

SELECCIÓN PARA CONTENIDO DE PROTEÍNA DEL GRANO EN TRIGO IRRADIADO CON RAYOS GAMMA DE ^{60}Co

Selection for grain protein content in wheat irradiated with ^{60}Co gamma rays

L Partida-Ruvalcaba ✉, T Cervantes-Santana, A Salazar-Zazueta, TJ Velázquez-Alcaraz

(LPR)(TJVA) Facultad de Agronomía, UAS. Km. 22.5 Carr. Culiacán-Eldorado. Culiacán, 80000 Sinaloa, México.
parpolo@yahoo.com.mx

(TCS) IREGEP, Colegio de Postgraduados. Edo. de México

(ASZ) Laboratorio de Farinología-INIFAP. Estado de México

Artículo recibido: 6 de julio de 2006, **aceptado:** 25 de noviembre de 2009

RESUMEN. Esta investigación fue realizada por la necesidad de mejorar las variedades de trigo (*Triticum aestivum* L.) con alta calidad nutritiva. En compuestos irradiados seleccionados en seis ciclos por mayor tamaño y densidad de grano, se efectuó selección para mayor contenido de proteína. Siete compuestos tuvieron dos niveles de irradiación, difirieron en cinco generaciones de irradiación y 74 kr de dosis acumulada, excepto uno cuya diferencia fue de 73 kr, y procedieron de la variedad 'Salamanca' irradiada con rayos gamma de cobalto sesenta (^{60}Co). La selección fue hecha en plantas M_6 y M_{11} , y las líneas seleccionadas fueron evaluadas durante dos ciclos en Montecillo, Estado de México. El contenido de proteína tendió a la normal, con media, intervalo y varianza de 13.1 %, 11.6 a 15.8 % y 0.45, respectivamente, y 'Salamanca' tuvo 11.5 %. Con el segundo nivel de irradiación, la media (13.1 %), valor máximo (15.8 %), varianza (0.51) y número de líneas (9) con más de 14.6 % de proteína, superaron a los del primer nivel, cuyos valores fueron 12.9 %, 15.0 %, 0.41 y 3. Las tres líneas superiores fueron del segundo nivel de irradiación, con proteína de 14.9 a 15.3 %, cuyos mínimo y máximo superaron al contenido de proteína de 'Salamanca' en 19.2 y 22.4 %, respectivamente. La correlación de proteína y rendimiento de grano fue negativa ($r = -0.59$) y altamente significativa; las líneas de alta proteína rindieron menos que 'Salamanca'. Las líneas tuvieron mayor volumen y peso de grano que 'Salamanca', pero casi la misma densidad.

Palabras clave: *Triticum aestivum* L., rayos gamma, mutaciones, volumen, peso, densidad, rendimiento de grano.

ABSTRACT. This study was conducted in response to the need to improve wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties with a high nutritional quality. A selection for greatest protein content was carried out on irradiated composites selected during six seasons considering a greater grain size and grain density. Seven composites were subjected to two irradiation levels. They differed in five irradiation generations and 74 kr of accumulated doses, except for one with a difference of 73 kr. They came from the Salamanca variety irradiated with gamma rays of cobalt sixty (^{60}Co). The selection was made from M_6 and M_{11} plants, and the selected lines were evaluated over two seasons at Montecillo, State of Mexico. The protein content tended to be normal, with a mean, interval and variance of 13.1 %, 11.6 to 15.8 % and 0.45, respectively. The 'Salamanca' had 11.5 %. With the second irradiation level, the mean (13.1 %), maximum value (15.8 %), variance (0.51) and number of lines (9) with more than 14.6 % protein, exceeded those of the first level, of which the values were 12.9 %, 15.0 %, 0.41 and 3. The three high lines corresponded to the second irradiation level, with protein from 14.9 to 15.3 % and with minimum and maximum values exceeding the protein content of 'Salamanca' by 19.2 and 22.4 %, respectively. The protein and grain yield correlation was negative ($r = -0.59$) and highly significant; the high protein content lines yielded less than 'Salamanca'. The lines had a greater grain volume and weight than 'Salamanca', but almost the same density.

Key words: *Triticum aestivum* L., gamma rays, mutations, volume, weight, density, grain yield.

INTRODUCCIÓN

Desde el período 1995-1996 hasta el año 2004, la superficie sembrada con trigo (*Triticum aestivum* L.) no ha tenido grandes variaciones en el mundo, ya que en el periodo 1995-1996 la superficie fue 218.8 millones de hectáreas, mientras que en el 2004 fue 218.2; sin embargo, la producción mundial se ha incrementado en 14.5 %, toda vez que en 1995-1996 se cosecharon 537.9 millones de toneladas, en tanto que en el 2004 se obtuvieron 615.8 (Anónimo 2004).

Con el mejoramiento genético de trigo en México, iniciado formalmente en 1943, cuando el rendimiento promedio era un poco más de 700 kg ha⁻¹, se fueron generando variedades mejoradas de porte bajo, precoces, resistentes a enfermedades y de alto rendimiento que, con la mejora de las prácticas de cultivo, fueron incrementando el rendimiento promedio, el cual en 1980 fue de 4100 kg ha⁻¹; esto provocó un aumento de la superficie cultivada e hizo posible producir la mayor parte del grano requerido para cubrir, en cantidad, las necesidades alimentarias en este país con dicho cereal (Hanson *et al.* 1982).

Sin embargo, aún queda por mejorar la calidad nutritiva del grano. Para esto se ha buscado aumentar la proteína y los aminoácidos limitativos, lisina, triptofano y metionina (Duffus & Slaugther 1980).

