

EFFECTO DE DIFERENTES SUBUNIDADES DE GLUTENINAS-APM SOBRE LA CALIDAD PANADERA EN TRIGOS HARINEROS MEXICANOS

EFFECT OF DIFFERENT HMW-GLUTENIN SUBUNITS ON BAKING QUALITY OF MEXICAN BREAD WHEATS

Micaela De la O Olán¹, Eduardo Espitia Rangel^{*2}, José D. Molina Galán¹, Roberto J. Peña Bautista³, Amalio Santacruz Varela¹ y Héctor E. Villaseñor Mir²

¹Orientación en Genética, Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados. Km. 36.5 Carr. México-Texcoco. 56230, Montecillo, Edo. de México.

²Programa de Trigo, Campo Experimental Valle de México, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Apdo. Postal 10, 56230, Chapingo, Edo. de México. Tel. 01 (595) 954-2477, Fax 01(595) 954-6528.. ³Programa de Trigo, Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. Apdo. Postal 6-641. 06600, México, D. F.

*Autor para correspondencia (espitia.eduardo@inifap.gob.mx)

RESUMEN

Con el fin de determinar la influencia de diferentes subunidades de gluteninas de alto peso molecular (APM) sobre las propiedades de panificación, se analizó un grupo de 69 líneas de trigo (*Triticum aestivum* L.) derivadas de la cruz Rebeca F2000 por Salamanca S75 por descendencia de una sola semilla de F₂ a F₆. Las líneas fueron sembradas en Roque, Gto. (Otoño-Invierno, 2003/2004), aplicando riegos normal y restringido. Se evaluó volumen de pan, textura de la miga y contenido de proteína. Los análisis se realizaron agrupando los genotipos por dureza del grano. En trigos suaves la mejor combinación fue 1, 7+8, 2+12 con valores más altos en volumen de pan, textura de miga regular y alto contenido de proteína; mientras que las líneas con las combinaciones 1, 7+8, 5+10 y 2*, 17+18, 2+12 produjeron los valores más bajos para dichas variables. En trigos semisuaves la combinación 2*, 17+18, 2+12 produjo una textura de miga buena y el mayor volumen de pan, pero en contenido de proteína la mejor combinación de las subunidades de Gluteninas-APM fue 1, 17+18, 2+12. En las líneas semi-duras no se encontraron diferencias entre combinaciones alélicas. En el genoma A en trigos semiduros la subunidad 2* presentó los valores más altos para volumen de pan, textura de miga y contenido de proteína en comparación con la subunidad 1. En el genoma B para trigos suaves, semisuaves y semiduros las dos subunidades alélicas de Gluteninas-APM, 17+18 y 7+8, tuvieron efectos similares sobre la calidad de panificación y contenido de proteína. En el genoma D de trigos semisuaves la subunidad 2+12 se caracterizó por presentar los valores más altos de textura de miga mientras que la subunidad 5+10 presentó los valores más bajos. Se concluye que las propiedades de panificación son influenciadas diferencialmente por los alelos de gluteninas-APM presentes en trigos mexicanos.

Palabras clave: *Triticum aestivum*, gluteninas de alto peso molecular, dureza de grano, calidad de trigo, propiedades de panificación.

SUMMARY

In order to determine the influence of different high molecular weight (HMW) glutenin subunits on baking properties and protein content, a set of 69 wheat (*Triticum aestivum* L.) F_{2:6} lines derived by

single seed descent from the cross Rebeca F2000 by Salamanca S75 was analyzed. Lines were grown at Roque, Gto. (Fall-Winter, 2003-2004) under normal and restricted irrigation regime. Bread volume, crumb texture and protein content were evaluated. Analyses were performed grouping wheat lines by grain hardness. In soft lines the best combination was 1, 7+8, 2+12 with higher values of bread volume, intermediate crumb texture and high protein content; whereas lines with combinations 1, 7+8, 5+10 and 2*, 17+18, 2+12 produced the lowest values for those traits. In semi-soft wheats combination 2*, 17+18, 2+12 resulted in good crumb texture and the largest bread volume, but for protein content the best combination of HMW-Glutenins was 1, 17+18, 2+12. In semi-hard lines no differences among allelic combinations were found. In the A-genome for semi-hard wheats subunit 2* presented the highest values for bread volume, crumb texture and protein content in comparison to subunit 1. In the B-genome for soft, semi-soft and semi-hard wheats two allelic subunits, 17+18 and 7+8 had the same effects on baking quality and protein content. In semi-soft wheats subunit 2+12 of the D-genome presented the highest values of crumb texture, whereas subunit 5+10 showed the lowest value. It is concluded that baking properties are differentially influenced by the HMW glutenin alleles present in Mexican wheats.

