ ) es igual a 1 y las desviaciones de regresión ( $S^2d_i$ ) iguales a cero. Por lo tanto, los genotipos que no interaccionan

con los factores ambientales mostrarán pendiente cero y podrían ser estables. Los genotipos que muestren respuesta media a los cambios ambientales tendrán pendientes iguales a 1, y el genotipo más estable será el que muestre el valor de  $S^2d_i$  más próximo a cero.

En México, el problema de la interacción genético-ambiental ha sido estudiado por diferentes autores (Carballo, 1970; Márquez, 1974). Márquez (1974) cita que la interacción genotipo-ambiente es el comportamiento relativo diferencial que exhiben los genotipos cuando se les somete a diferentes ambientes. Carballo (1970) aplicó el modelo propuesto por Eberhart y Russell (1966) en variedades de maíz categorizadas en

función de su comportamiento a través de los ambientes y encontró que el método fue efectivo en la discriminación de las variedades en función de los parámetros  $b_i$  y  $S^2d_i$ . Con relación al concepto de estabilidad, Márquez (1974), señala que si algo es estable, no cambia a través del tiempo y el espacio, y si una variedad es estable, responderá exactamente a los cambios ambientales y no interacciona con el ambiente. En maíz, trigo, arroz y garbanzo, se ha consignado que el modelo de Eberhart y Russell ha sido apropiado para analizar los parámetros de estabilidad (Gutiérrez y Fraga, 1999; Gargi y Saikia, 2000; Bose *et al.* 2004; Rao y Rao, 2004). Por su parte, Hohls (2001) reporta

### PALABRAS CLAVE / Avance Genético / Cafime / Maíz / Parámetros de Estabilidad / Sequía / Zacatecas 58 /

Recibida: 30/10/2008. Modificado: 31/10/2009. Aceptado: 02/11/2009.

**Carlos Hugo Avendaño Arrazate.** Ingeniero Agrónomo, Universidad Autónoma Chapingo (UACH), México. Maestría y Doctorado en Genética, Colegio de Postgraduados (COLPOS), México. Investigador, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Dirección: INIFAP, Campo Experimental Rosario Izapa. Apdo. Postal 96. Km. 18

Carretera Tapachula-Cacahoatán C.P. 30870. México. e-mail: [avendano.carlos@inifap.gob.mx](mailto:avendano.carlos@inifap.gob.mx)  
**José Domingo Molina Galán.** Ingeniero Agrónomo, UACH, México. Maestría, COLPOS, México. Ph.D., North Carolina State University, EEUU. Profesor Investigador, COLPOS, México.  
**Esaú Del Carmen Moreno Pérez.** Ingeniero Agrónomo, UACH,

México. Maestría y Doctorado, COLPOS, México. Profesor Investigador, UACH, México.  
**Jorge Cadena Iñiguez.** Ingeniero Agrónomo, Universidad Autónoma de Chiapas, México. Maestría y Doctorado, COLPOS, México. Profesor Investigador, COLPOS, México.  
Juan Francisco Aguirre Medina. Ingeniero Agrónomo, Universidad de Sonora, México. Maestría y

Doctorado, COLPOS, México. Investigador, INIFAP México.  
**Gabriel Rincón Enríquez.** Ingeniero Agrónomo, UACH, México. Maestría, COLPOS, México. Doctorado, Université de Marseille, Francia. Investigador, Centro de Investigación en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco AC. México.

## DROUGHT RESISTANCE SELECTION RESPONSE IN CORN (*Zea mays* L.)

Carlos Hugo Avendaño Arrazate, José Domingo Molina Galán, Esaú del Carmen Moreno Pérez, Jorge Cadena Iñiguez, Juan Francisco Aguirre Medina and Gabriel Rincón Enríquez

### SUMMARY

The response to masal selection for components of grain yield, and stability, were studied in two original varieties of corn, Zacatecas 58 and Cafime, in which 19 and 16 cycles of masal selection for drought resistance were applied, respectively. Both genetic materials were evaluated in two localities (Montecillo and Tecámac, State of Mexico) in three soil moisture environments (irrigation, rainfall and drought). The genetic advance estimates for a selection cycle and the stability parameters used indicate that in the drought environment the highest genetic advances in a cycle were found for both varieties, but the largest accumulated profit in units for the evaluated traits, was ob-

tained under irrigation conditions. The selection compounds of the Cafime variety were more consistent than those of Zacatecas 58. In both varieties, the ear corn average weight increased as the selection cycle number increased and, thus, the coefficient of regression also increased. It is deduced that an increase of visual masal selection increases the yield and the environmental linear sensibility ( $b_i$ ), but not the environmental nonlinear sensibility ( $S^2d_i$ ). Finally, the yield increase and its components were positively correlated with the linear regression coefficient of the yield concerning the selection cycles number, but there was no correlation with the regression deviation.

## RESPOSTA À SELEÇÃO PARA RESISTÊNCIA DA SECA NO MILHO (*Zea mays* L.)

Carlos Hugo Avendaño Arrazate, José Domingo Molina Galán, Esaú del Carmen Moreno Pérez, Jorge Cadena Iñiguez, Juan Francisco Aguirre Medina e Gabriel Rincón Enríquez

### RESUMO

Estudou-se a resposta à seleção massal para componentes do rendimento de grão e a estabilidade em duas variedades originais de milho, Zacatecas 58 e Cafime, nas quais foram aplicadas 19 e 16 ciclos de seleção massal para resistência à seca, respectivamente. Ambos materiais genéticos foram avaliados em duas localidades (Montecillo e Tecámac, Estado do México) com três ambientes de umidade do solo (irrigação, temporal e seca). Os estimadores do avanço genético por ciclo de seleção e os parâmetros de estabilidade utilizados indicam que no ambiente de seca se encontraram os avanços genéticos mais altos por ciclo para ambas as variedades, mas o maior ganho acumulado em unidades para os caracteres avaliados, foi obtido

em condições de irrigação. Os compostos de seleção de Cafime foram mais consistentes que os de Zacatecas 58. O peso médio de espiga por planta se incrementou na medida em que aumentou o número de ciclos de seleção nas duas variedades e de maneira concomitante se incrementou o coeficiente de regressão. É deduzido que ao aumentar a seleção massal visual aumenta o rendimento e a sensibilidade ambiental linear ( $b_i$ ), mas não a sensibilidade ambiental não linear ( $S^2d_i$ ). Finalmente, o aumento do rendimento e de seus componentes esteve positivamente relacionado com o coeficiente de regressão linear do rendimento sobre o número de ciclos de seleção, mas não houve correlação com as desvios de regressão.

que los genotipos de maíz con alta tolerancia al estrés hídrico presentan bajos coeficientes de regresión. Por lo anterior, el objeto del presente trabajo fue estudiar la respuesta a la selección masal y la estabilidad en dos poblaciones de maíz, Zacatecas 58 y Cafime, con 19 y 16 ciclos de selección para resistencia a sequía, respectivamente, evaluadas en dos localidades, cada una en tres ambientes (riego, temporal y sequía).