Con selección recurrente por dos ciclos, McNeal *et al.* (1978) obtuvieron un incremento de 2.5 % en la proteína del grano, y Loffler *et al.* (1983) obtuvieron 1.0 % en relación con los materiales originales; Randhawa & Gill (1978) en un ciclo aumentaron la proteína 4.3 %, y Delzer *et al.* (1995) en cuatro ciclos la aumentaron 10.8 %.

La combinación de inducción de mutaciones y selección ha sido otra alternativa para aumentar la proteína del grano de trigo. Con irradiación de rayos gamma, Parodí & Nebreda (1976) obtuvieron mutantes M₄ y M₅ cuyo contenido promedio de proteína aumentó 5.3 % en relación con los testigos, y el mejor mutante aumentó 21.7 %; Kumar *et al.* (1981) obtuvieron mutantes M₄ con 2.0 % más de proteína que los testigos; con etil metano sulfona-

to, Kar *et al.* (1978) generaron mutantes M₄ hasta con 3.9 % más de proteína que la variedad paternal. Crowley *et al.* (1991) obtuvieron cinco mutantes M₄ con 3.3 % de proteína por arriba de las variedades originales. Sin embargo, la correlación negativa del contenido de proteína con el rendimiento del grano (Bhatia 1975; Loffler *et al.* 1982, 1985) ha sido obstáculo para obtener variedades con alta expresión en ambos caracteres.

Mediante irradiación recurrente con rayos gamma de ⁶⁰Co y selección por tamaño y peso de grano de trigo, se incrementó el contenido de proteína y rendimiento de grano, de tal manera que la línea con más proteína superó con los respectivos 19.8 y 21.8 % a las variedades testigo 'Salamanca' y 'Romoga'; sin embargo, la línea de mayor rendimiento superó a dichos testigos en 45.3 y 35.8 %, respectivamente. Las líneas L₄₄ y L₄₆ tuvieron los mayores incrementos en proteína (10.3 y 9.5 %) y rendimiento de grano (31.8 y 24.8 %) con respecto a 'Salamanca', mientras que en relación a 'Romoga', los respectivos incrementos fueron de 12.1 y 11.2 % para proteína, y de 23.1 y 16.7 % para rendimiento. Las líneas superaron a las variedades en volumen y peso de grano, pero en densidad del grano, número de tallos por planta y espiguillas por espiga, sólo las líneas de alto rendimiento superaron a las variedades (Partida *et al.* 2007).

A través de irradiación de semillas de triticale del cultivar 'Secano' con 20, 12, 12 y 20 kr de rayos gamma de ⁶⁰Co, las medias de días a floración y madurez fisiológica se redujeron en 6.4 (7.5 %) y 3.4 (2.6 %) días, respectivamente, pero en cambio el número de tallos por planta se incrementó en 15.8 %, el peso y volumen de 1000 granos en los respectivos 25.8 y 26.3 %, el peso de grano por espiga en 35.7 % y el rendimiento de grano en 58.2 % (Ramírez *et al.* 2003).

También con irradiación recurrente de rayos gamma de ⁶⁰Co aplicada a la semilla del cultivar de maíz 'CP-561' se indujo variación genética y aumentó la varianza de dominancia que se manifestó en mayor rendimiento debido a la heterocigosis (Carrera & Cervantes 2007). Lo anterior significa que la inducción de mutaciones en el mejoramiento de plantas ha tenido éxito, y este método continuará en

uso, ya que en los últimos 15 años se han obtenido 1019 variedades mutantes (Ahloowalia *et al.* 2004). El presente trabajo tuvo como objetivo seleccionar genotipos de trigo de alto contenido de proteína en el grano, en compuestos irradiados procedentes de la variedad 'Salamanca', bajo la hipótesis que con la irradiación se inducen mutaciones que amplían la variabilidad genética en caracteres como contenido de proteína, que puede ser aprovechada por la selección para incrementar dicho carácter.

MATERIALES Y MÉTODOS

El material genético original fueron ocho compuestos irradiados C_{i0} (Tabla 1) de trigo procedentes de la variedad 'Salamanca', con alta homocigosis y homogeneidad, la cual se irradió con rayos gamma de ^{60}Co a diferentes dosis por varias generaciones, y se seleccionó para mayor tamaño de espiga y grano; de este proceso se generaron líneas de alto rendimiento (Cervantes & Cervantes, 1992, 1996) y compuestos, que se continuó irradiando y seleccionando bajo el mismo criterio, hasta obtener el material con que se integraron los compuestos C_{i0} .

A partir de 1991, cada compuesto C_{i0} se sembró durante diez generaciones en un lote a densidad y manejo comercial, con fertilización de 120N-60P-00K, en dos ciclos por año, uno en Montecillo, Estado de México, y otro en Roque, Guanajuato. La cosecha de cada lote se efectuó en forma masiva de todas las plantas de la parcela. Durante las primeras cuatro generaciones, la semilla cosechada se seleccionó por tamaño y en parte por su densidad, en una máquina de zarandas y aire. Durante seis generaciones posteriores se seleccionaron semillas en forma similar a las anteriores, y en forma intensa por su mayor densidad en una máquina de gravedad. Además, durante las primeras dos generaciones las semillas de los compuestos C_{10} a C_{60} se irradiaron a 18 kr de rayos gamma de ^{60}Co en el irradiador industrial JS-6500 del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), y luego se siguió seleccionando, según se indica arriba, hasta obtener en Roque, Gto., en el ciclo 1996A, la semilla de los compuestos C_{i1} del primer nivel de irradiación (NI_1), cuya genealogía para C_{11} es 209- $R_{11}M_{10}$ (209 es la dosis

de irradiación acumulada en kr, R_{11} es el número de generaciones de irradiación y M_{10} es el número de generaciones de segregación a partir de la última irradiación).

