

RESPUESTA A LA SELECCIÓN PARA RENDIMIENTO DE GRANO Y SUS COMPONENTES NÚMERO Y TAMAÑO DE GRANO EN SORGO

SELECTION RESPONSE FOR GRAIN YIELD AND ITS COMPONENTS SEED NUMBER AND SEED SIZE IN SORGHUM

Alfonso Peña Ramos^{1*}, Jerry D. Eastin², Stephen D. Kachman³ y David J. Andrews²

¹ Campo Experimental Pabellón, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. Apdo. Postal No. 10. C.P. 20000, Pabellón de Arteaga, Ags. México. Tel. 01(495) 8-0167. E-mail: penaalfonso@hotmail.com ²University of Nebraska, 205 KCR Dep. of Agronomy, Lincoln, NE., 68583-0817, USA. Correo electrónico: jeastin@unlnotes.edu, ³ Dep. of Biometry. Correo electrónico: skachman@unl.edu.

* Autor responsable

RESUMEN

El objetivo del estudio fue comparar la selección directa, indirecta e índices combinados de selección, en el mejoramiento del rendimiento de grano y los componentes número y peso de grano en sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). Se usaron cuatro poblaciones F₂ y una generación de progenies F₃, diferentes en tamaño y número de granos. El trabajo se realizó en la Universidad de Nebraska, EEUU. La evaluación de las poblaciones F₂ se hizo en 1997 en una localidad, y de la progenie F₃ (99 familias S_i) en 1998 en dos localidades. Se midió el rendimiento de grano (RGP), peso de 100 granos (PGP) y número de granos (NGP) en la panícula principal de plantas individuales. La ganancia esperada por ciclo de selección individual para RGP en las cuatro poblaciones F₂ varió de 9.5 a 13.6 %, mientras que con la selección de familias S_i en la generación F₃ fue de 13.5 %. La selección directa para rendimiento resultó más ventajosa para mejorar tanto el RGP como PGP y NGP, que la selección indirecta con base en PGP o NGP. Los tres índices de selección combinados que incluyeron el rendimiento y uno o ambos de sus componentes tuvieron una eficiencia de 0.16 a 7.21 %, con respecto de la selección directa para RGP. Los contrastes en el tamaño y número de granos en los progenitores que formaron las poblaciones, no fueron un factor determinante para favorecer mayor avance genético del RGP y sus componentes.

Palabras clave: *Sorghum bicolor* L. Moench, índices de selección, respuestas correlacionadas, selección indirecta, selección individual, familias S_i.

SUMMARY

The objective of the present work was to compare direct, indirect and combined selection indexes in the improvement of grain yield and its grain number and grain weight components in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). Four F₂ populations and one F₃ progeny involving parents differing in seed size and seed number, were used. The study was carried out at the University of Nebraska, USA. The F₂ populations were evaluated in 1997 at one location, while the F₃ progeny (99 S_i families) in 1998 at two locations. Traits measured were grain yield (GYP), 100-grain weight (GW), and grain number (GNP) recorded in the main panicle of individual plants. Expected gain per cycle from single plant selection for GYP in the four F₂ populations varied from 9.5 to 13.6 %, and was of 13.5 % from S_i family selection in the F₃ progeny. Direct selection for GYP was more advantageous to improve GYP, GW, and GNP than indirect selection for highest GW or GNP. The efficiency of three selection indexes involv-

ing grain yield and one or both yield components, ranged from 0.16 to 7.21 % in relation to direct selection for GYP. The contrasts between seed number and seed size of parents involved in the populations were not an important factor in increasing genetic gains of GYP and its components.

Index words: *Sorghum bicolor* L. Moench, indirect selection, correlated responses, individual plant selection, selection index, S_i families.

INTRODUCCIÓN

La selección de plantas basada en métodos convencionales de mejoramiento genético ha sido efectiva para mejorar el rendimiento de grano en sorgo (Andrews and Bramel-Cox, 1993), maíz (*Zea mays* L.), trigo (*Triticum aestivum* L.) (Duvick, 1996), y otros cultivos. Ello se ha logrado usando como criterio de la selección a características morfológicas y al rendimiento de grano, y raramente con base en la selección de componentes del rendimiento o características fisiológicas.