### Materiales y Métodos

Los experimentos se llevaron a cabo en dos localidades del Estado de México, en los campos experimentales del Colegio de Postgraduados en Montecillo (19°29'N y

98°53'O, y altitud de 2250m) y en Tecámac (19°43'N y 98°56'O y altitud de 2300m). Montecillo presenta un clima Cb(wo) (w) (i')g, templado con verano fresco largo, temperatura media anual de 12-18°C y precipitación media anual de 637mm. Tecámac tiene un clima BS<sub>1</sub>kw(w)(i')g, clasificado como semiseco con verano fresco y lluvioso, precipitación media anual de 563mm, el mes más seco con <20mm, y la temperatura media anual de 12-18°C (García, 1988).

Se evaluaron 19 ciclos de selección masal visual estratificada en condiciones de sequía (SMS) en la variedad Zacatecas 58 y 16 ciclos de SMS en la variedad Cafime. Los ciclos de selección de Zacate-

cas 58 y Cafime se generaron en Montecillo y Chapingo, con la metodología de selección masal visual estratificada propuesta por Molina (1980), y el criterio de selección fue el rendimiento individual con una presión de selección del 5% por ciclo. La selección de las plantas más productivas del lote de evaluación se realizó visualmente, considerando el tamaño más grande de la mazorca. La selección de ambas poblaciones se realizaron para áreas productoras de maíz de los Valles Altos de México con regímenes de baja precipitación. Se usó un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. La unidad experimental fue de dos surcos de 0,8×5,6m para la localidad de Montecillo y

de 0,8×4m para Tecámac. La parcela experimental contó con 30 y 22 matas en Montecillo y Tecámac, respectivamente.

La siembra para el ambiente de sequía se efectuó el 22/03/2002 en Montecillo y el 02/04/2002 Tecámac. La sequía se generó administrando un riego a capacidad de campo inmediatamente después de la siembra y otro al inicio de la emergencia de modo de asegurarla. Para evitar el encostramiento del suelo, no se administró ningún otro riego durante el ciclo del cultivo. La siembra para el ambiente de riego se realizó el 03/05 en Montecillo y el 30/04 en Tecámac. En este caso se aplicaron los riegos de auxilio necesarios para que no le faltara humedad al cultivo. La siembra para el

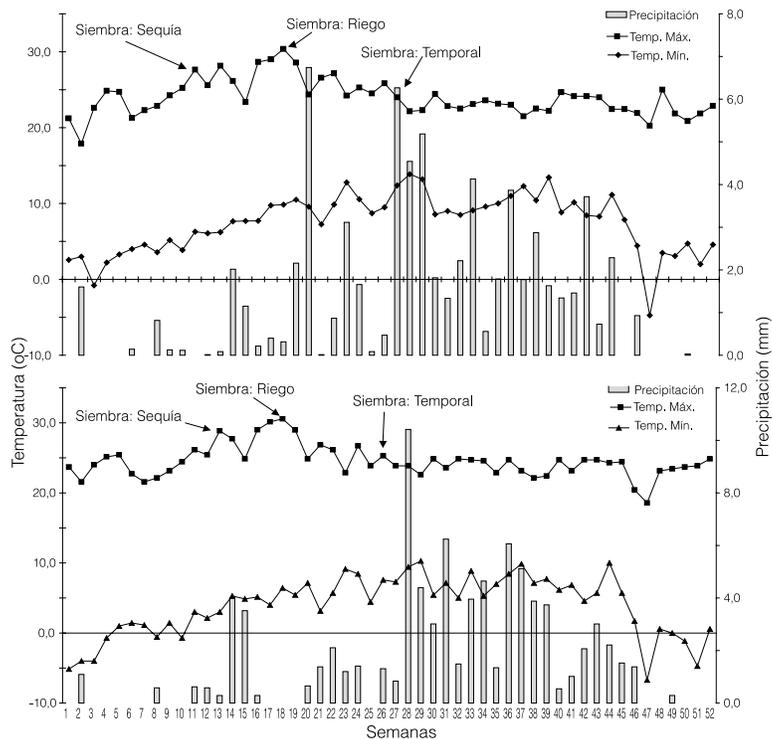


Figura 1. Datos de temperatura máxima y mínima y de precipitación para las localidades de Montecillo (arriba) y Tacámac (abajo), Edo. de México, en el año 2002.

ambiente de temporal fue el 04/07 en Tecámac y el 09/07 en Montecillo. Se fertilizó con una dosis 40-40-00 al momento de la siembra y una adicional de 40-00-00 en el momento del aporque. Todos los experimentos estuvieron expuestos a la lluvia ocurrida durante el temporal. En las Figura 1 se muestra la precipitación, temperaturas máximas y mínimas semanales de las dos localidades durante el desarrollo del cultivo.

Las variables evaluadas fueron días a floración masculina (DFM), medida como el número de días de la siembra al 50% de las plantas con dehiscencia de anteras; altura de planta (AP) desde la base del tallo hasta la base de la espiga; peso de mazorca por planta (PMPP; g) corregida al 12,6% de humedad. En una muestra de 10 mazorcas se determinaron los componentes de rendimiento longitud de mazorca (LM; cm) medida desde la base hasta el ápice del olote; diámetro de mazorca (DM; cm), medido en la parte media de la mazorca; número de hileras por mazorca (NHM) y número de gra-

nos por hilera (NGHM). Para cada variable se hizo análisis de varianza por localidad y ambiente, análisis combinado

entre localidades, y comparaciones de medias de Tukey ( $P \leq 0,05$ ).