Una parte de las semillas cosechadas en el lote de la segunda irradiación de cada compuesto se irradió por cinco generaciones a 18, 18, 16, 10 y 12 kr en forma subsecuente, y después se continuó seleccionando en la forma ya descrita, obteniéndose la semilla de los compuestos C_{i2} del segundo nivel de irradiación (NI_2), cuya genealogía para C_{12} es 283- $R_{16}M_5$. En el transcurso de este proceso se agregó C_{7k} ($k = 1, 2$ nivel de irradiación), que difirió de los otros compuestos en las generaciones en que se irradió y en las dosis de irradiación. El compuesto C_{80} no se volvió a irradiar a partir de su formación, y se denominó C_{81} del primer nivel de irradiación.

Con los compuestos C_{11} a C_{71} , C_{12} a C_{72} y C_{81} se definieron los grupos G_{11} , G_{12} y G_{21} , respectivamente (Tabla 1). La diferencia entre los compuestos de G_{11} del primer nivel de irradiación y los compuestos de G_{12} del segundo nivel, fue de 74 kr de dosis acumulada en cinco generaciones de irradiación, excepto en C_{71} y C_{72} , que difirieron en 73 kr acumulados.

Del grano cosechado en Roque, Gto., en el ciclo 1996A, se tomaron cuatro muestras de la variedad 'Salamanca' y de los compuestos C_{11} , C_{12} , C_{21} y C_{22} . Las muestras en los compuestos se tomaron después de haber seleccionado el grano por tamaño y densidad. Cada muestra de grano se analizó en su contenido de proteína con el espectrofotómetro de reflectancia infrarrojo cercano Infratec 1255, del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP). El contenido de proteína de cada muestra fue el promedio de tres submuestras de grano de 8 g cada una.

Las semillas de los compuestos C_{i1} y C_{i2} se sembraron en la misma forma que en las 10 generaciones anteriores, en Montecillo, Edo. Méx., en el ciclo 1996B. En cada compuesto C_{ik} ($k > 0$) se seleccionaron espigas grandes con grano grande, obteniéndose un total de 735 espigas (Tabla 2).

Las semillas de las 735 espigas se sembraron en surco por espiga en Montecillo, Edo. Méx., en el ciclo 1997A, con distribución aleatoria de espigas.

Tabla 1. Grupos, compuestos y genealogía de compuestos originales y seleccionados en los niveles de irradiación NI_k .

Table 1. Groups, compounds and genealogy of original compounds selected at the irradiation levels of NI_k .

Compuestos	Compuestos originales		Compuestos seleccionados	
	NI_0	NI_1	NI_1	NI_2
G_{1k}				
C_{1k}	173-R ₉ M ₃	209-R ₁₁ M ₁₀	283-R ₁₆ M ₅	
C_{2k}	80-R ₅ M ₃	116-R ₇ M ₁₀	190-R ₁₂ M ₅	
C_{3k}	115-R ₆ M ₇	151-R ₈ M ₁₀	225-R ₁₃ M ₅	
C_{4k}	60-R ₃ M ₇	96-R ₅ M ₁₀	170-R ₁₀ M ₅	
C_{5k}	100-R ₅ M ₁	136-R ₇ M ₁₀	210-R ₁₂ M ₅	
C_{6k}	60-R ₃ M ₁₀	96-R ₅ M ₁₀	170-R ₁₀ M ₅	
C_{7k}	170-R ₉ M ₁	170-R ₉ M ₇	243-R ₁₄ M ₁	
G_{1k}				
C_{8k}	197-R ₁₂ M ₃	197-R ₁₂ M ₁₄	—————	

G_{jk} y C_{ik} = Grupo j y compuesto i del nivel de irradiación k . C_{10} : 173 = dosis acumulada en kr, R₉ = novena generación de irradiación, M₃ = tercera generación de segregación.

Tabla 2. Número de progenies (espigas) sembradas, plantas seleccionadas y analizadas en contenido de proteína, por grupos de compuestos, compuestos, nivel de irradiación y presión de selección. Montecillo, Edo. Méx. Ciclo 1997A.

Table 2. Number of progeny (spikes) planted, plants selected and analysed for protein content, by groups of compounds, compounds, irradiation level and selection pressure. Montecillo, Edo. Méx. 1997SA season.

Grupos y compuestos	Progenies sembradas		Progenies seleccionadas y Analizadas			PS (%)	
	NI_1	NI_2	NI_1	NI_2	NI_1	NI_2	
G_{1k}							
C_{1k}	57	64	50	52	5.5	5.1	
C_{2k}	48	60	40	54	5.2	5.6	
C_{3k}	50	56	39	41	4.9	4.6	
C_{4k}	44	46	38	38	5.4	5.2	
C_{5k}	39	43	29	23	4.6	3.3	
C_{6k}	44	55	37	33	5.3	3.8	
C_{7k}	33	47	20	29	3.8	3.9	
Subtotal	315	371	253	270			
G_{1k}							
C_{81}	49	————	70	————	8.9	————	
Total	364	371	323	270			

G_{jk} = grupo de compuestos; C_{ik} = compuesto; NI_k = nivel de irradiación; PS = presión de selección.

La densidad por surco fue de 16 plantas separadas a 0.20 m, en surcos de 3.0 m de largo separados a 0.30 m. Se fertilizó con la fórmula 120N-60P-00K durante la etapa de amacollamiento y se aplicaron los riegos necesarios para el crecimiento y desarrollo del trigo. Se seleccionaron y cosecharon en forma individual las plantas con mejores características agronómicas y de producción. De éstas se seleccio-

naron 593 plantas (Tabla 2), cuya producción de grano pesó 30 g como mínimo. El grano de cada planta seleccionada se analizó en su contenido de proteína, en el Infratec 1255. El análisis se hizo con tres repeticiones de la misma muestra.