Un alto número de granos en sorgo está estrechamente asociado con altos rendimientos de grano (Saeed *et al.*, 1986), y es particularmente importante para reducir pérdidas de rendimiento en ambientes donde ocurren temperaturas bajas que reducen el peso del grano individual (Lothrop *et al.*, 1985), y en ambientes pobres (Youngquist *et al.*, 1993). El peso de cada grano se asocia también con el rendimiento de grano, aunque en menor medida que el número de granos; por ello los genotipos de sorgo con mayor peso de grano contribuyen también a una mayor estabilidad del rendimiento a través de diferentes ambientes (Heinrich *et al.*, 1985), compensan pérdidas por bajas densidades de población (Castleberry, 1973) y por reducciones en el número de granos ocasionadas por algún tipo de estrés (Manjarrez-Sandoval *et al.*, 1989; Blum *et al.*, 1990). En adición, un tamaño de grano grande podría incrementar el valor económico del grano.

La correlación positiva entre el número de granos y el rendimiento, y algunas veces entre el peso de grano y el rendimiento, sugiere que la selección simultánea por peso de grano y número de granos mejoraría el rendimiento de grano. Sin embargo, la selección indirecta para rendimiento a través de esos componentes, podría no ser tan efectiva debido a la correlación negativa comúnmente encontrada entre el número y el peso de grano. Singh y Baghel (1977) compararon en sorgo varios índices de selección, como el peso y el número de granos, número de espigas y ramificaciones por espiga; concluyeron que ninguno de los índices fue significativamente más ventajoso que la selección directa por rendimiento de grano. Lothrop *et al.* (1985) también encontraron que la selección directa fue la mejor opción para incrementar favorablemente el rendimiento del sorgo de grano, así como ambos componentes. Entre varios caracteres evaluados, Wenzel (1990) concluyó que prácticamente no hubo restricciones que limitaran el progreso de selección simultánea para más de un carácter en sorgo, excepto para los caracteres peso y número de granos los cuales estuvieron negativamente correlacionados.

En maíz, Odhiambo y Compton (1987) señalaron que 20 ciclos de selección fueron efectivos para incrementar el peso de mil granos en 4.68 g por ciclo, pero que esta ganancia no produjo un incremento significativo en el rendimiento; en cambio, Gritti *et al.* (1994) además de lograr ganancias de 8.0 % por ciclo en el peso de 200 granos, obtuvieron ganancias de 4.6 % por ciclo en el rendimiento de grano. En soya (*Glycine max* L.), los incrementos en el peso de grano logrados mediante selección, causaron también incrementos significativos en el rendimiento de grano en dos de tres poblaciones estudiadas, pero sin diferencias significativas en el número de granos (Tinius *et al.*, 1992). Un caso ocasional de correlación positiva entre el peso y el número de granos fue presentado por Lal *et al.* (1996) en ragi (*Eleusine coracana* Gaertn.).

El uso de los componentes del rendimiento como criterio de selección para mejorar el rendimiento de grano es raramente aplicado por los mejoradores porque requiere de mayor cantidad de tiempo y esfuerzo que la selección directa para rendimiento (Gritti *et al.* 1994).

No obstante, estos autores sugieren que la selección indirecta podría ser efectiva en un programa de generación de líneas puras e híbridos, si tales líneas tuvieran mejor aptitud combinatoria general para rendimiento.

El objetivo del presente estudio fue comparar la efectividad de la selección directa para rendimiento de grano contra la selección indirecta de los componentes del rendimiento, en cuatro poblaciones de sorgo que involucran progenitores que difieren en el número y en el peso de

granos. Al respecto se postula que las poblaciones formadas con progenitores con peso o número de granos contrastante, responden mejor a la selección que las poblaciones que involucran progenitores similares en tamaño y número de granos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material genético

El germoplasma utilizado consistió de dos líneas hembra (Wheatland-A y SJ7-A), y dos líneas macho o restauradoras (17473R y 22830R). La línea hembra Wheatland-A y la línea restauradora 22830R tienen un tamaño de grano grande y bajo número de granos por planta, mientras que la línea hembra SJ7-A y la restauradora 17473R producen un peso de grano bajo e intermedio, respectivamente, y alto número de granos por planta.

Cada línea macho se cruzó con cada una de las dos líneas hembra en el invierno de 1995-1996 en el Campo Experimental Ebano, del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP), ubicado en el Estado de San Luis Potosí, México. Así se obtuvieron cuatro cruza simples F₁, las cuales fueron autofecundadas durante el verano de 1996 en Lincoln, NE, EEUU, para obtener la generación F₂.