El avance genético para cada carácter en la población se estimó mediante el coeficiente de regresión lineal simple (RLS) del carácter en estudio (Y) sobre el número de ciclos de selección (X). La variedad original se consideró como el ciclo cero de selección ( $C_0$ ). Para cada carácter se ajustó un modelo de regresión lineal simple sobre los ciclos de selección (19 en Zacatecas 58 y 16 en Cafime).

El coeficiente de regresión se tomó como el avance genético ( $\Delta_G$ ) promedio por ciclo de selección, representado como porcentaje de la variedad original mediante la expresión

$$\Delta_G = (B_1/\hat{C}_0) \times 100$$

donde  $\Delta_G$ : avance genético promedio por ciclo de selección,  $\hat{C}_0$ : media del carácter en la va-

riedad original;  $B_1$ : coeficiente de regresión lineal simple.

Se realizó análisis combinado de regresión lineal simple considerando las dos localidades para todos los caracteres y el análisis de varianza combinado por separado para cada población en los tres ambientes de evaluación: riego, temporal y sequía. Además, se estimaron los parámetros de estabilidad para cada variable, en las poblaciones (Eberhart y Russell, 1966), mediante el programa de computación propuesto por Rodríguez *et al.* (2005).

## Resultados y Discusión

### Respuesta a la selección

La respuesta a la selección con base en los coeficientes de regresión ( $B_1$ ) y el porcentaje de ganancia promedio por ciclo de selección ( $\Delta_G$ ) variaron con la localidad y el ambiente de evaluación (Tablas I y II).

La mayor ganancia genética en la población Zacatecas 58, en días a floración masculina (DFM) se obtuvo en Montecillo en el ambiente de

TABLA I  
AVANCE GENÉTICO PROMEDIO POR CICLO EN 19 CICLOS DE SELECCIÓN MASAL, EN LA VARIEDAD DE MAÍZ ZACATECAS 58, RESPECTO A LA VARIEDAD ORIGINAL EN LOS ANÁLISIS POR LOCALIDAD Y COMBINANDO

	Riego			Temporal			Sequía		
	Montecillo	Tecámac	Combinado	Montecillo	Tecámac	Combinado	Montecillo	Tecámac	Combinado
DFM									
$b_1$	1,2**	1,4**	1,3**	1,0**	0,9**	0,9**	1,5**	2,0**	1,8**
$\Delta_G$	1,9	2,1	2,0	1,5	1,3	1,4	2,4	2,3	2,3
PMPP									
$b_1$	5,1**	5,5**	5,3**	1,3**	1,1**	1,2**	2,9**	2,6**	2,7**
$\Delta_G$	10,5	12,3	11,4	7,2	4,9	5,9	29,7	31,4	56,7
AP									
$b_1$	5,0**	6,5**	5,8**	3,8**	4,4**	4,1**	3,1**	6,3**	4,7**
$\Delta_G$	3,1	4,9	3,9	3,3	3,1	3,2	2,7	22,2	6,6
NHPM									
$b_1$	0,1**	0,1**	0,1**	0,10**	0,1**	0,1**	0,1**	0,8**	0,4**
$\Delta_G$	1,0	1,3	1,1	0,8	1,0	0,9	0,6	8,3	7,3
NGPH									
$b_1$	0,3**	0,5**	0,4**	0,4**	0,3**	0,3**	0,4**	1,4**	0,9**
$\Delta_G$	1,6	2,4	2,0	2,5	1,6	2,0	2,2	11,2	9,6
LM									
$b_1$	0,2**	0,1**	0,1**	0,2**	0,1**	0,2**	0,1**	0,7**	0,4**
$\Delta_G$	1,7	1,5	1,5	2,5	1,9	2,2	1,4	8,8	8,1
DM									
$b_1$	0,03**	0,04**	0,03**	0,02ns	0,02**	0,02**	0,02**	0,2**	0,1**
$\Delta_G$	0,7	1,03	0,7	0,5	0,4	0,5	0,5	7,5	6,7

\* \*\* Significación estadística con  $\alpha=0,05$  y  $0,01$ ;  $b_1$ : coeficiente de regresión,  $\Delta_G(\%)$ : ganancia promedio por ciclo de selección. DFM: días a floración masculina, PMPP: peso de mazorca por planta (g). AP: altura de planta (cm), NHPM: número de hileras por mazorca, NGPH: número de granos por hilera, LM: longitud de mazorca (cm), y DM: diámetro de mazorca (cm).

TABLA II  
 AVANCE GENÉTICO PROMEDIO POR CICLO Y ACUMULADO EN 16 CICLOS  
 DE SELECCIÓN MASAL EN LA VARIEDAD DE MAÍZ CAFIME, RESPECTO A  
 LA VARIEDAD ORIGINAL EN LOS ANÁLISIS POR LOCALIDAD Y COMBINANDO

	Riego			Temporal			Sequía		
	Montecillo	Tecámac	Combinado	Montecillo	Tecámac	Combinado	Montecillo	Tecámac	Combinado
DFM									
b <sub>1</sub>	0,8**	0,9**	0,9**	0,5**	0,6**	0,5**	0,6**	0,8**	0,9*
Δ <sub>G</sub>	1,1	1,2	1,2	0,7	0,8	0,7	0,7	0,6	0,8
PMPP									
b <sub>1</sub>	3,2**	3,6**	3,4**	1,6**	1,5**	1,5**	2,5**	0,3**	1,4*
Δ <sub>G</sub>	3,2	3,5	3,4	6,0	3,8	4,7	5,7	14,4	6,5
AP									
b <sub>1</sub>	4,3**	4,1**	4,2**	3,4**	4,1**	3,8**	2,1**	3,9**	3,5**
Δ <sub>G</sub>	2,4	2,5	2,4	2,8	2,7	2,8	1,8	7,6	4,2
NHPM									
b <sub>1</sub>	0,1**	0,2**	0,1**	0,1**	0,2**	0,1**	0,03ns	0,8**	0,5**
Δ <sub>G</sub>	1,0	1,6	1,3	1,0	1,6	1,2	0,2	9,6	8,9
NGPH									
b <sub>1</sub>	0,1**	0,3**	0,2**	0,4**	0,2**	0,3**	0,2**	1,1**	0,6**
Δ <sub>G</sub>	0,6	1,2	0,9	2,5	1,4	1,9	0,9	12,1	6,7
LM									
b <sub>1</sub>	0,1**	0,1**	0,1**	0,2**	0,1**	0,1**	0,1**	0,6**	0,3**
Δ <sub>G</sub>	0,7	1,2	1,0	2,1	1,1	1,5	0,9	14,8	6,6
DM									
b <sub>1</sub>	0,01ns	0,01ns	0,01ns	0,03**	0,01*	0,02**	0,01*	0,2**	0,1**
Δ <sub>G</sub>	0,1	0,1	0,1	0,7	0,2	0,4	0,2	10,9	5,4