Posteriormente, se seleccionaron 13 plantas cuyo contenido de proteína fue mayor de 14.6%. La semilla de cada planta constituyó una línea MI' con

$l' = l+2$ (para el respectivo MI de NI_1 y NI_2 de la Tabla 1). Las 13 líneas y los cultivares testigo 'Salamanca', 'Temporalera' y 'Romoga', se evaluaron en Montecillo, Edo. Méx., en un experimento con diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones, en el ciclo 1998B, y con cinco repeticiones en el ciclo 1999A. La semilla utilizada en la segunda evaluación provino de las parcelas experimentales de la primera evaluación. La parcela experimental fue de un surco de 2 m de longitud, con distancia entre surcos de 0.30 m. La siembra fue hecha a chorrillo con 200 semillas por surco. El experimento en el primer ciclo se condujo bajo temporal, y en el segundo bajo riego. La fertilización al momento de la siembra fue con la fórmula 120N-60P-00K, y a los 50 días después con 100 kg de N ha^{-1} . Los caracteres medidos fueron contenido de proteína del grano (%), rendimiento de grano ($t\ ha^{-1}$), peso y volumen de 300 granos (el primero en g y el segundo en cm^3) y densidad de grano.

Con la información del contenido de proteína del grano de las plantas cosechadas en el ciclo 1997A, se probó si la frecuencia de plantas tenían una distribución normal, con la prueba de Shapiro & Wilk (1965), usando el procedimiento Proc Univariate (SAS, Institute, 1985). Esta prueba fue para obtener información del tipo de herencia de la variación generada con la irradiación, en el sentido de que los caracteres cuantitativos se distribuyen normalmente (Falconer, 1960). Se hizo comparación de medias con la prueba de Tukey ($p = 0.05$) obtenida del análisis de varianza con base en un diseño completamente al azar con dos alternativas: a) grupos y compuestos dentro de grupos, y b) compuestos y niveles de irradiación dentro de compuestos; las repeticiones en ambos casos fueron las plantas. Para el experimento de evaluación de líneas (ciclos 1998B y 1999A) se hizo análisis de varianza, y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey, usando para grupos el error general y para líneas dentro de grupos el error correspondiente a cada grupo.

RESULTADOS

En el análisis preliminar del contenido de pro-

teína del grano de trigo cosechado en el ciclo 1996A (Tabla 3) indicó que el cultivar original 'Salamanca' tuvo 10.2% de proteína, estadísticamente inferior al de los compuestos irradiados (C_{ik}). El compuesto C_{2k} fue inferior a C_{1k} , tanto con NI_1 como con NI_2 , pero el compuesto C_{12} fue superior a C_{11} .

Según la prueba de Shapiro & Wilk (1965), el contenido de proteína en el ciclo 1997A presentó una distribución normal, ya que W tuvo una probabilidad < 0.01 (Tabla 4) para el total de plantas analizadas, así como para el primero (G_{11}) y el segundo (G_{12}) nivel de irradiación del grupo G_1 .

El contenido de proteína de 'Salamanca' (11.5%), no incluido en la distribución de frecuencias de los grupos indicados, fue inferior (en valores absolutos) al valor mínimo de los materiales irradiados, cuyo intervalo de variación fue de 11.6 a 15.8%. En relación con el primer nivel de irradiación del grupo G_1 , en el segundo se amplió el intervalo de variación y se incrementó la varianza y la media del contenido de proteína.

La comparación de medias del contenido de proteína (Tabla 5) indicó que los grupos G_{12} y G_{21} son iguales estadísticamente, pero superiores al grupo G_{11} ; así mismo, que existen diferencias estadísticas entre los compuestos de G_{12} , pero no entre los de G_{11} ; es decir, el grupo de mayor irradiación (G_{12}) tuvo mayor contenido de proteína y mayor variación entre compuestos que el de menor irradiación (G_{11}), y según la comparación de medias, dichas diferencias estadísticas ocurrieron entre los compuestos C_{22} y C_{21} , y entre C_{62} y C_{61} . El valor máximo de máximos (15.8%) se obtuvo en C_{12} , lo cual representó 37.4% de incremento en relación con el cultivar original 'Salamanca'. Además, de C_{12} se seleccionaron cuatro líneas M_7 del total de 13 líneas MI' ($l' = l+2$) seleccionadas con contenido de proteína superior a 14.6%. En el número de líneas seleccionadas le siguió C_{32} con tres líneas, y luego los otros compuestos con una o ninguna línea. Tres compuestos (C_{12} , C_{32} y C_{62}) con los valores más altos ($> 15.0\%$) fueron del segundo nivel de irradiación de G_1 , del cual se seleccionaron nueve líneas, en contraste con las tres líneas seleccionadas en el primer nivel, y una seleccionada en el grupo G_{21} , que correspondieron a una presión de selección de

Tabla 3. Contenido de proteína del grano del cultivar 'Salamanca' y compuestos C_{ik} de trigo del nivel de irradiación NI_k . Roque, Gto. Ciclo 1996A.

Table 3. Grain protein content of the 'Salamanca' cultivar and C_{ik} wheat compounds from the NI_k irradiation level. Roque, Gto. 1996A season.

Genotipos	NI_0	NI_1	NI_2
Salamanca	10.2 d		
C_{1k}		10.9 b	11.2 a
C_{2k}		10.7 c	10.6 c
DMSH=0.195			

Medias con la misma letra son iguales (Tukey, 0.05); C_{ik} = compuesto i con nivel de irradiación k .