En el mismo año y localidad de invierno en México, se formó una cruza adicional que involucró los dos progenitores más contrastantes en número y peso de grano (SJ7-B x 22830R) usando como hembra la línea mantenedora SJ7-B en lugar de la línea estéril SJ7-A. De esta cruza se obtuvo también la generación F₂ y en el verano de 1997 en Lincoln, NE, EEUU, se derivaron 99 familias F₃ de plantas individuales tomadas en forma aleatoria de la población

Diseño experimental

Los progenitores, las cuatro cruza F₁ y las cuatro poblaciones F₂ fueron evaluados en la Estación Experimental Havelock, perteneciente a la Universidad de Nebraska, Estados Unidos durante el verano de 1997. El diseño experimental fue bloques al azar con cuatro repeticiones y arreglo en parcelas divididas. Las parcelas principales fueron las generaciones y las subparcelas fueron las cruza dentro de generaciones. Las generaciones y las cruza dentro de generaciones se consideraron como factores fijos, mientras que las repeticiones y sus interacciones como aleatorios. Los progenitores y sus cruza F₁ se sembraron en dos surcos por repetición y la generación F₂ en ocho surcos. Los surcos fueron de 5.0 m de largo y 0.76 m de ancho.

La generación F₃ (99 familias S₁) de la cruz SJ7-B x 22830R fue evaluada en las Estaciones Experimentales de Mead y Havelock, NE, EEUU, dependientes de la Universidad de Nebraska, durante el verano de 1998. En cada localidad se usó un diseño de bloques completos al azar con dos repeticiones. Cada repetición fue dividida en tres bloques incompletos con 33 familias S₁ cada uno. Las parcelas fueron de un surco de 5.5 m de largo y de 0.76 m entre surcos.

La fecha de siembra del experimento de 1997 fue el 23 de mayo y los de 1998 el 27 de mayo en Havelock, NE, y el 13 de junio en Mead, NE. La siembra fue realizada con una densidad alta y en la etapa de 4-6 hojas se raleó a una planta cada 15 cm (86 842 plantas ha⁻¹). Se fertilizó con nitrógeno antes de la siembra a razón de 100 kg ha⁻¹. El cultivo previo al presente experimento fue soya. Se aplicó una mezcla de herbicida en forma postemergente con 1.12 kg i.a. ha⁻¹ de Atrazina: 6-cloro-N2-etil-N4-6 isopropil-1,3,5-triazina-2,4-diamina + 1.5 kg i.a. ha⁻¹ de S-Metolaclor: 2-cloro-N(2-etil-6metil fenil)-N-2-metoxi-1-metil etil)-(S)-acetamida, además, se cultivó y deshirió manualmente para asegurar un buen control de malezas. Con el objeto de facilitar el muestreo y de obtener una mayor expresión del número y peso de cada grano en la panícula principal, se removieron todos los tallos secundarios en todos los experimentos.

Los caracteres medidos en plantas individuales fueron: rendimiento de grano por planta (RGP), peso de 100 granos (PGP), y número de granos por planta (NGP). En el experimento de 1997 se muestrearon 25 plantas por parcela para progenitores y cruza F₁ y 60 para las generaciones F₂. En los experimentos de 1998 se muestrearon diez plantas en cada una de las familias. Después de la cosecha, las plantas fueron secadas en una estufa durante dos semanas a 35 °C, luego se desgranaron y pesaron individualmente para determinar el rendimiento de grano por planta en gramos. A partir de una muestra se obtuvo el peso de 100 granos, en miligramos. El peso de grano se ajustó a 14.5 % de humedad. El número de granos por planta se calculó dividiendo el rendimiento de grano por planta entre el peso de 100 granos y multiplicando por 100.

Análisis estadísticos

La estimación de componentes de varianza para el experimento de 1997, se realizó de acuerdo al procedimiento sugerido por Mather y Jinks (1982). La varianza ambiental (σ^2_e) se calculó usando el promedio de las varianzas de las poblaciones genéticamente homogéneas (P₁, P₂ y F₁), mientras que la varianza fenotípica (σ^2_p), se obtuvo de las poblaciones F₂.

La varianza genética (σ^2_g) se estimó para cada población F₂ como la diferencia entre la varianza fenotípica y la varianza ambiental ($\sigma^2_g = \sigma^2_p - \sigma^2_e$), mientras que la heredabilidad en sentido amplio (h^2) se calculó con la relación $h^2 = \sigma^2_g / \sigma^2_p$.

La ganancia genética esperada (ΔG) de la selección individual para cada población F₂ fue obtenida mediante la fórmula:

$$\Delta G = i \sigma_p h^2 (1/2)$$

donde: i = diferencial de selección estandarizado; σ_p = raíz cuadrada de la varianza fenotípica; h^2 = heredabilidad, y $(1/2)$ = selección por plantas hembra (macho-estériles) únicamente. En los cálculos de ΔG se usó una presión de selección de 20 % ($i = 1.40$).