\*, \*\* Significación estadística con α=0,05 y 0,01; ns: no significativo, b<sub>1</sub>: coeficiente de regresión, Δ<sub>G</sub>(%): ganancia promedio por ciclo de selección, Δ<sub>G</sub>A(%): ganancia acumulada en 16 ciclos de selección; Δ<sub>G</sub>AU: ganancia acumulada en las unidades del carácter respectivo, DFM: días a floración masculina, PMPP: peso de mazorca por planta (g), AP: altura de planta (cm), NHPM: número de hileras por mazorca, NGPH: número de granos por hilera, LM: longitud de mazorca (cm), y DM: diámetro de mazorca (cm).

evaluación de sequía (2,4%) y la menor en Tecámac para el ambiente de temporal (1,3%). En el análisis combinado en el ambiente de sequía, los DFM se incrementaron en 34,2 y en el de temporal 18,6 días. El peso de mazorca por planta (PMPP) en el ambiente de sequía presentó los mayores incrementos en Montecillo donde la ganancia fue 29,7%; en Tecámac 31,4% y en el combinado 56,7%. En riego, el incremento por ciclo en Montecillo fue 10,5%; en Tecámac 12,3% y en el análisis combinado 11,4%. En el ambiente de temporal, la ganancia por ciclo en Montecillo fue 7,2%; en Tecámac 4,9% y en el combinado 5,9%. Estos resultados son diferentes a los encontrados por Johnson y Geadelmann (1989), quienes observaron mayor ganancia genética en

maíz en condiciones de riego (10,2%) en comparación con el de sequía (7,1%). Así mismo, Arboleda-Rivera y Compton (1974) observaron ganancias por ciclo del 10,5 y 0,8% cuando la selección se hizo en estaciones lluviosas y de sequía, respectivamente.

El mayor incremento en altura de planta fue en el ambiente de sequía en la localidad de Tecámac. Los ca-

racteres de mazorca, como el número de hileras por mazorca (NHPM), número de granos por hilera (NGPH), longitud de mazorca (LM) y diámetro de mazorca (DM) se incrementaron 7,3; 9,6; 8,1 y 6,7, respectivamente (Tabla I). El avance genético de los componentes del rendimiento de la población Cafime fue similar a lo observado en la población Zacatecas 58,

TABLA III  
 COMPORTAMIENTO PROMEDIO DE LOS COMPUESTOS DE SELECCIÓN  
 DE LA VARIEDAD DE MAÍZ ZACATECAS 58 Y (CAFIME), EVALUADOS  
 EN SEIS AMBIENTES PARA LAS VARIABLES QUE SE INDICAN

Ciclo	DFM	PMPP	AP	NHPM	NGPH	LM	DM
0	69,5(85,4)	24,1(52,0)	115,3(130,4)	10,6(9,9)	16,8(18,1)	8,5(9,5)	3,3(3,7)
2	68,6(83,7)	31,3(59,3)	111,7(128,1)	10,9(9,8)	17,7(18,9)	8,4(10,0)	3,4(3,7)
4	67,5(85,1)	30,2(60,3)	119,9(142,6)	11,3(10,2)	17,6(19,3)	8,6(9,7)	3,4(3,8)
6	76,0(85,8)	42,0(60,9)	129,4(139,2)	11,1(11,8)	19,0(19,3)	9,5(10,3)	3,4(4,1)
.	.	.	.	.	.	.	.
14	81,9(94,1)	51,3(83,1)	154,1(181,5)	11,7(12,8)	22,5(22,2)	11,2(11,3)	3,7(4,0)
15	89,7(94,8)	74,4(84,1)	195,1(180,7)	14,5(12,9)	25,9(22,9)	12,4(11,8)	4,4(4,4)
16	89,3(95,5)	66,1(89,6)	178,4(158,7)	14,7(13,0)	25,5(23,6)	12,1(12,4)	4,2(4,4)
17	89,7	73,5	190,8	14,3	25,5	12,8	4,5
18	90,9	73,8	196,8	14,6	26,0	12,5	4,3
19	90,8	82,9	187,9	15,2	26,6	12,6	4,2

DFM: días a floración masculina, PMPP: peso de mazorca por planta (g), AP: altura de planta (cm), NHPM: número de hileras por mazorca, NGPH: número de granos por hilera, LM: longitud de mazorca (cm), y DM: diámetro de mazorca (cm).

es decir, en condiciones de sequía se lograron mayores ganancias.

Los coeficientes de regresión indican que los cambios fueron estadísticamente significativos, excepto en la variable diámetro de mazorca en el ambiente de riego para la población Cafime, en la cual las ganancias genéticas entre localidades y ambientes para DFM fue 1,2% en el ambiente de riego, equivalente a un incremento de 14,8 días respecto a la variedad original; y en temporal y sequía 0,7 y 0,8 (incremento de 9,2 y 14,2 días, respectivamente). En altura de planta (AP), la mayor ganancia también se tuvo en condiciones de sequía en Tecámac.

Para PMPP, el avance genético en el ambiente de riego fue 3,2% en Montecillo, en Tecámac 3,5% y el combinado 3,4%, lo cual representa un incremento acumulado de 55,3g/planta. En el ambiente de temporal en Montecillo el avance genético fue 6,0%, en Tecámac 3,8% y en el combinado 4,7%, y representa un incremento acumulado de 24,9g/planta. En sequía en Montecillo se tuvo un incremento de 5,7%, en Tecámac 14,4% y en el combinado 6,5%, que corresponde a un incremento acumulado de 23,2g/planta. Con estos resultados se establece mayor avance genético en el ambiente de sequía en

comparación con el de riego; sin embargo, al analizar la ganancia acumulada en gramos, el ambiente de riego registró mayor acumulación.