Index words: *Triticum aestivum*, high molecular weight glutenins, kernel hardness, wheat quality, baking properties.

INTRODUCCIÓN

Entre las proteínas del trigo (*Triticum aestivum* L.) que forman el gluten (gluteninas y gliadinas) que determina la calidad de panificación, las gluteninas de alto peso molecular tienen una importancia fundamental porque son las que mayor influencia ejercen sobre la fuerza del gluten. Las gluteninas se separan en dos grupos distintos; las subunidades de bajo peso molecular y las de alto peso molecular. Las subunidades de alto peso molecular (APM) son codificadas por genes en tres *loci* genéticamente diferentes,

Glu-A1, *Glu-B1* y *Glu-D1*, que se localizan en el brazo largo de los cromosomas 1A, 1B y 1D, respectivamente. Al grupo complejo de genes que codifican a estas gluteninas se les denomina *loci Glu-1* (Payne *et al.* 1984; Southan y MacRitchie, 1999).

En los programas de mejoramiento genético, el conocimiento de la composición de gluteninas de APM es de importancia porque entre las variaciones alélicas de un locus, algunas de ellas contribuyen positivamente mientras otras lo hacen negativamente. Gupta *et al.* (1990) y Peña (1997) al caracterizar los efectos que tienen las subunidades de glutenina de APM en el potencial de panificación de los trigos, encontraron que genotipos con subunidades de gluteninas de APM 17+18, ó 7+8 en el genoma B y 5+10 en el genoma D tienen una mejor calidad de gluten para panificación que las variedades con subunidades de gluteninas de APM 7+9 en *Glu-B1* y 2+12 ó 3+12 en *Glu-D1*. Para el mejoramiento de la calidad de panificación, las características deseables de los progenitores son grano duro o semi-duro, alto contenido de proteína, gluten medio fuerte a fuerte y extensible, y combinación de gluteninas-APM deseables 1, 2* en *Glu-A1*, 7+8, 17+18, 13+16, 7+9 en *Glu-B1* y 5+10 en *Glu-D1* (Payne *et al.*, 1984; Peña, 2002).

La dureza del grano es un factor cualitativo controlado por uno o quizás dos genes de efectos mayores, y varios genes de efectos menores, y puede ser manipulada genéticamente para obtener el tipo deseado de acuerdo con la demanda. La dureza influye en el tiempo de molienda, el consumo de energía y en la calidad de las harinas obtenidas (Yamazaki y Donelson, 1983). En el endospermo duro se encuentra la proteína, el almidón y otros componentes del grano más íntimamente unidos; debido a esto, los trigos con endospermo duro requieren mayor consumo de energía para reducir las partículas de harina a los tamaños deseados, por lo que se producen mayores niveles de almidón fracturado durante la molienda. Un nivel alto de almidón dañado está relacionado con una alta absorción de agua y, por consecuencia, con la retención de la frescura en el producto final (textura de la miga) (Miller *et al.*, 1982). El trigo harinero se clasifica por su textura del endospermo en duro, semi-duro, semi-suave y suave (Villaseñor y Espitia, 2000).

El propósito del presente estudio fue determinar la influencia que ejercen los diferentes alelos de gluteninas de alto peso molecular sobre las propiedades de panificación (volumen de pan y textura de la miga), de un grupo de líneas derivadas de la cruce entre los trigos mexicanos 'Rebeca F2000' (semiduro) y 'Salamanca S75' (suave), en relación con la textura de grano.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal y diseño experimental

Consistió en un grupo de 69 líneas recombinantes F₂ a F₆ desarrolladas por descendencia de una sola semilla a partir de la cruce 'Rebeca F2000' x 'Salamanca S75', y se incluyeron los dos progenitores. La variedad 'Rebeca F2000' es de buena calidad panadera y gluten fuerte (Villaseñor y Espitia, 2000) y las subunidades de gluteninas-APM que posee son: 1 en *Glu-A1*, 17+18 en *Glu-B1* y 5+10 en *Glu-D1*. Salamanca S-75 presenta excelente rendimiento harinero y por su gluten débil es útil en la preparación del pan hecho a mano o en galletería; las subunidades de gluteninas-APM que posee son: 2* en *Glu-A1*; 7+8 en *Glu-B1* y 2+12 en *Glu-D1*.

Los materiales fueron sembrados en Roque, Gto., en el ciclo otoño-invierno del 2003-2004, en dos regímenes de riego: restringido (tres riegos) y normal (cinco riegos), bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con dos repeticiones. La unidad experimental consistió de cuatro surcos de 3 m de longitud con una separación de 30 cm entre ellos.