Tabla 4. Valores de los estadísticos obtenidos en la prueba de normalidad de la distribución de frecuencias de plantas en contenido de proteína del total de plantas de dos grupos de compuestos, según prueba de Shapiro & Wilk (1965). Montecillo, Edo. Méx. Ciclo 1997A.

Table 4. Values of the statistics obtained with the normality test for the frequency distribution of the plants, for protein content of all plants, for two groups of compounds, according to the Shapiro & Wilk (1965) test. Montecillo, Edo. Méx. 1997A season.

Genotipos	Total	G_{11}	G_{12}
Núm. de observaciones	593.00	253.00	270.00
Media	13.10	12.93	13.13
Mínimo	11.60	11.80	11.60
Máximo	15.80	15.00	15.80
Varianza	0.45	0.41	0.51
W	0.95	0.94	0.94
Probabilidad >W	0.00	0.00	0.00

G_{11} y G_{12} = grupos de compuestos con el primer y segundo nivel de irradiación, respectivamente.

3.3, 1.1 y 1.4 %, respectivamente.

En los análisis de varianza de la evaluación de líneas en contenido de proteína del grano y rendimiento de grano en los ciclos 1998B y 1999A (Tabla 6), hubo diferencias estadísticas significativas entre líneas, entre grupos, entre líneas dentro de grupos en general y, en particular, dentro de la mayoría de los grupos.

La comparación de medias de proteína de las líneas evaluadas (Tabla 7) indicó que G_{12} , grupo con el segundo nivel de irradiación, tuvo el contenido de proteína más alto en los dos ciclos de evaluación, con 13.7 y 14.4 % en 1998B y 1999A, respectivamente, pero en el primer ciclo fue igual al grupo G_{11} del primer nivel de irradiación, que tuvo 13.2 % de pro-

teína. En ambos ciclos, el segundo lugar lo ocupó G_{21} formado por una sola línea del compuesto C_{81} del primer nivel de irradiación, con el respectivo 13.0 y 13.9 % de proteína en el primero y segundo ciclo. El grupo de testigos (G_{30}) fue el más bajo, con 12.4 y 12.5 % de proteína en el primero y segundo ciclo, respectivamente, y entre éstos la variedad 'Romoga' fue inferior a 'Temporalera', y 'Salamanca' fue intermedia a estas dos variedades.

Con el aumento del contenido de proteína del grano se obtuvo una reducción del rendimiento del mismo, ya que en proteína el orden decreciente de los grupos fue G_{12} , G_{21} , G_{11} y G_{30} , y en rendimiento fue inverso, en el cual el grupo de testigos (G_{30}) fue el mejor, con 4.49 y 8.18 t ha⁻¹ en 1998B y 1999A,

Tabla 5. Contenido de proteína por grupos, por compuestos de cada grupo, valores extremos, varianza e incremento de proteína del valor máximo en relación con el del cultivar 'Salamanca'. Montecillo, Edo. Méx. Ciclo 1997A.

Table 5. Protein content per groups, per compounds of each group, extreme values, variance and protein increase of the maximum value in relation to that of the 'Salamanca' variety. Montecillo, Edo. Méx. 1997A season.

Grupo y Compuesto	Contenido de proteína (%)				Incremento (%)	Líneas Seleccionadas
	Media	Mínimo	Máximo	Varianza		
G ₀₀						
Salamanca	11.5					
G ₁₁	12.93 B	11.8	15.0	0.41	30.4	3
C ₁₁	12.99 a	11.9	15.0	0.57	30.4	1
C ₂₁	12.78 a b	12.0	14.9	0.37	29.6	1
C ₃₁	13.15 a	12.3	14.6	0.40 b	27.0	0
C ₄₁	12.85 a	12.0	14.4	0.27	25.2	0
C ₅₁	12.81 a	11.9	13.8	0.29	20.0	0
C ₆₁	12.82 a b	11.8	13.9	0.39	20.9	0
C ₇₁	13.18 a	12.4	14.8	0.39	28.7	1
DMSH	0.46					
G ₁₂	13.13 A	11.6	15.8	0.51	37.4	9
C ₁₂	13.20 ab	12.1	15.8	0.68	37.4	4
C ₂₂	13.10 ab a	12.2	14.3	0.27	24.3	0
C ₃₂	13.25 ab	11.8	15.2	0.79	32.2	3
C ₄₂	12.78 b	11.9	13.8	0.23	20.0	0
C ₅₂	12.77 b	11.6	13.9	0.36	20.9	0
C ₆₂	13.35 a a	12.0	15.3	0.59	33.0	1
C ₇₂	13.38 a	12.6	14.7	0.3	27.8	1
DMSH	0.48					
G ₂₁	13.23 A	12.0	14.7	0.32	27.8	1
C ₈₁	13.23	12.0	14.7	0.32	27.8	1
DMSH	0.18					

Sal = Variedad 'Salamanca', no incluida en la comparación de medias. G_{j_k} y C_{i_k} = Grupo *j* y compuesto *i* del nivel de irradiación *k*. Medias con la misma letra mayúscula en la misma columna son iguales (Tukey, 0.05).

Medias con la misma letra minúscula en la misma columna del mismo grupo G_{j_k} son iguales (Tukey, 0.05); medias y varianzas con diferente letra cursiva del mismo compuesto C_i son diferentes (Tukey, 0.05 y F, 0.05, respectivamente).

respectivamente (Tabla 7).

Como resultado de las mutaciones inducidas con la irradiación recurrente y de la selección para mayor tamaño y densidad de grano, el volumen y peso de grano de los grupos de líneas irradiadas fue superior estadísticamente al del grupo de testigos (Tabla 8), entre los que se encuentra la variedad original 'Salamanca'. En el ambiente de riego 1999A (el más favorable) el grupo G₁₁ de líneas, con cinco generaciones más de selección después de la última irradiación que las líneas de G₁₂, fue superior en ambos caracteres a éste. En densidad de grano no hubo diferencias significativas, lo cual indica que la selección para este carácter no fue efectiva.