En las variables de la mazorca, la mayor acumulación en ganancia genética ocurrió en el ambiente de sequía. El NHPM tuvo un incremento acumulado de ocho hileras en sequía, 2,7 en riego y

TABLA IV  
COEFICIENTE DE REGRESIÓN  $b_i$ , DE LOS COMPUESTOS DE SELECCIÓN DE LA VARIEDAD DE MAÍZ ZACATECAS 58 Y (CAFIME) EN SEIS AMBIENTES PARA LAS VARIABLES QUE SE INDICAN

Ciclo	DFM	PMPP	AP	NHPM	NGPH	LM	DM
0	0,72**(1,07)	0,52**(0,81**)	0,98 (0,86*)	1,41**(1,39**)	1,18*(1,21**)	1,29**(1,25**)	1,37**(1,36**)
2	0,82*(0,94)	0,70**(0,89)	0,93 (1,03)	1,45**(1,38**)	1,20 (1,24*)	1,24*(1,30**)	1,41**(1,35**)
4	0,40**(0,97)	0,63**(0,94)	0,97 (0,97)	1,50**(1,43**)	1,19 (1,28*)	1,29*(1,29**)	1,42**(1,38**)
6	1,18**(0,96*)	0,85 (0,87*)	1,08 (0,99)	1,47**(0,42**)	1,33**(0,70**)	1,43**(0,77**)	1,44**(0,72**)
14	1,15*(0,97)	1,24*(1,17)	1,06*(1,16**)	1,57**(1,82*)	1,74*(1,38*)	1,69**(1,43*)	1,58**(1,44**)
15	1,09 (1,05)	1,13 (1,13*)	0,92 (0,97)	0,26**(0,88*)	0,41**(0,77*)	0,29**(0,64**)	0,24**(0,64**)
16	1,19 (1,00)	1,35*(1,29**)	0,91 (1,06)	0,23**(0,45**)	0,60*(0,71**)	0,51**(0,62**)	0,40**(0,62**)
17	1,09	1,14	0,87	0,29**	0,28**	0,21**	0,24**
18	1,25*	1,39*	0,90	0,23**	0,43**	0,44**	0,38**
19	1,17*	1,51	0,93	0,23**	0,49*	0,44**	0,26**

\*, \*\* Estadísticamente diferente de 1 para  $b_i$  al 0,05 y 0,01 respectivamente. DFM: días a floración masculina, PMPP: peso de mazorca por planta (g), AP: altura de planta (cm), NHPM: número de hileras por mazorca, NGPH: número de granos por hilera, LM: longitud de mazorca (cm), y DM: diámetro de mazorca (cm).

2,4 en temporal; la ganancia acumulada para el ambiente de sequía en el NGHM fue 11,0; en temporal 5,7 y en riego 3,8; en este último ambiente, el NGHM estuvo asociado con la LM, para la cual se tuvo una ganancia acumulada en el ambiente de sequía de 6,2cm, en el de temporal 2,5cm y en el de riego 2,1cm. El DM también se incrementó con la selección, en el ambiente de sequía 1,9cm; en el de temporal 0,3cm y en el de riego 0,1cm. Los resultados anteriores confirman la respuesta diferencial de la variedades al ambiente; respuesta que también ha sido consignada por Gargi y Saikia (2000) y Rao y Rao (2004).

#### Análisis de parámetros de estabilidad

El análisis de varianza para los parámetros de estabilidad de Zacatecas 58 y Cafime mostró diferencias significativas entre ciclos de selección para todas las variables, excepto para P100S en Zacatecas 58 (datos no presentados); esto indica que al menos uno de los compuestos de selección fue diferente al resto en su comportamiento. La interacción ciclos  $\times$  ambientes (lineal), mostró diferencias en todas las variables con excepción de AP para ambas poblaciones, y de NHPM para Zacatecas 58, lo cual indica que las poblaciones difieren en sus respuestas a las condi-

ciones ambientales diferentes. Este mismo comportamiento ha sido observado en maíz (Gargi y Saikia, 2000) y garbanzo (Rao y Rao, 2004), donde las diferencias entre genotipos y la interacción genotipos  $\times$  ambientes en las variables que estos autores evaluaron mostraron diferencias significativas.

Los coeficientes de regresión obtenidos indican que los cambios en las ganancias genéticas fueron estadísticamente significativos, excepto en la variable DM en condiciones de riego para la variedad Cafime.

En las Tablas III, IV y V se muestran la media, el coeficiente de regresión y las desviaciones de regresión para

cada uno de los ciclos evaluados. En general, los valores de  $b_i$  aumentaron conforme avanzó el ciclo de selección (Tabla IV). Este comportamiento fue más claro en las variables PMPP y DFM. Lo contrario se observó en NHM, NGHM, LM y DM, donde los valores de  $b_i$  disminuyeron conforme se avanzó en la selección. También se observa que en la mayor parte de las variables los valores de  $b_i$  resultaron estadísticamente diferentes a la unidad y las desviaciones de regresión iguales a cero.

Para el caso del PMPP el coeficiente de regresión de los ciclos C0, C2, C4, C7, C8, C9, C14, C16 y C18 de la población Zacatecas 58 fue estadísticamente diferente a la unidad y las desviaciones de regresión de los ciclos C17, C18 y C19 fueron diferentes de cero. De acuerdo con Eberhart y Russell (1966) estos resultados indican inestabilidad de dichos ciclos de selección y, de acuerdo con Carballo (1970), los únicos ciclos estables fueron C6, C10, C11, C12, C13 y C15, mientras que los ciclos C0, C2, C4, C7, C8 y C9 presentaron mejor respuesta en ambientes desfavorables e inconsistentes, al tener un coeficiente de regresión  $b_i < 1$  y desviaciones de regresión  $S^2d_i > 0$ . Los ciclos C14, C16 y C18 de la población Zacatecas 58 presentaron mejor respuesta en los ambientes más favorables, pero inconsistentes por presentar  $b_i > 1$  y  $S^2d_i > 0$ ; mientras que los ciclos C17 y C19 presentaron buena respuesta en todos los ambientes, pero inconsistentes al tener  $b_i = 1$  y  $S^2d_i > 0$ .