Análisis de laboratorio

La calidad de panificación y la cantidad de proteína se determinaron en el Laboratorio de Calidad de Trigo del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) en El Batán, Méx. Muestras de 800 g de grano se molieron para la obtención de harina refinada, la cual se acondicionó mediante la adición de agua en cantidad acorde con la dureza y humedad de la misma, con base en tablas de humedad de molienda. La molienda se hizo en un molino Brabender Quadramat Senior (C.W. Brabender OHG, Germany).

La dureza del grano varía de blanda (o suave) a dura. Un factor que determina mayormente la dureza del grano es la intensidad de adhesión que existe entre la matriz de proteína en el endospermo y las proteínas (puroindolinas) de la membrana que cubren el gránulo de almidón. Esta intensidad de adhesión es variable, depende de la integridad de la membrana del gránulo de almidón, y se encuentra bajo control genético (Giroux y Morris, 1998). La dureza del grano puede ser representada por la resistencia del grano a ser quebrado o prensado, y por la distribución de tamaño de partícula de la harina resultante de su molienda (índice de tamaño de partícula). El porcentaje de dureza se estimó en harina integral mediante análisis por reflectancia en el espectro infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés) con un espectrómetro Infralyzer 300 (Technicon, N. Y., EE. UU.) calibrado por el método

39-70A (AACC, 1995), con base en el índice de tamaño de partícula (Método 55-30; AACC, 1995), en el cual a mayor proporción de partículas finas (%) corresponde a una mayor suavidad del grano. Con los datos obtenidos se hizo una clasificación de acuerdo con valores obtenidos en el NIR, en: duro <49, semi-duro 50-59, semi-suave 60-62 y suave >62. El contenido de proteína, expresado en g de proteína por kg de grano (g kg^{-1}), se estimó mediante análisis por reflectancia en el espectro infrarrojo cercano (NIR).

En el análisis de las propiedades de panificación se incluyeron las variables: volumen de pan (cm^3), que se evaluó mediante el método de masa directa (método 10-09, AACC, 1995) sin adición de oxidantes u otro aditivo que pudiera interferir con la expresión de las características reológicas naturales de las proteínas del gluten de los diversos genotipos. Se optimizaron la absorción de agua (consistencia adecuada de masa) y el tiempo de desarrollo de masa (masa tersa, cohesiva y suave) con base en resultados previos obtenidos al determinar características de desarrollo de masa en el Mixógrafo (información no presentada) en condiciones controladas de temperatura y humedad relativa. Para ello se siguió el procedimiento siguiente: se pesaron 100 g de harina refinada con base en la humedad de la harina; enseguida se colocaron 3 g de leche en polvo y 3 g de grasa vegetal; se adicionaron 25 mL de una solución de levadura a 12 %, 25 mL de una solución de azúcar-sal (20 y 4 %, respectivamente) y la cantidad de agua destilada a añadir se calculó de acuerdo con la absorción y se corrigió con la dureza de grano. Después del mezclado de los ingredientes se obtuvo una masa bien desarrollada, homogénea y cohesiva. La etapa de fermentación duró 3 h y 55 min; durante este tiempo se realizaron dos desgasificaciones (presionando la masa), con la finalidad de que las levaduras aprovecharan al máximo los azúcares y que las celdillas se distribuyeran de manera uniforme y se mantuvieran pequeñas durante la etapa de fermentación. Durante la etapa de fermentación se realizó la formación de un cilindro, el cual se colocó dentro de un molde. El horneado se realizó a 220 °C durante 25 min. El fermentador se mantuvo a 30 °C con humedad relativa de 95 %. Finalmente, los panes se retiraron del molde, se pesaron y se les determinó el volumen mediante un volúmetro por desplazamiento de semillas de colza (*Brassica sp.*).

Posteriormente se evaluó la textura de la miga mediante una escala de 1=muy pobre, 2=pobre, 3=regular, 4=buena, 5=muy buena y 6=excelente (Peña, 2002).

La identificación de gluteninas de alto peso molecular se hizo por electroforesis en gel SDS-Poliacrilamida (SDS-PAGE) (Peña, 2002). Para la extracción de las proteínas se

colocaron 40 mg de harina integral en un tubo eppendorf durante 20 min a temperatura ambiente (20-22 °C), con 600 μL de solución amortiguadora HCl 62.5 mM (pH 6.8) que contenía 12 % (p/v) de glicerol, 2 % (p/v) de dodecil sulfato sódico, 0.003 % (p/v) de azul de bromofenol y 5 % de 2-mercaptoetanol. Después de la extracción, las muestras se centrifugaron por 5 min a 10000 rpm (aproximadamente 8000 g). Se utilizaron 4 μL de extracto de proteína para la separación de las mismas sobre un gel de 18 cm de acrilamida al 10%. El corrimiento electroforético se efectuó con 11 mA por 16.5 h a 15 °C. Para revelar las bandas de proteína los geles permanecieron inmersos por 8 h en solución de tinción que contenía solución acuosa a 0.13 % de cumasina azul brillante R250, alcohol butílico y ácido acético (53:40:7, v/v). La destinción del gel se hizo con agua durante la noche. Las subunidades de alto peso molecular fueron identificadas de acuerdo con la nomenclatura de Payne *et al.* (1984), al usar como referencia el patrón de bandeado de las variedades 'Chinese Spring', 'Opata', 'Pitic' y 'Pavón'.