La respuesta correlacionada esperada [CR $y(x)$] en el carácter y , cuando la selección es para el carácter x en cada población F₂, fue calculada usando la fórmula:

$$CR y(x) = i_x \cdot h_x \cdot r_{gx,y} \cdot \sigma_{gy} \cdot (1/2)$$

donde: i_x = diferencial de selección estandarizado para el carácter x ; h_x = raíz cuadrada de la heredabilidad del carácter x ; $r_{gx,y}$ = correlación genética entre los caracteres x y y ; σ_{gy} = raíz cuadrada de la varianza genética estimada del carácter y , y $(1/2)$ = selección de plantas hembra únicamente. Las respuestas correlacionadas fueron expresadas como porcentaje de la ganancia esperada con la selección directa en la forma [CR $y(x)/ \Delta G$]100.

Tres índices de selección fueron construidos para rendimiento de grano por planta de acuerdo con Falconer y Mackay (1996). Estos índices que involucraron uno o dos componentes del rendimiento, en adición al rendimiento de grano, fueron:

$I_1 = b_1P_1 + b_2P_2$; $I_2 = b_1P_1 + b_3P_3$, e $I_3 = b_1P_1 + b_2P_2 + b_3P_3$, P_2 y P_3 son las mediciones fenotípicas de los caracteres sobre los cuales está basada la selección; es decir, RGP, PGP y NGP respectivamente, mientras que b_1 , b_2 y b_3 son los correspondientes factores ponderados a ser determinados.

Las ecuaciones cuya solución dan los valores de las b 's en el índice (ejemplo en el cual intervienen los tres caracteres) son:

$$\begin{aligned} b_1P_{11} + b_2P_{12} + b_3P_{13} &= G_{11} \\ b_1P_{21} + b_2P_{22} + b_3P_{23} &= G_{21} \\ b_1P_{31} + b_2P_{32} + b_3P_{33} &= G_{31} \end{aligned}$$

Las P 's son las varianzas y covarianzas fenotípicas de las mediciones indicadas por los subíndices numéricos. Por ejemplo, P_{11} es la varianza fenotípica del carácter 1 o sea RGP, y P_{12} es la covarianza fenotípica de los caracteres 1 y 2 que en el presente estudio corresponde a RGP y PGP respectivamente. De manera similar, las G 's son las varianzas y covarianzas genéticas de los caracteres en estudio obtenidas de los análisis correspondientes.

La varianza de los índices ($\sigma^2 I$) usados para estimar la respuesta genética a la selección individual fue calculada como:

$$\sigma^2 I = b_1 \sigma_{gx}^2 + b_2 \sigma_{gxy} + b_3 \sigma_{gxz}$$

donde: σ_{gx}^2 = varianza genética del carácter a ser mejorado, y σ_{gxy} σ_{gxz} = covarianzas genéticas de los caracteres en los cuales está basada la selección. Las b 's fueron descritas anteriormente.

La respuesta a la selección para rendimiento de grano por planta con base al índice aplicado fue calculada como:

$$R = i \sigma I$$

donde: i = diferencial de selección estandarizado aplicado en selección y σI = desviación estándar del índice. El cociente de respuestas $(R/\Delta G)100$, da la eficiencia del índice de selección estimado.

Para el análisis genético de la generación F_3 , todos los factores involucrados se consideraron aleatorios (repeticiones, genotipos, ambientes e interacción genotipos x ambientes). Con base en las esperanzas de los cuadrados medios se estimó la varianza del error ($\sigma^2 e$), la varianza de la interacción genotipo por ambiente ($\sigma^2 ge$) y la varianza genética ($\sigma^2 g$). El mismo enfoque se usó para estimar las covarianzas genéticas para pares de caracteres.

La varianza fenotípica ($\sigma^2 p$) se calculó de acuerdo con Hallauer y Miranda (1988), como sigue:

$$\sigma^2 p = \sigma^2 e/rl + \sigma^2 ge/l + \sigma^2 g$$

con: $r = 2$ repeticiones y $l = 2$ localidades.

La ganancia genética esperada por selección al recombinar las mejores familias S_1 fue calculada con la fórmula:

$\Delta G = i \sigma_{ph} h^2$ con los subíndices descritos anteriormente.

En la generación F_3 también se estimó la respuesta correlacionada entre caracteres y los índices de selección, que incluyeron el rendimiento de grano y uno o dos componentes del rendimiento. Los análisis de varianza se efectuaron usando el procedimiento Mixed del paquete estadístico SAS versión 6.12.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ganancias esperadas por selección

En las cuatro poblaciones F_2 la selección individual fue en promedio 51 % ($11.5/7.6 = 1.51$) más eficiente en aumentar el rendimiento de grano que el de sus componentes. Estos últimos tuvieron ganancias esperadas similares de 7.6 % por ciclo, en promedio de las cuatro poblaciones, mientras que las ganancias esperadas para rendimiento de grano por planta variaron de 9.5 a 13.6 % por ciclo (Cuadro 1). Estas estimaciones son menores que las obtenidas por Swarup y Chaugale (1962) en sorgo y por Lal *et al.* (1996) en raji usando el mismo procedimiento de cálculo.