En la misma población Zacatecas 58, en riego se obtuvieron los rendimientos promedio más altos, seguidos por el de temporal, y el menor en sequía; los rendimientos disminuyeron conforme disminuyó la disponibilidad de

TABLA V  
VARIANZA DE LA DESVIACIÓN DE REGRESIÓN  $S^2d_i$  DE LOS COMPUESTOS DE SELECCIÓN DE LA VARIEDAD DE MAÍZ ZACATECAS 58 Y (CAFIME), EVALUADOS EN SEIS AMBIENTES PARA LAS VARIABLES QUE SE INDICAN

Ciclo	DFM	PMPP	AP	NHPM	NGPH	LM	DM
0	0,14 (0,24)	-28,93 (-45,05)	55,42 (-46,75)	0,18 (-0,15)	-0,88 (-0,80)	0,07 (-0,09)	0,03 (-0,01)
2	1,41 (-0,76)	-43,20 (74,91)	47,62 (-59,05)	0,41*(-0,25)	1,22 (0,67)	0,35*(0,05)	0,03 (0,00)
4	6,49 (-1,19)	-37,37 (-46,52)	-19,47 (-56,01)	-0,12 (-0,20)	3,51*(0,70)	0,11 (0,02)	-0,01 (0,00)
6	-1,94 (-2,02)	-10,83 (-35,95)	99,74*(-0,03)	0,27*(-0,03)	-0,87 (0,36)	0,13*(-0,08)	-0,01 (0,03**)
14	-0,59 (0,07)	-1,60 (77,15)	-57,16 (-68,25)	-0,10 (3,30**)	16,10 (5,57**)	0,19 (1,16**)	-0,02 (0,03*)
15	5,81*(-1,13)	35,81 (-32,84)	250,53*(-14,76)	-0,06 (-0,26)	2,63 (1,39)	0,42**(0,11)	0,02 (-0,001)
16	4,20*(1,96)	23,80 (-46,78)	125,17*(-44,67)	0,39**(-0,26)	3,68*(0,45)	0,41**(-0,20)	0,00 (0,00)
17	1,43	111,88*	130,78*	0,04	1,29	0,66**	-0,01
18	3,23	82,91*	140,60*	0,08	2,68	0,74**	-0,01
19	0,41	646,66**	74,09	0,67**	2,43	0,81**	0,26**

\*, \*\* Estadísticamente diferente de cero para  $S^2d_i$  al 0,05 y 0,01 respectivamente. DFM=Días a floración masculina, PMPP=Peso de mazorca por planta (g), AP=Altura de planta (cm), NHPM=Número de hileras por mazorca, NGPH=Número de granos por hilera, LM=Longitud de mazorca (cm) y DM=Diámetro de mazorca (cm).

agua. Los compuestos de selección con mayor tolerancia al estrés hídrico fueron los de los ciclos C15 al C19, que exhibieron mayor capacidad de buen rendimiento en ambientes severos (sequía-Tecámac), pero con altos coeficientes de regresión (Tabla IV). Hohls (2001) encontró que los genotipos de maíz con alta tolerancia al estrés hídrico presentan coeficiente de regresión bajo.

En la población Cafime también se encontró que los valores de  $b_i$  aumentaron conforme avanzaron los ciclos de selección, particularmente en el PMPP; pero el comportamiento se invirtió para NHM, NGHM, LM y DM, donde los valores de  $b_i$  tendieron a disminuir conforme se avanzó en los ciclos de selección, tal como ocurrió en la población Zacatecas 58. En estas variables durante todos los ciclos, el valor de  $b_i$  fue estadísticamente diferente a la unidad y las desviaciones de regresión iguales a cero, con excepción de NHM; NGHM de los ciclos C1, C0, C12 y C14; de LM en los ciclos C7, C12 y C14; y DM en los ciclos C5, C6, C8, C9 y C14. En el caso del PMPP los coeficientes de regresión para C0, C3, C6, C11, C15 y C16 fueron estadísticamente diferentes de la unidad y las desviaciones de regresión fueron iguales a cero (Tabla V).

Aunque todos los ciclos presentaron  $S^2d_i=0$ , hubo compuestos que presentaron  $b_i \neq 1$ , que indica inestabilidad según Eberhart y Russell (1966), ya que una variedad es estable cuando  $b_i=1$  y  $S^2d_i=0$ . Al considerar la descripción de variedades hecha por Carballo (1970) en el caso del rendimiento de mazorca por planta en esta población, resultaron estables los ciclos C1, C2, C4, C5,

TABLA VI  
RENDIMIENTO PROMEDIO DE MAZORCA POR PLANTA (g)  
POR CICLO DE SELECCIÓN EN CADA UNO DE LOS SEIS AMBIENTES  
DE EVALUACIÓN, EN LA VARIEDAD DE MAÍZ ZACATECAS 58  
Y (CAFIME) E ÍNDICES AMBIENTALES

Ciclo	RM	TM	SM	RT	TT	ST
0	48,1 (100,8)	18,3 (26,6)	9,9 (44,0)	45,2 (101,1)	23,1 (39,4)	0,0 (0,0)
2	62,2 (116,5)	21,6 (27,3)	19,7 (43,4)	61,7 (107,5)	22,5 (61,3)	0,0 (0,0)
4	60,1 (123,6)	23,9 (39,9)	18,9 (48,6)	53,8 (110,0)	24,7 (39,8)	0,0 (0,0)
6	83,9 (110,0)	36,1 (34,6)	26,7 (61,6)	71,5 (113,2)	34,0 (43,4)	0,0 (2,7)
14	115,5 (141,7)	37,3 (59,9)	20,6 (85,7)	95,0 (158,1)	39,1 (53,2)	0,0 (0,0)
15	134,0 (154,0)	59,7 (50,8)	51,8 (86,2)	117,8 (143,3)	43,2 (65,6)	39,7 (4,9)
16	131,4 (173,2)	33,1 (53,4)	42,2 (84,8)	125 (159,1)	41,6 (60,2)	23,3 (7,0)
17	126,8	39,7	59,5	127,4	46,0	41,6
18	138,9	43,8	56,6	136,7	37,4	29,1
19	134,5	37,4	68,7	175,7	41,8	39,0
IA	48,5 (62,7)	-15,8 (-24,6)	-17,4 (-6,1)	39,4 (53,9)	-14,9 (-18,8)	-39,7 (-67,1)

RM: Riego-Mont., TM: Temporal-Mont., SM: Sequía-Montecillo, RT: Riego-Tecámac, TT: Temporal-Tecámac, ST: Sequía-Tecámac, IA: índice ambiental.