DISCUSIÓN

Como los caracteres cuantitativos tienen una distribución normal (Falconer, 1960), el contenido de proteína generado por la irradiación recurrente de la variedad 'Salamanca' (alta en homocigosis y homogeneidad) puede ser de tipo cuantitativo, pues la prueba de normalidad de frecuencias así lo indica.

Dado que G₁ con el segundo nivel de irradiación, cinco generaciones de irradiación y 74 kr de dosis acumulada más que el primer nivel, superó a éste en la media, el valor máximo, la varianza y el número de líneas seleccionadas con más de 14.6% de proteína, debido a que con el aumento del número de irradiaciones se indujeron más mutaciones y se incrementó la variabilidad genética en los com-

Tabla 6. Análisis de varianza del contenido de proteína y rendimiento del grano de las líneas de trigo. Montecillo, Edo. Méx. Ciclos 1998B y 1999A.

Table 6. Variance analysis of the grain protein content and yield of the wheat lines. Montecillo, Edo. Méx. 1998B and 1999A seasons.

FV	GL	CM	
		Rendimiento	Proteína
Ciclo 1998B			
Repeticiones	3	0.08	1.31
Líneas	15	3.734 **	1.37
G	3	4.836 **	2.641 **
L/G	12	3.458 **	1.055 **
L/G ₁₁	2	1.907 **	1.157 **
L/G ₁₂	8	4.545 **	1.049 **
L/G ₂₁	0	0	0
L/G ₃₀	2	0.661 **	0.98
Error	45	3.73	0.19
Total	63		
Ciclo 1999A			
Repeticiones	4	0.16	1.17
Líneas	15	4.205 **	10.715 **
G	3	15.273 **	31.399 **
L/G	12	1.438 **	5.544 **
L/G ₁₁	2	0.02	0.52
L/G ₁₂	8	2.085 **	2.790 **
L/G ₂₁	0	0	0
L/G ₃₀	2	0.269 **	21.579 **
Error	60	0.15	0.52
Total	79		

G = Grupos de líneas; L = Líneas; G_{jk} = Grupo *j* del nivel de irradiación *k*. ** significativo a 0.01 de probabilidad.

puestos, lo que hizo posible la selección de un mayor número de líneas con contenido de proteína más alto, en relación con los compuestos del primer nivel de irradiación del mismo grupo.

El conjunto de líneas irradiadas superó en proteína a la variedad original 'Salamanca', y particularmente la superó el grupo de líneas de mayor irradiación (G₁₂), de las cuales L₄, L₅ y L₆ tuvieron el contenido de proteína más alto, con valores respectivos en el ciclo 1998B (el menos favorable) de 15.2, 15.0 y 15.0 %, y en el ciclo 1999A (el más favorable) de 15.3, 15.3 y 14.9 %. La mejor línea (L₄) superó a 'Salamanca' con 2.6 % en el primer ciclo y con 2.8 % en el segundo. Estos aumentos corresponden en relación con 'Salamanca' a incrementos de 20.6 y 22.4 %, respectivamente, los cuales son superiores

a los reportados por de Parodi & Nebreda (1976) y Kumar *et al.* (1981), pero inferiores a los de Kar *et al.* (1978) y Crowley *et al.* (1991).

Las tres líneas superiores fueron las más estables desde que se seleccionaron como plantas con más proteína en el grano durante el ciclo 1997A, ya que su reducción máxima de este ciclo a los dos de su evaluación como líneas, fue de 0.6, 0.7 y 0.5, respectivamente, la cual fue menor a 50 % de la reducción obtenida en las otras líneas. Estas tres líneas en generación M₇ provienen de la misma familia, dada por una espiga seleccionada en 1996B en el compuesto C₁₂, con genealogía 283-R₁₆M₅ (Tabla 1), que fue el de mayor número de generaciones de irradiación y dosis en kr acumulados. La similitud entre dichas líneas en contenido de proteína, indica

Tabla 7. Contenido de proteína y rendimiento de grano por grupos y líneas de cada grupo. Montecillo, Edo. Méx. Ciclos 1998B y 1999A.

Table 7. Grain protein content and yield per groups and lines of each group. Montecillo, Edo. Méx. 1998B and 1999A seasons.

Grupos y compuestos	Líneas	Proteína (%)			Rendimiento (t ha ⁻¹)	
		1997A*	1998B	1999A	1998B	1999A
G ₁₁		14.9	13.2 AB	13.3 C	3.55 B	6.57 B
C ₁₁	L ₁	15	13.9 a	13.3 a	3.00 b	6.38 a
C ₂₁	L ₂	14.9	12.5 c	13.4 a	4.07 a	6.39 a
C ₇₁	L ₃	14.8	13.1 b	13.2 a	3.58 ab	6.94 a
	DMSH		0.57	0.57	0.93	1.99
G ₁₂		15.2	13.7 A	14.4 A	3.59 B	5.34 C
C ₁₂	L ₄	15.8	15.2 a	15.3 a	3.00 c	4.72 bc
C ₁₂	L ₅	15.7	15.0 a	15.3 a	3.05 bc	5.14 bc
C ₁₂	L ₆	15.4	15.0 a	14.9 ab	3.00c	4.79 bc
C ₁₂	L ₇	14.7	12.9 b	13.9 c	4.03 a	6.38 a
C ₃₂	L ₈	15.2	13.4 b	14.3 bc	3.83 ab	5.44 abc
C ₃₂	L ₉	15.2	12.8 b	14.4 abc	4.00 a	4.96 bc
C ₃₂	L ₁₀	14.7	12.6 b	13.7 c	4.09 a	6.40 a
C ₆₂	L ₁₁	15.3	13.1 b	14.4 abc	4.13 a	4.30 c
C ₇₂	L ₁₂	14.7	13.0 b	13.5 c	3.21 bc	5.89 ab
	DMSH		1.15	0.95	0.79	1.23
G ₂₁		14.7	13.0 B	13.9 B	3.90 B	6.08 BC
C ₈₁	L ₁₃	14.7	13	13.9	3.9	6.08
G ₃₀		—	12.4 C	12.5 D	4.49 A	8.18 A
	Salamanca	11.5	12.6 ab	12.5 a	4.20 a	6.61 b
	Temporalera		12.7 a	12.7 a	4.20 a	10.53 a
	Romoga		12.0 b	12.3 b	5.06 a	7.40 b
	DMSH		0.7	0.2	1.44	1.39
DMSH			0.52	0.43	0.55	0.81