Cuadro 1. Ganancias esperadas por ciclo de selección para rendimiento de grano (RGP), peso de 100 granos (PGP) y número de granos por planta (NGP) en cuatro poblaciones de sorgo F_2 y en una generación de progenies F_3 .

Poblaciones	RGP		PGP		NGP	
	g pl ⁻¹	(%)	mg	(%)	num.	(%)
F_2 †						
W-A x 22830R	8.82	(13.6)	322	(8.6)	131	(7.6)
W-A x 17473R	5.98	(9.5)	188	(5.9)	158	(8.0)
SJ7-A x 22830R	6.94	(12.6)	234	(8.0)	179	(9.4)
SJ7-A x 17473R	5.62	(10.2)	202	(8.1)	116	(5.2)
Promedio	6.84	(11.5)	236	(7.6)	146	(7.6)
F_3 ‡						
SJ7-B x 22830R	9.45	(13.5)	447	(15.5)	295	(12.0)

Presión de selección = 20 %.

Números dentro de paréntesis son ganancias genéticas esperadas, en porcentaje de la media.

† Ganancias genéticas esperadas usan selección individual recurrente en plantas androestériles.

‡ Ganancias genéticas esperadas usan selección recurrente de familias S_1 .

La ganancia esperada con la selección de familias S_1 fue muy similar entre componentes, con 12.0 % para número de granos por planta y 15.5 % para el peso de 100 granos. Como era de esperarse, estas ganancias fueron superiores a las obtenidas en la misma cruce en la generación F_2 usando selección individual. Sin embargo, como la selección de familias S_1 involucra tres generaciones por ciclo en contraste con la selección de plantas individuales que requiere una generación por ciclo; en consecuencia, la selección de familias S_1 resultó ser 2.8, 1.6 y 2.0 veces menos eficiente que la selección individual para mejorar el

rendimiento de grano, el peso de granos y el número de granos, respectivamente.

Según Hallauer y Miranda (1988), las diferencias en eficiencia entre métodos de selección, en gran parte son debidas a diferencias en la expresión génica de los caracteres, en los efectos de interacción genotipo x ambiente y en la precisión de la técnica experimental. Las condiciones de clima y de manejo en el experimento de 1997, en el cual se predijeron las ganancias por selección individual, fueron muy buenas; además, las plantas estuvieron igualmente espaciadas y todos los tallos secundarios de cada planta fueron removidos, de modo que la expresión génica de las características medidas probablemente resultó magnificada. El uso de la heredabilidad en sentido amplio es otro factor que pudo contribuir también a obtener una alta ganancia esperada por selección en las características estudiadas, dado que ésta fue alta en la mayoría de las poblaciones, con valores de 50 a 65 % en rendimiento de grano, de 60 a 74 % en peso de 100 granos, y de 32 a 45 % en el número de granos.

Las ganancias predichas obtenidas mediante la selección de familias S₁ para rendimiento de grano y sus componentes, fueron prácticamente de la misma magnitud a las obtenidas en sorgo por Lothrop *et al.* (1985), quienes determinaron ganancias por ciclo de selección de 13.8, 16.8 y 12.6 % para rendimiento de grano, número de granos y peso de 100 granos respectivamente, pero mayores a las encontradas en maíz por Gritti *et al.* (1994), quienes obtuvieron ganancias por ciclo de 4.6 y 8.0 % para rendimiento de grano y peso de 200 granos, respectivamente.

Las poblaciones originadas por progenitores contrastantes en peso o número de granos no mostraron consistentemente mayores ganancias esperadas para rendimiento de grano o sus componentes. No obstante, el progenitor 22830R de alto peso de grano, al ser combinado con cualquiera de los progenitores de alto o bajo peso y número de granos, generó la mayor variación genética en los tres caracteres. Por tanto, la ganancia genética no depende de las diferencias en el peso y número de granos entre los progenitores, sino de la constitución genética de éstos, y tal vez de su diversidad. Al respecto, conviene destacar que esta línea de grano extragrande, proviene de materiales nuevos poco mejorados.

Respuestas correlacionadas

La selección directa para rendimiento de grano dio lugar a una respuesta correlacionada favorable en ambos componentes del rendimiento, en las cuatro poblaciones F₂ y en la generación F₃ (Cuadro 2). Sin embargo, todas las respuestas correlacionadas correspondientes a la selección

indirecta, fueron apreciablemente menores que la ganancia obtenida por selección directa. En general, la selección directa para rendimiento indujo más incrementos en el número de granos que en el peso de granos; las ganancias obtenidas indirectamente en esos caracteres, respecto a la selección directa, variaron de 27 a 65 % en el peso de 100 granos y de 51 a 98 % en el número de granos.