Análisis estadístico

Se hizo un análisis de varianza en cada clase de dureza para las variables estudiadas. Posteriormente, la fuente de variación Genotipos se agrupó y se realizó un análisis de varianza adicional para obtener los cuadrados medios respectivos para Combinaciones, Genoma A, Genoma B y Genoma D, en cada tipo de dureza. La comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey a una probabilidad de 0.05, mediante el procedimiento GLM de SAS (SAS Institute, 1994).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dentro de los tipos de trigos suaves se encontraron efectos significativos de los niveles de humedad, en dureza del grano, textura de miga y contenido de proteína (Cuadro 1). Ello indica que la humedad disponible durante el desarrollo del cultivo influye en las variables de panificación y cantidad de proteína del trigo. Espitia *et al.* (2003) también observaron que las variables de calidad están altamente influenciadas por efectos ambientales. Para genotipos, las diferencias fueron altamente significativas dentro de los trigos suaves para las tres variables; sin embargo, la interacción niveles de humedad x genotipos, resultó ser no significativa. Al analizar el efecto de las combinaciones de gluteninas de alto peso molecular en el volumen de pan, textura de miga y contenido de proteína, se detectaron diferencias significativas, lo que indica que las diferentes combinaciones alélicas de gluteninas presentes en las líneas ejercen un efecto diferencial en las variables de panificación y contenido de proteína. Sin embargo, dentro de cada genoma no hubo diferencias significativas en las

propiedades de panificación. En lo que se refiere a contenido de proteína, únicamente hubo diferencias significativas en el genoma B dentro del grupo de trigos de tipo suave.

En los trigos semisuaves no se encontró diferencia alguna en niveles de humedad, ni entre genotipos, ni en la interacción niveles de humedad x genotipo, para las variables de panificación. Sólo hubo diferencia significativa para la textura de miga. En los genomas A y B no se encontraron diferencias significativas para volumen de pan, textura de la miga y contenido de proteína, mientras que en el genoma D se encontraron diferencias significativas para la textura de la miga.

En los trigos de tipo semiduro, los niveles de humedad tuvieron efecto significativo únicamente en la textura de miga; sin embargo, en el factor genotipo, las diferencias fueron significativas para las tres variables. La combinación, genoma B y genoma D no tuvieron efecto en las variables de panificación. En contenido de proteína dentro de combinaciones, las diferencias resultaron significativas, lo que implica que la constitución genética de cada genotipo en gluteninas-APM tiene relación con la cantidad de proteína. En el genoma A las diferencias resultaron ser significativas para las tres variables bajo estudio.

Las diferencias encontradas en cada tipo de dureza del grano indican que aunque un trigo posea la misma dureza, su constitución genética es diferente y determina en gran parte la calidad de panificación, y por ello es susceptible de ser manipulada mediante el mejoramiento genético.

En cuanto a la comparación de medias para las diferentes combinaciones alélicas encontradas en las líneas de la cruz ‘Rebeca F2000’ x ‘Salamanca S75’ y de sus dos progenitores, para cada tipo de dureza, se encontró que en los trigos suaves la combinación 1, 7+8, 2+12 presentó los valores más altos de volumen de pan, que superaron a

Rebeca (1, 17+18, 5+10), el mejor progenitor (Cuadro 2). En las combinaciones 1, 17+18, 2+12; 2*, 17+18, 5+10 y 2*, 7+8, 2+12 se obtuvieron valores intermedios en volumen de pan; los valores más bajos ocurrieron en líneas que presentaron la combinación 1, 7+8, 5+10 y 2*, 17+18, 2+12. Dentro de los trigos de textura suave no se encontraron líneas con la combinación 2*, 7+8, 5+10. En la textura de miga las líneas con la combinación 1, 7+8, 2+12, presentaron una miga regular, y superaron al progenitor ‘Rebeca F2000’ cuya combinación es 1, 17+18, 5+10 y corresponde a una textura de miga pobre a regular. En las combinaciones 1, 17+18, 5+10; 1, 17+18, 2+12 y 2*, 7+8, 2+12 no hubo diferencias para textura de miga, aunque en las combinaciones 1, 7+8, 5+10; 2*, 17+18, 5+10 y 2*, 17+18, 2+12 la textura de miga fue pobre. Para la cantidad de proteína las mejores combinaciones fueron 1, 17+18, 2+12; 2*, 17+18, 5+10 y 2*, 7+8, 2+12, con los valores más altos, seguidas por las combinaciones 1, 7+8, 2+12 y 2*, 17+18, 2+12, y el menor valor para la combinación 1, 17+18, 5+10, todo ello en trigos suaves.