G_{jk} = Grupo *j* del nivel de irradiación *k*.

C_{ik} = Compuesto *i* del nivel de irradiación *k*, de donde provinieron las líneas.

L_m = Línea *m*.

Medias con la misma letra mayúscula en la misma columna son iguales (Tukey, 0.05).

Medias con la misma letra minúscula en la misma columna del mismo grupo G_{jk} son iguales (Tukey, 0.05).

* Sin comparación de media (incluida sólo como referencia).

que la planta cuya espiga fue seleccionada en el ciclo 1997A, tenía una alta homocigosis.

El rendimiento y el contenido de proteína tuvieron una relación similar a la observada por Bhatia (1975), Löffler *et al.* (1982, 1983, 1985) y Delzer *et al.* (1995), ya que la correlación (*r*) entre los dos caracteres fue negativa y estadísticamente significativa, con valor de -0.59 en las líneas irradiadas en ambos ciclos de evaluación sin incluir los testigos, y de -0.68 en el primer ciclo y -0.65 en el segundo, cuando se incluyeron los testigos. Tal parece que es difícil obtener una línea de alta proteína y rendimiento, pues las tres líneas de más proteína rindieron menos que la variedad original 'Salamanca', y ésta

rindió menos que las otras dos variedades testigo, por haber sido evaluada en un área diferente a la propia de su adaptación (El Bajío).

La selección permitió mantener la densidad del grano ante el aumento del tamaño de éste, de lo contrario el producto final serían granos de gran tamaño y baja densidad, como se ha observado que ocurre generalmente. Esto último fue la razón por la que se incluyó la selección para densidad. Con el aumento del tamaño de grano y el mantenimiento de la densidad, se obtuvo el aumento de peso del mismo.

El aumento del volumen y peso del grano con la selección para mayor tamaño y densidad del mis-

Tabla 8. Medias de volumen, peso y densidad de grano por grupos y líneas de cada grupo. Montecillo, Edo. Méx. Ciclos 1998B y 1999A.

Table 8. Averages of volume, weight and density of grain per groups and lines of each group. Montecillo, Edo. Méx. Cycles 1998B and 1999A.

Grupos y compuestos	Líneas	Volumen (cm ³)		Peso (g)		Densidad (g cm ⁻³)	
		1998B	1999A	1998B	1999A	1998B	1999A
G ₁₁		9.87 A	15.67 A	11.79 AB	18.74 A	1.19 A	1.20 A
C ₁₁	L ₁	10.25 a	16.00 a	12.58 a	19.11 a	1.23 a	1.19 a
C ₂₁	L ₂	9.75 a	15.50 a	11.37 a	18.43 b	1.17 a	1.19 a
C ₇₁	L ₃	9.62 a	15.50 a	11.41 a	18.68 ab	1.19 a	1.20 a
	DMSH	1.65	0.58	1.7	0.68	0.11	0.04
G ₁₂		9.10 A	14.59 B	10.93 B	17.49 B	1.23 A	1.20 A
C ₁₂	L ₄	8.50 b	13.70 ef	10.42 c	16.60 d	1.23 a	1.21 a
C ₁₂	L ₅	8.25 b	14.30 cde	9.86 c	16.63 d	1.19 a	1.16 a
C ₁₂	L ₆	8.25 b	14.00 de	10.01 c	17.15 cd	1.21 a	1.23 a
C ₁₂	L ₇	9.25 ab	14.30 cde	11.03 bc	16.76 cd	1.20 a	1.17 a
C ₃₂	L ₈	8.50 b	12.70 f	10.16 c	15.49 e	1.19 a	1.22 a
C ₃₂	L ₉	9.12 b	15.10 bc	10.99 bc	18.40 b	1.20 a	1.22 a
C ₃₂	L ₁₀	10.00 ab	14.80 cd	12.51 ab	17.82 bc	1.25 a	1.20 a
C ₆₂	L ₁₁	11.00 a	16.40 a	13.27 a	19.62 a	1.21 a	1.20 a
C ₇₂	L ₁₂	9.00 b	16.00 ab	10.16 c	18.91 ab	1.38 a	1.18
	DMSH	1.83	1.09	1.82	1.11	0.34	0.08
G ₂₁		9.75 A	13.50 C	11.93 A	16.83 B	1.23 A	1.24 A
C ₈₁	L ₁₃	9.75	13.5	11.93	16.83	1.23	1.24
G ₃₀		7.58 B	12.17 D	9.33 C	14.94 C	1.23 A	1.23 A
	Salamanca	7.50 a	13.30 a	9.33 ab	16.25 a	1.25 a	1.23 a
	Temporalera	8.37 a	13.30 a	10.17 a	16.78 a	1.22 a	1.26 a
	Romoga	6.87 a	9.90 b	8.49 b	11.79 b	1.24 a	1.19 a
	DMSH	1.72	1.52	1.35	0.73	0.13	0.13
DMSH		0.94	0.72	0.92	0.66	0.14	0.05

G_{jk} = Grupo *j* del nivel de irradiación *k*; C_{ik} = Compuesto *i* del nivel de irradiación *k* de donde provinieron las líneas; L_m = Línea *m*; medias con la misma letra mayúscula en la misma columna son iguales (Tukey, 0.05); medias con la misma letra minúscula en la misma columna del mismo grupo G_{jk} son iguales (Tukey, 0.05).

mo, en la que la densidad se mantuvo sin gran cambio, indica que en el grano hubo aumento de nueva materia seca, responsable del incremento de proteína.