La selección indirecta para rendimiento de grano mediante la selección de cualquiera de sus componentes fue también favorable, aunque en ningún caso sobrepasó la ganancia esperada por selección directa. La selección para mayor peso de grano permitió una ganancia estimada en el rendimiento de 32 a 90 %, respecto de las ganancias obtenidas por la selección directa; por su parte, la selección para mayor número de granos generó una ganancia de 52 a 78 % en el rendimiento de grano, con respecto a la selección directa. Las diferencias en las respuestas correlacionadas entre poblaciones puede atribuirse, al menos parcialmente, a diferencias en la constitución genética de las poblaciones, dado que los progenitores involucrados en ellas variaron notablemente en tamaño y número de granos. Por ejemplo, la población F₂ Wheatland-A x 17473R con un peso y número de granos de intermedio a grande, tuvo una de las respuestas correlacionadas más pobres para rendimiento, cuando la selección fue hacia mayor peso de grano; en cambio, la población F₂ SJ7-A x 17473R constituida por un tamaño de semilla pequeño y alto número de granos por planta, mostró una de las respuestas correlacionadas más altas para rendimiento, cuando la selección fue también para mayor peso de grano.

La selección para mayor peso de grano en dos poblaciones F₂ y en la progenie F₃, resultó en un decremento en el número de granos por planta, mientras que la selección para alto número de granos en las mismas poblaciones resultó en decrementos en el peso de 100 granos. Las excepciones fueron las poblaciones F₂ Wheatland-A x 22830R y SJ7-A x 17473R, las cuales mostraron ganancias esperadas positivas, aunque con respuestas correlacionadas muy bajas. Los signos positivos en las respuestas correlacionadas entre estos dos componentes del rendimiento indican que al incrementar uno de los componentes por selección, no ocurre una reducción en el otro componente.

Sin embargo, como las ganancias esperadas más altas para rendimiento de grano y para ambos componentes se obtuvieron a través de la selección directa para rendimiento de grano, los resultados sugieren que la selección directa para rendimiento es más simple y más eficiente que la selección indirecta basada en el peso del grano o el número de granos. En sorgo, Lothrop *et al.* (1985) concluyeron también que la selección directa para rendimiento es más efectiva que la selección indirecta; mientras que en maíz

Cuadro 2. Ganancias genéticas directas y correlacionadas por ciclo de selección para rendimiento de grano (RGP), peso de 100 granos (PGP) y número de granos por planta (NGP), en cuatro poblaciones de sorgo F₂ y una generación de progenies F₃.

Población	Carácter seleccionado	RGP	PGP	NGP	RGP	PGP	NGP
		Ganancia esperada †			Porcentaje ‡		
F2							
W-A x 22830R	RGP	8.82	6.10	5.74	100	69	65
	PGP	213	322	26	66	100	8
	NGP	129	17	131	98	13	100
W-A x 17473R	RGP	5.98	1.91	4.68	100	32	78
	PGP	51	189	-42	27	100	-22
	NGP	146	-49	158	93	-31	100
SJ7-A x 22830R	RGP	6.94	4.49	4.80	100	65	69
	PGP	150	234	-17	64	100	-7
	NGP	142	-15	179	80	-8	100
SJ7-A x 17473R	RGP	5.62	5.09	3.59	100	90	64
	PGP	132	202	29	65	100	14
	NGP	111	35	116	96	30	100
F3							
SJ7B x 22830R	RGP	9.45	6.74	3.70	100	69	52
	PGP	266	448	-188	59	100	-42
	NGP	114	144	296	51	-49	100

† Ganancia esperada (léase a través de renglones): RGP = g planta⁻¹; PGP = mg; NGP = granos planta⁻¹.

‡ Las respuestas están expresadas como porcentajes de las ganancias esperadas directas por la selección de un determinado carácter.

Odhiambo y Compton (1987) determinaron que la selección para tamaño de grano no mejoró el rendimiento de grano. En cambio, Gritti *et al.* (1994) obtuvieron ganancias moderadas en el rendimiento de grano de 4.6 % por ciclo al seleccionar por tamaño de grano.