En trigos semisuaves no se presentaron líneas con la combinación 2*, 7+8, 2+12 de ‘Salamanca’. Para el volumen de pan no hubo diferencia en todas las combinaciones. En textura de miga la mejor combinación tendió a ser 2*, 17+18, 2+12, que fue buena, pero sin diferencias con las combinaciones 1, 17+18, 5+10; 1, 17+18, 2+12 y 1, 7+8, 2+12, que se caracterizaron por tener una textura de miga regular. Las combinaciones 1, 7+8, 5+10; 2*, 17+18, 5+10 y 2*, 7+8, 5+10 presentaron una textura de miga pobre, y sin diferencias estadísticas entre las combinaciones 1, 17+18, 5+10; 1, 17+18, 2+12 y 1, 7+8, 2+12. En los trigos semisuaves se observó claramente que las líneas que presentaron la subunidad alélica 5+10 fueron las de valores menores en textura de miga. En contenido de proteína las mejores combinaciones fueron 1, 17+18, 2+12; 2*, 17+18, 2+12; 2*, 17+18, 5+10; 1,

Cuadro 1. Cuadros medios por dureza de grano para variables de panificación y contenido de proteína en trigos harineros. Roque, Gto., otoño-invierno 2003-2004.

Fuente de variación	Suaves			Semisuaves			Semiduros					
	gl	VOPA	TEXMI	PROT	gl	VOPA	TEXMI	PROT	gl	VOPA	TEXMI	PROT
Nivel de humedad (NH)	1	7801 *	1.05 *	187.2*	1	840 ns	0.87 ns	6.2 ns	1	2944 ns	1.5 *	0.61 ns
Rep/NH	2	3650	0.25	103.5	2	6920	0.53	1.07	2	2076	0.05	5.0
Genotipos	39	11717 **	0.75 **	150 **	16	5037 ns	0.35 ns	4.6 ns	32	10178 **	1.8 **	10.5 **
NH x genotipos	36	1694 ns	0.17 ns	1.8 ns	7	1991 ns	0.14 ns	1.9 ns	24	824 ns	0.23 ns	1.8 ns
Combinación	6	13444 **	0.84 *	20.8 **	6	5772 ns	0.70 *	7.0 ns	7	7286 ns	1.3 ns	14.4 **
Genoma A	1	281 ns	0.36 ns	0.14 ns	1	1010 ns	0.36 ns	11.7 ns	1	35537 **	5.7 **	31.0 *
Genoma B	1	961 ns	0.37 ns	30.2 *	1	6711 ns	0.14 ns	67114 ns	1	177.9 ns	0.07 ns	1.4 ns
Genoma D	1	1334 ns	0.14 ns	2.4 ns	1	1211 ns	1.2 *	6.7 ns	1	558.2 ns	0.0 ns	3.6 ns
Error	72	1888	0.19	27.1	6	2576	0.32	20.1	40	1905	0.23	19.5

*, **, ns: Diferencias significativas, altamente significativas y no significativas respectivamente; gl=grados de libertad. VOPA=volumen de pan; TEXMI= textura de la miga; PROT= contenido de proteína.

Cuadro 2. Medias por combinación de alelos de gluteninas de alto peso molecular por dureza de grano para variables de panificación y contenido de proteína de trigos harineros, Roque, Gto., otoño-invierno 2003-2004.