Con la irradiación recurrente de rayos gamma ⁶⁰Co se indujo mutaciones en la variedad 'Salamanca', con alta homocigosis y homogeneidad, que ampliaron la variabilidad genética. Esta hizo posible que con la selección para mayor tamaño y densidad de grano, se aumentara el volumen del mismo, y aunque no se modificó su densidad, la selección

para los dos caracteres se reflejó en el aumento de peso del grano e, indirectamente, en el contenido de proteína del mismo, cuya variación puede ser de tipo cuantitativo, porque su distribución de frecuencias tendió a la normal. El incremento de proteína fue mayor en el material más irradiado por haberse inducido más mutaciones. El aumento de proteína fue inverso al de rendimiento de grano y las líneas que superaron a la variedad original en más de 20 % de proteína fueron de bajo rendimiento.

LITERATURA CITADA

Ahloowalia BS, Maluszynky M, Nichterlein K (2004) Global impact of mutation-derived varieties. *Euphytica* 135: 187-204.

- Anónimo (2004) Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) 2004. Trigo. In: Informe Quincenal Mercado de Granos. 184(4): 1-12.
- Bhatia CR (1975) Criteria for early generation selection in wheat breeding programs for improving protein productivity. *Euphytica* 24: 789-794.
- Carrera VJA, Cervantes ST (2007) Comportamiento de cruas de maíz obtenidas por irradiación y selección. *Rev. Fitotec. Mex.* 30(2): 173-180.
- Cervantes ST, Cervantes MCT (1992) Selección para mayor tamaño de espiga en compuestos irradiados de trigo. *Agrociencia* 26(2): 19-30.
- Cervantes ST, Cervantes MCT (1996) Selección de líneas de trigo de alto rendimiento a partir de compuestos irradiados. *Agrociencia* 30(4): 509-514.
- Crowley CP, Jones, Byrne O (1991) Use of grain characters as indirect selection criteria in the mutation breeding of cereals. In: Proc. International Symposium. Viena, 18-22 June 1990. IAEA/FAO Viena. 2: 65-71.
- Delzer BW, Busch RH, Hareland GA (1995) Recurrent selection for grain protein in hard red spring wheat. *Crop Science* 35(3): 730-735.
- Duffus C, Slaughter C (1980) *Las Semillas y sus Usos*. AGT Editor. S. A. México, D.F. 54 pp.
- Falconer DS (1960) *Introduction to Quantitative Genetics*. The Ronald Press Co., New York. 105-111 pp.
- Hanson H, Borlaug NE, Anderson RG (1982) *Wheat in the Third World*. Westview Press, Boulder, Colorado. 29-42 pp.
- Kar GN, Chakrabarti SN, Prasad AB (1978) Induction of useful mutations in bread wheat. In: Proc. Fifth International Wheat Genetics Symposium. Ramanujam, S. (ed.). India, Feb. 23-28, 1978. 1: 503-509.
- Kumar D, Chauhan RPS, Singh RV (1981) Salt tolerance of some induced mutants of 'HD 2009' wheat. *Indian J. Agric. Sci.* 51(7): 475-479.
- Loffler CM, Busch RH (1982) Selection for grain protein, grain yield and nitrogen partitioning efficiency in hard red spring wheat. *Crop Science* 22(3): 591-595.
- Loffler CM, Busch RH, Wiersma JV (1983) Recurrent selection for grain protein percentage in hard red spring wheat. *Crop Science* 23(6): 1097-1101.
- Loffler CM, Rauch TL, Busch RH (1985) Grain and plant protein relationships in hard red spring wheat. *Crop Science* 25(3): 521-524.
- McNeal FH, McGuire CF, Berg MA (1978) Recurrent selection for grain protein content in spring wheat. *Crop Science* 18(5): 779-782.
- Parodi PC, Nebreda IM (1976) Mutation breeding to increase protein content in wheat. *Agronomy Abstracts*, 1976 Annual Meetings of Amer. Soc. of Agr., Crop Sci. Soc. of Amer. And Soil Sci. Soc. of Amer. Houston, Texas. 111 p.
- Partida RL, Cervantes ST, Salazar ZA, Castillo MA, Velázquez ATJ (2007) Selección para contenido de proteína y rendimiento de grano en trigo irradiado recurrentemente. *Interciencia* 32(10): 686-691.
- Ramírez CJJ, Cervantes ST, Villaseñor MHE, López CC (2003) Selección para componentes de rendimiento de grano en triticale irradiado. *Agrociencia* 37(6): 595-603.
- Randhawa AS, Gill KS (1978) Effectiveness of selection under different mating systems for the improvement of protein content in wheat (*Triticum aestivum* L. em Thell). *Theoretical and Applied Genetics* 53(3): 129-134.

SAS Institute (1985) SAS User's Guide: Basics, Version 5 Edition. SAS Institute Inc., Cary, N. C. 1181-1191 pp.

Shapiro SS, Wilk MB (1965) An analysis of variance test for normality. *Biometrika* 52(3-4): 591-611.