Índices de selección

Debido a que el rendimiento de grano es resultado de la contribución del número y el peso del grano, el uso de índices de selección que involucren los tres caracteres, podría proporcionar mejor criterio de selección para mejorar el rendimiento de grano. Pero los índices de selección aquí estudiados no fueron muy efectivos para mejorar el rendimiento, en comparación con la selección directa (Cuadro 3). Los índices de selección combinados que involucraron los tres caracteres de estudio, fueron los más efectivos en mejorar el rendimiento en todas las poblaciones F₂. La eficiencia relativa del índice combinado sobre la selección directa para rendimiento fue pequeña en la mayoría de las poblaciones, con valores de 2.59 a 3.51 %; únicamente en la población (SJ7A x 17473R) F₂ llegó a 7.21 %. Resultados similares se obtuvieron cuando se aplicó el índice a la información de la progenie F₃, aunque aquí la máxima eficiencia relativa con este índice fue de sólo 1.53 %. En sorgo, Singh y Baghel (1977) obtuvieron eficiencias relativas más bajas al usar índices y métodos de selección similares; concluyeron que ninguno de los índices fue significativamente ventajoso sobre la selección directa para rendimiento de grano.

Estos resultados son contrarios al postulado de que el mejoramiento genético del rendimiento sería más eficiente si se incluyeran ambos componentes del rendimiento como criterios de selección, debido a su herencia más simple y a la alta correlación que ambos caracteres tienen con el rendimiento de grano. La baja eficiencia relativa de estos índices de selección probablemente es debida a una compensación fisiológica interna entre los dos componentes del rendimiento, ya que ambos componentes están negativamente correlacionados entre sí en la mayoría de las poblaciones. De hecho, los resultados muestran que la selección directa es más fácil e igualmente eficiente que los índices de selección combinados para mejorar el rendimiento de grano. Para propósitos de selección es importante definir primero los objetivos de mejoramiento y dar un adecuado peso o valor económico a uno o ambos componentes del rendimiento, de tal manera que se puedan desarrollar mejores estrategias de mejoramiento a través de índices de selección combinados, como lo sugieren Falconer y Mackay (1996). Los resultados también sugieren que el tamaño y el número de granos de los progenitores involucrados en las poblaciones no fue un factor importante que contribuyera a obtener mayores avances genéticos en el proceso de selección para rendimiento de grano mediante los índices de selección usados.

Cuadro 3. Avance genético esperado para rendimiento de grano de tres índices de selección así como su eficiencia relativa respecto a la selección directa por rendimiento de grano en cuatro poblaciones de sorgo F₂ y en una generación de progenies F₃.

Población	Índice	Avance genético (g/planta)	Eficiencia relativa (%)
F ₂ [†] W-A x 22830R	Selección directa	8.82	100.00
	I=(0.573)RGP + (4.337)PGP	8.99	101.94
	I=(0.839)RGP + (-0.011)NGP	9.04	102.46
	I=(1.148)RGP + (-5.622)PGP + (-0.022)NGP	9.05	102.70
W-A x 17473R	Selección directa	5.98	100.00
	I=(0.494)RGP + (1.123)PGP	5.99	100.16
	I=(0.603)RGP + (-0.004)NGP	6.03	100.84
	I=(1.397)RGP + (-16.99)PGP + (-0.029)NGP	6.19	103.51
SJ7A x 22830R	Selección directa	6.94	100.00
	I=(0.581)RGP + (3.521)PGP	7.02	101.23
	I=(0.720)RGP + (-0.004)NGP	6.98	100.58
	I=(-0.100)RGP + (16.71)PGP + (0.020)NGP	7.12	102.59
SJ7A x 17473R	Selección directa	5.62	100.00
	I=(0.378)RGP + (9.442)PGP	5.98	106.36
	I=(0.769)RGP + (-0.009)NGP	5.89	104.83
	I=(-0.22)RGP + (22.475)PGP + (0.015)NGP	6.03	107.21
F ₃ [‡] SJ7B x 22830R	Selección directa	9.45	100.00
	I=(0.649)RGP + (2.580)PGP	9.53	100.82
	I=(0.748)RGP + (-0.003)NGP	9.51	100.57
	I=(0.053)RGP + (16.787)PGP + (0.017)NGP	9.60	101.53

[†] Avances genéticos esperados en las poblaciones F₂, usan selección fenotípica recurrente.

[‡] Avances genéticos esperados en la generación de progenies F₃ usan selección de familias S1.

CONCLUSIONES

La selección para mayor peso de grano generalmente resultó en un decremento en el número de granos por planta, mientras que la selección para alto número de granos resultó en un decremento en el peso de 100 granos. Hubo algunas excepciones entre poblaciones, pero con respuestas correlacionadas esperadas bajas.

Las estimaciones de avance genético muestran que la selección directa para rendimiento de grano es más efectiva y sencilla para mejorar el rendimiento de grano y sus componentes, que la selección indirecta por mayor peso de grano o alto número de granos.