Dureza	Genoma	Combinaciones							
		1	2	3	4	5	6	7	8
	A (alelos)	1	1	1	1	2*	2*	2*	2*
	B (alelos)	17+18	17+18	7+8	7+8	17+18	17+18	7+8	7+8
	D (alelos)	5+10	2+12	5+10	2+12	5+10	2+12	5+10	2+12
Suaves	Volumen de pan (cm ³)	656.2 ab	628.9 ab	607.2 b	680.4 a	643.1 ab	605.9 b	-	645.0 ab
	Textura de miga (1-6)	2.6 ab	2.3 ab	2.3 b	2.9 a	2.3 b	2.3 b	-	2.5 ab
	Proteína (g kg ⁻¹)	99.3 b	108.2 a	107.4 a	104.5 ab	106.6 a	103.0 ab	-	107.6 a
	n	16	19	31	12	16	26	-	31
Semisuaves	Volumen de pan (cm ³)	685.0 a†	725.0 a	617.7 a	613.3 a	619.4 a	730.0 a	608.0 a	-
	Textura de miga (1-6)	2.8 ab	3.0 ab	2.4 b	2.6 ab	2.3 b	4.0 a	2.0 b	-
	Proteína (g kg ⁻¹)	101.2 b	118.0 a	100.1 b	103.6 ab	106.2 ab	109.0 ab	102.4 ab	-
	n	5	1	9	3	9	1	5	-
Semiduros	Volumen de pan (cm ³)	706.8 a	751.2 a	698.7 a	718.3 a	748.6 a	744.4 a	755.3 a	710.0 a
	Textura de miga (1-6)	3.0 a	3.7 a	2.9 a	3.0 a	3.3 a	3.6 a	3.6 a	3.0 a
	Proteína (g kg ⁻¹)	101.4 ab	111.0 a	101.0 ab	106.0 ab	110.5 a	106.4 ab	106.8 ab	97.0 b
	n	15	4	12	21	11	9	27	1

† Valores con la misma letra dentro de filas son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05); n: Número de genotipos de cada tipo de dureza.

7+8, 2+12 y 2*, 7+8, 5+10. La menor cantidad de proteína se presentó en las combinaciones 1, 17+18, 5+10 y 1, 7+8, 5+10. Es decir, la calidad de panificación depende conjuntamente de la clase de dureza y de la subunidad alélica presente.

Para los trigos semiduros, en todas las combinaciones alélicas no se detectaron diferencias estadísticas para volumen de pan y textura de miga. En el contenido de proteína las mejores combinaciones fueron 1, 17+18, 2+12; 2*, 17+18, 5+10; 2*, 7+8, 5+10, 2*, 17+18, 2+12, 1, 7+8, 2+12, 1, 7+8, 5+10 y 1, 17+18, 5+10, entre las cuales no hubo diferencias significativas. El menor valor ocurrió en la combinación 2*, 7+8, 2+12, valor que puede estar sensiblemente sesgado por efecto de tamaño de muestra, ya que solamente se encontró un genotipo con esta combinación alélica.

En cuanto a la comparación de genotipos en cada clase de dureza, en función de las variaciones alélicas del genoma A, se encontró que en trigos suaves y semisuaves no hubo diferencias entre las dos subunidades alélicas, mientras que en trigos semiduros sí las hubo para las tres variables (Cuadro 3), ya que la subunidad 2* dio los valores más altos en volumen de pan, textura de miga y cantidad de proteína. Por tanto, según la dureza de un trigo el comportamiento de las subunidades alélicas es diferente. Pogna *et al.* (1992) mencionan que los alelos 1 y 2* en el genoma A tienen un efecto positivo en la calidad de panificación, lo cual concuerda con algunos resultados obtenidos en el presente estudio, pues en trigos semiduros se observó un efecto diferencial entre alelos. Por su parte, Trethowan *et al.* (2001) observaron una mayor frecuencia de la subuni-

dad 2* que de la subunidad 1 en trigos con alta fuerza y volumen de pan.

Cuadro 3. Medias por alelo en el Genoma A por dureza de grano para variables de panificación y contenido de proteína de trigos harineros. Roque, Gto., otoño-invierno 2003-2004.

Dureza	Variables de panificación	Alelo	
		1	2*
Suaves	Volumen de pan (cm ³)	633.8 a†	630.6 a
	Textura de miga	2.5 a	2.3 a
	Proteína (g kg ⁻¹)	105.5 a	105.7 a
	n	78	73
Semisuaves	Volumen de pan (cm ³)	641.6 a	623.0 a
	Textura de miga	2.6 a	2.3 a
	Proteína (g kg ⁻¹)	102.0 a	105.1 a
	n	18	15
Semiduros	Volumen de pan (cm ³)	713.0 b	750.8 a
	Textura de miga	3.0 b	3.5 a
	Proteína (g kg ⁻¹)	103.9 b	107.4 a
	n	52	48

†:Valores con la misma letra dentro de filas son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05); n: Número de genotipos de cada tipo de dureza. Textura de miga, escala de 1-6.

En calidad de panificación de los genotipos clasificados por dureza, en función de las subunidades alélicas del genoma B, las subunidades presentes en las líneas evaluadas de la cruz ‘Rebeca F2000’ x ‘Salamanca S75’ fueron 17+18 y 7+8 (Cuadro 4). En trigos suaves no hubo diferencias entre subunidades para volumen y textura de miga; en contenido de proteína sí hubo diferencias significativas, y el mayor valor correspondió a la subunidad 7+8. En las líneas semisuaves tampoco hubo diferencias estadísticas entre subunidades para volumen de pan y textura de miga; en cantidad de proteína de trigos semisuaves, el mayor contenido fue con la subunidad 17+18. En trigos

semiduros no hubo diferencias estadísticas entre las dos subunidades alélicas, para ninguna de las variables estudiadas.