C7, C8, C9, C10, C12, C13 y C14, mientras que C0, C3 y C6 presentaron mejor respuesta en ambientes desfavorables, pero inconsistentes por presentar un coeficiente de regresión  $b_i < 1$  y desviaciones de regresión  $S^2d_i > 0$ . Por otra parte, los ciclos C11, C15 y C16 presentaron una mejor respuesta en buenos ambientes y consistentes por presentar  $b_i > 1$  y  $S^2d_i = 0$  (Tablas IV y V).

Los compuestos de selección con mayor tolerancia al estrés hídrico fueron los ciclos C11 a C16, con rendimientos aceptables en ambientes tan severos como el de sequía en Tecámac, aunque los valores de  $b_i$  fueron altos, con excepción de C14 (Tabla VI) que no produjo grano, debido posiblemente a un desfaseamiento entre el desarrollo floral y la polinización por efecto de la sequía (Herrero y Johnson, 1981).

El aumento en los valores de  $b_i$

conforme avanzan los ciclos de selección en ambas variedades (Figura 2a, b) sugieren la posibilidad de cambiar su adaptación específica de ambientes desfavorables ( $b_i < 1$ ) a una adaptación más amplia ( $b_i = 1$ ).

En las desviaciones de regresión, el parámetro que mide la consistencia ante el cambio ambiental se in-

crementó conforme avanzó la selección en Zacatecas 58 (Figura 3a), pero no se observó tendencia clara en Cafime (Figura 3b). Este comportamiento se atribuye a los cambios en los valores de dicho parámetro en diferentes ciclos de selección, que no permitió observar una tendencia clara en los cambios de la sensibilidad ambiental no lineal.

#### Asociación entre parámetros de estabilidad

El análisis de correlación entre los parámetros de estabilidad de la variable PMPP, mostró asociación directa entre la media y la sensibilidad ambiental medida por el coeficiente de regresión. Es decir, al seleccionar para alto rendimiento, se incrementa la sensibilidad de los compuestos al tener un ambiente más favorable.

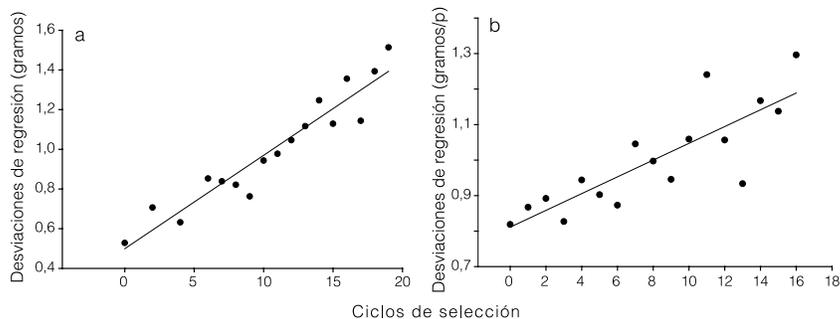


Figura 2. Cambios en la sensibilidad ambiental lineal del rendimiento de mazorca por planta de los compuestos de selección de Zacatecas 58 (a) y Cafime (b), seleccionados en sequía y evaluados en seis ambientes, CP-2002.

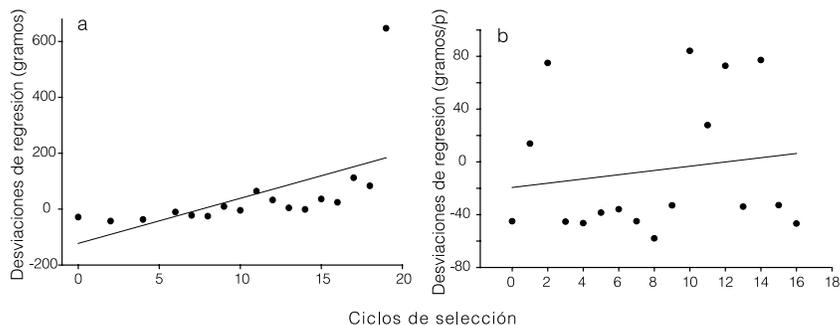


Figura 3. Tendencia de los cambios en la sensibilidad ambiental no lineal del rendimiento de mazorca por planta de los compuestos de selección de Zacatecas 58 (a) y Cafime (b), seleccionados en sequía y evaluados en seis ambientes, CP-2002.

Los valores de la correlación entre  $b_i$  y  $S^2d_i$ , no fueron significativos; al igual que la sensibilidad ambiental no lineal y la media (Tabla VII). La falta de asociación entre  $b_i$  y  $S^2d_i$  sugiere la necesidad de hacer mejoramiento para adaptación específica ( $b_i < 1$  o  $b_i > 1$ )

o amplia ( $b_i = 1$ ), y mayor consistencia ( $S^2d_i = 0$ ); en tanto, la ausencia de asociación entre la media y  $S^2d_i$  establece que la selección para mayor rendimiento puede hacerse simultáneamente con la obtención de compuestos de selección más consistentes.

De acuerdo con el comportamiento promedio de los DFM y PMPP, los compuestos de selección de Zacatecas 58 y Cafime, hasta el décimo ciclo de selección masal visual estratificada (SMVE), tuvieron respuesta lineal moderada, con un aumento de 2-5 días en la floración con respecto a la variedad original y de 10-20g en el rendimiento de mazorca por planta; mientras que, después del décimo ciclo, la respuesta lineal fue más pronunciada, haciendo que los compuestos de selección fueran más tardíos. Molina (1980), menciona que hay un aumento paralelo del rendimiento y el ciclo vegetativo de los compuestos conforme avanza el proceso de selección y se considera un efecto indirecto de la selección, cuando el rendimiento es el único criterio de selección, como sucedió en este estudio.