Los índices de selección que involucraron el rendimiento de grano y uno o ambos componentes del rendimiento no fueron más efectivos para mejorar el rendimiento que la selección directa para rendimiento. La mayor eficiencia relativa se logró incluyendo los tres caracteres y sólo en una población fue de 7.2 %. En las otras poblaciones fluctuó entre 1.53 y 3.51 %.

El tamaño y número de granos de los progenitores que formaron las poblaciones estudiadas, no fue un factor determinante para promover en ellas diferencias notables en el avance genético del rendimiento de grano y sus componentes, ya sea mediante la selección directa, selección indirecta o índices de selección.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos profundamente el valioso apoyo del INI-FAP y del CONACYT para llevar a cabo el presente estudio, así como al Dr. Francisco Zavala García por sus contribuciones al trabajo en varias etapas. Agradecemos también a la asociación Nebraska Grain Sorghum Development, Utilization and Marketing Board por la ayuda en la conducción de los trabajos y a la empresa Pioneer International, Inc., por el apoyo brindado en las etapas finales del proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

- Andrews J D, P J Bramel-Cox (1993) Breeding cultivars for sustainable crop production in low input dryland agriculture in the tropics. In: International Crop Science I. D. R. Buxton, R. Shibles, R. A. Forsberg, B.L. Blad, K. H. Asay, G. M. Paulsen, and R. F. Wilson (eds.). CSSA, Madison, WI. pp:211-223.
- Blum A, S Ramaiah, E T Kanemasu, G M Paulsen (1990) The physiology of heterosis in sorghum with respect to environmental stress. Ann. Bot. 65:149-158.
- Castleberry R M (1973) Effects of thinning at different growth stages on morphology and yield of grain sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. M.S. Thesis. University of Nebraska, Lincoln, Nebraska. 157 p.
- Duvick D N (1996) Plant breeding, an evolutionary concept. Crop Sci. 36:539-548.
- Falconer D S, T F C Mackay (1996) Introduction to Quantitative Genetics. Fourth Ed. Longman Group Ltd. 464 p.
- Gritti O, M Bertolini, M Motto (1994) Recurrent selection for increasing seed size in maize. Maydica 39:149-154.
- Hallauer A R, J B Miranda Fo (1988) Quantitative Genetics in Maize Breeding. Second Edition. Iowa State University Press, Ames. 468 p.
- Heinrich G M, C A Francis, J D Eastin, M Saeed (1985) Mechanisms of yield stability in sorghum. Crop Sci. 25:1109-1113.
- Lal C, T Dawa, P Plaha, S K Sharma (1996) Studies on genetic variability and component analysis in ragi (*Eleusine coracana* Gaertn.). Indian J. Genet. 56(2):162-168.
- Lothrop J E, R E Atkins, O S Smith (1985) Variability for yield and yield components in IAP1R grain sorghum random-mating population. II. Correlations, estimated gains from selection, and correlated responses to selection. Crop Sci. 25:240-244.

- Manjarrez-Sandoval P, V Gonzalez-Hernandez, L E Mendoza-Onofre, E M Engleman (1989) Drought stress effects on the grain yield and panicle development of sorghum. *Can.J. Plant Sci.* 69:631-641.
- Mather K, J L Jinks (1982) *Biometrical Genetics: The Study of Continuous Variation*. Third Ed. Chapman and Hall, London. 379 p.
- Odhambo M O, W A Compton (1987) Twenty cycles of divergent mass selection for seed size in corn. *Crop Sci.* 27: 1113-1116.
- Saeed M S, C A Francis, M D Clegg (1986) Yield component analysis in grain sorghum. *Crop Sci.* 26:346-351.
- Singh R P, S S Baghel (1977) Yield components and their implication to selection in sorghum. *Indian J. Genet. & Plant Breed.* 37 (1):62-67.
- Swarup V, D S Chaugale (1962) Studies on genetic variability in sorghum. I. Phenotypic variation and its heritable components in some important quantitative characters contributing towards yield. *Indian J. Genet. & Plant Breed.* 22:31-36.
- Tinius C N, J W Burton, T E Jr Carter (1992) Recurrent selection for seed size in soybean. II. Indirect effects on seed growth rate. *Crop Sci.* 32(6):1480-1483.
- Wenzel W G (1990) Inheritance and interrelationships of quantitative traits in sorghum. *Sorghum Newsletter.* 31: 1-3.
- Youngquist J B, D C Carter, W C Youngquist, M D Clegg (1993) Phenotypic and agronomic characteristics associated with yield and yield stability of grain sorghum in low rainfall environments. *Agronomy (Trends Agric. Sci.)* 1:25-32.