Cuadro 4. Medias por alelo en el Genoma B por dureza de grano para variables de panificación y contenido de proteína de trigos harineros. Roque, Gto., otoño-invierno 2003-2004.

Dureza	Variables de panificación	Alelo	
		7+8	17+18
Suaves	Volumen de pan (cm ³)	634.9 a†	629.8 a
	Textura de miga	2.5 a	2.4 a
	Proteína (g kg ⁻¹)	107.0 a	104.2 b
	n	74	77
Semisuaves	Volumen de pan (cm ³)	614.1 a	653.4 a
	Textura de miga	2.3 a	2.6 a
	Proteína (g kg ⁻¹)	101.4 b	105.5 a
	n	17	16
Semiduros	Volumen de pan (cm ³)	730.7 a	731.8 a
	Textura de miga	3.2 a	3.3 a
	Proteína (g kg ⁻¹)	105.2 a	106.1 a
	n	61	39

†: Valores con la misma letra dentro de filas son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05); n: Número de genotipos de cada tipo de dureza. Textura de miga escala de 1-6.

Cuadro 5. Medias por alelo en el Genoma D por dureza de grano para variables de panificación y contenido de proteína de trigos harineros. Roque, Gto., otoño-invierno 2003-2004.

Dureza	Variables de panificación	Alelo	
		5+10	2+12
Suaves	Volumen de pan (cm ³)	628.8 a†	634.8 a
	Textura de miga (1-6)	2.4 a	2.4 a
	Proteína (g kg ⁻¹)	105.1 a	105.9 a
	n	63	88
Semisuaves	Volumen de pan (cm ³)	628.5 a	659.0 a
	Textura de miga (1-6)	2.3 b	3.0 a
	Proteína (g kg ⁻¹)	102.6 a	107.6 a
	n	28	5
Semiduros	Volumen de pan (cm ³)	732.5 a	728.5 a
	Textura de miga (1-6)	3.30 a	3.31 a
	Proteína (g kg ⁻¹)	105.1 a	106.4 a
	n	65	36

†: Valores con la misma letra dentro de filas son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05); n: Número de genotipos de cada tipo de dureza. Textura de miga escala de 1-6.

Al comparar los tipos de dureza en función de las subunidades presentes en el genoma D, se encontró que en trigos suaves no hubo diferencias estadísticas en volumen de pan, textura de miga y contenido de proteína (Cuadro 5). En trigos semisuaves tampoco hubo diferencias para volumen de pan y contenido de proteína, pero sí para textura de miga puesto que la subunidad 2+12 (textura de miga regular) superó a la 5+10 (textura de miga pobre). En trigos semiduros no existió diferencia estadística entre las dos subunidades alélicas del genoma D, para las tres variables bajo estudio. Según Payne *et al.* (1984), la subunidad 5+10 contribuye con mayor fuerza de gluten que la 2+12 y otras variaciones alélicas en *Glu-D1*.

Esto ha sido confirmado con germoplasma de origen diverso (Weegles *et al.*, 1996; Trethowan *et al.*, 2001; Peña *et al.*, 2004; He *et al.*, 2005; Eagles *et al.*, 2006), cuando se utilizan poblaciones derivadas de la misma cruce en donde la única variación es la presencia de 5+10 y 2+12. Sin embargo, también se ha demostrado que la presencia de 5+10 no garantiza mejor calidad que 2+12 (Weegles *et al.*, 1996; Trethowan *et al.*, 2001), debido a que las propiedades viscoelásticas que afectan la calidad de panificación, y particularmente al volumen de pan, dependen en primer lugar de la composición de gluteninas de alto peso molecular, de gluteninas de bajo peso molecular y de gliadinas, y en segundo lugar de la interacción del complejo llamado gluten con polisacáridos y lípidos (Weegles *et al.*, 1996; He *et al.*, 2005; Eagles *et al.*, 2006). Todas estas interacciones complejas definen la capacidad de expansión de la masa para obtener un volumen de pan.

CONCLUSIONES

En trigos suaves la combinación 1, 7+8, 2+12 fue la mejor, porque se asoció con valores más altos en volumen de pan, textura de miga y contenido de proteína. Esto podría indicar que los trigos suaves generados de la cruce en estudio, tienen mejor capacidad de expansión y ganan volumen de pan cuando la fuerza del gluten no es tan alta como la que confiere la presencia de la subunidad 5+10. En trigos semisuaves no hubo diferencias entre las combinaciones para volumen de pan, pero en el contenido de proteína el mejor alelo fue 17+18. En trigos semiduros las combinaciones alélicas no dieron diferencias estadísticas para volumen de pan, textura de miga y contenido de proteína.