Los avances genéticos más altos por ciclo se encontraron en el ambiente de sequía para las dos poblaciones, pero la ganancia genética acumulada en unidades del carácter respectivo se presentó en el ambiente de riego, debido a que los compuestos en esta condición expresan su potencial genético. Estos resultados difieren de lo encontrado por Johnson

TABLA VII  
COEFICIENTES DE CORRELACIÓN ENTRE PARÁMETROS DE ESTABILIDAD DEL PESO DE MAZORCA POR PLANTA, EVALUADO EN SEIS AMBIENTES, EN LAS VARIEDADES DE MAÍZ ZACATECAS 58 Y (CAFIME)

Parámetro	Parámetro		
	Media	$b_i$	$S^2d_i$
Media	1,0 (1,0)	0,92**(0,91**)	0,64**(0,19)
$b_i$		1,0 (1,0)	0,61**(0,25)
$S^2d_i$			1,0 (1,0)

y Geadelmann (1989). Por su parte, Arboleda-Rivera y Compton (1974), quienes realizaron selección masal en maíz, encontraron mayor ganancia genética por ciclo en riego en comparación con sequía; la respuesta la atribuyen a que los compuestos de selección de las dos poblaciones en estudio se realizaron en condiciones de sequía, de ahí que al ser evaluadas en ambientes desfavorables, siguieron expresando su potencial genético. De acuerdo con Martínez (1994), el mejor ambiente de selección para la variedad Zacatecas 58 sería el de sequía, ya que produce compuestos más adaptables ( $b_i = 1$ ) y más estables ( $S^2d_i = 0$ ), y exhibe una alta correlación positiva entre la media,  $b_i$ , y  $S^2d_i$  de las evaluaciones de riego y los de las evaluaciones de sequía.

Los compuestos de Cafime fueron más consistentes que los de Zacatecas 58, al presentar desviaciones de regresión iguales a cero en la mayoría de los compuestos.

Finalmente, el modelo de Eberhart y Russell (1966), aplicado al análisis de estabilidad de los ciclos de selección de Zacatecas 58 y Cafime, permitió observar el comportamiento y la consistencia de éstos en los diferentes ambientes donde fueron evaluados. Otros autores (Gutiérrez y Fraga, 1999; Gargi y Saikia, 2000; Bose *et al.*, 2004; Rao y Rao, 2004) han reportado que el modelo de Eberhart y Russell (1966) ha sido apropiado para analizar los parámetros de estabilidad en genotipos

de maíz, trigo, arroz y garbanzo y para la selección de variedades superiores en avena (Eagles *et al.*, 1977).

## Conclusiones

El ambiente de evaluación de sequía fue donde se identificó el avance genético más alto por ciclo; mientras que, en el ambiente de riego se obtuvo la mayor ganancia genética acumulada en unidades del carácter bajo selección. La media del peso de mazorca por planta se incrementó conforme aumentó el número de ciclos de selección en las dos poblaciones y de manera concomitante también se incrementó el coeficiente de regresión. Los parámetros de estabilidad  $b_i$  y  $S^2d_i$ , cambian durante el proceso de la selección. El aumento del rendimiento obtenido por selección masal resulta positivamente correlacionado con un aumento del coeficiente de regresión lineal y no hubo correlación entre rendimiento y las desviaciones de regresión lineal.

## REFERENCIAS

Arboleda-Rivera F, Compton WA (1974) Differential response of maize (*Zea mays* L.) to mass selection in diverse selection environments. *Theor. Appl. Genet.* 44: 77-81.

Bose LK, Mohanty A, Kar MK, Nagaraju M (2004) Stability analysis for grain yield of lowland rice for the largest rice-growing region of eastern India. *Kor. J. Crop Sci.* 49: 136-140.

Carballo CA (1970) *Comparación de Variedades de Maíz de El Bajío y de la Mesa Central por su Rendimiento y Estabilidad*. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 88 pp.

Eagles HA, Hinz PN, Frey KJ (1977) Selection of superior cultivars of oats by using regression coefficients. *Crop Sci.* 17: 101-105.

Eberhart SA, Russell WA (1966) Stability parameters for comparing varieties. *Crop Sci.* 6: 36-40.

Finlay KW, Wilkinson GN (1963) The analysis of adaptation in a plant-breeding programme. *Aust. J. Agric. Res.* 14: 742-754.

Fischer KS, Edmeades GO, Johnson EC (1989) Selection for the improvement of maize yield under moisture-deficits. *Field Crops Res.* 22: 227-243.

García E (1988) *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Koppen para Adaptarlo a las Condiciones de la República Mexicana*. UNAM. México. 217 pp.

Gargi S, Saikia RB (2000) Stability analysis for yield and yield attributing characters in baby corn (*Zea mays* L.). *Ind. J. Hill Farm.* 13: 30-34.

Gutiérrez EDR, Fraga HP (1999) Comparación de respuestas de tres modelos de estabilidad aplicados a nueve genotipos de trigo (*Triticum aestivum* L.) en cuatro ambientes de México. *ITEA Prod. Veg.* 95: 31-40.

Herrero MP, Johnson RR (1981) Drought stress and its effects on maize reproductive systems. *Crop Sci.* 21: 105-110.

Hohls T (2001) Conditions under which selection for mean productivity, tolerance to environmental stress, or stability should be used to improve yield across a range of contrasting environments. *Euphytica* 120: 235-245.

Johnson SS, Geadelmann JL (1989). Influence of water stress on grain yield response to recurrent selection in maize. *Crop Science* 29:558-564.

Márquez SF (1974) *El Problema de la Interacción Genético-Ambiental en Genotecnia Vegetal*. PATENA. Chapingo, México. 113 pp.

Martínez ZG (1994) *Ambientes Óptimos de Selección y Evaluación de una Población de Maíz Sometida a Selección Masal Visual Estratificada*. Colegio de Postgraduados, México. 170 pp.

Molina GJD (1980) Selección masal para resistencia a sequía en maíz. *Agrociencia* 42: 69-77.

Rao CM, Rao YK (2004) Stability analysis in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Leg. Res.* 27: 235-242.

Rodríguez PJE, Sahagún JC, Mora RA, Peña AL (2005) Algoritmos de cómputo para el análisis de la estabilidad fenotípica. *Mem. la LI Reunión Anual de la PCCMCA*. Panamá. 35 pp.