En el genoma A de trigos suaves, semisuaves y semiduros no hubo diferencias en características de panificación entre las subunidades 1 y 2*. En el genoma B no hubo diferencias entre las subunidades alélicas 7+8 y 17+18 sobre la calidad de panificación, en los diversos tipos de dureza; sólo se observó un efecto diferencial de los alelos en el contenido de proteína, en función de la textura del endospermo. En el genoma D de los trigos semisuaves la subunidad 2+12 presentó una textura de miga regular y la 5+10 una textura de miga pobre. Se concluye que las propiedades de panificación son influenciadas diferencialmente por los alelos de gluteninas-APM presentes en los genomas de trigos harineros mexicanos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONACYT (Proyectos 34718-B y GTO-2003-C02-11860) el financiamiento otorgado para la realización de la investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- AACC (1995) Approved Methods of the AACC. 9th edition. American Association of Cereal Chemists. St. Paul, MN, USA.
- Eagles H A, K Cane, R F Eastwood, G J Hollamby, H Kuchel, P J Martin, G B Cornish (2006) Contributions of glutenin and puroindoline genes to grain quality traits in southern Australian wheat breeding programs. *Austr. J. Agric. Res.* 57:179-186.
- Espitia R E, R Peña B, E Villaseñor M, J Huerta E, A Limón O (2003) Calidad industrial de trigos harineros mexicanos para temporal. I. Comparación de variedades y causas de la variación. *Rev. Fitotec. Mex.* 26:249-256.
- Giroux M J, C F Morris (1998) Wheat grain hardness results from highly conserved mutations in the friabilin components puroindoline a and b. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 95:6262-6266.
- Gupta R B, F. Bekes, C W Wrigley, H J Moss (1990) Prediction of wheat quality in breeding on the basis of LMW and HMW glutenin subunit composition. *In: Sixth Assembly of the Wheat Breeding Soc. of Australia.* Tamworth, NSW, Australia. pp: 217-225.
- He Z H, L Liu, X C Xia, J J Liu, R J Peña (2005) Composition of HMW and LMW glutenin subunits and their effects on dough properties, pan bread, and noodle quality of Chinese bread wheats. *Cer. Chem.* 82:345-350.
- Miller B S, S Afework, Y Pomeranz, B Bruinsma, G D Boot (1982) Measuring the hardness of wheat. *Cer. Foods World* 27:65-75.
- Payne P I, L M Holt, A J Worland A J, C N Law (1984) Wheat storage proteins: their genetics and their potential for manipulation by plant breeding. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. Serie B* 304:359-371.
- Peña R J (1997) Wheat quality for bread and baked food needs. *In: Wheat Research Needs Beyond 2000.* S Nagarajan, G Singh, B S Tyagi (eds). Narosa Publishing House, New Delhi. pp:302-312.
- Peña R J (2002) Wheat for bread and other foods. *In: Bread Wheat Improvement and Production.* B C Curtis, S S Rajaram, H Gómez Macpherson (eds). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. pp:483-542.
- Peña R J, H S González, F Cervantes (2004) Relationship between *Glu-D1/Glu-B3* allelic combinations and bread-making quality-related parameters commonly used in wheat breeding. *In: Proc. of Gluten Workshop.* S Masci, D Lafiandra (eds). Viterbo, Italy. pp:156-157.
- Pogna N E, R Rdaelli, T Dackevitch, A Curioni, A Dal Belin Peruffo (1992) Benefits from genetics and molecular biology to improve the end use properties of cereals. *In: Cereal Chemistry and Technology: a Long Past and a Bright Future.* P Feillet (ed). INRA. Montpellier, France. pp:83-93.
- SAS Institute (1994) SAS/STAT User's Guide: GLM VARCOMP. 6.04. Fourth ed. Cary, NC. pp: 891-996.
- Southan M, F MacRitchie (1999) Molecular weight distribution of wheat proteins. *Cer. Chem.* 76:827-836.
- Trethowan R M, R J Peña, M Van Ginkel (2001) Breeding for grain quality: a manipulation of gene frequency. *In: Wheat in a Global Environment.* Z Bedo, L Lang (eds). Kluwer Academic Press. The Netherlands. pp:263-271.
- Villaseñor M E, E Espitia R (2000) Variedades de trigo recomendadas para siembras de temporal en México. *In: El Trigo de Temporal en México.* E Villaseñor M, E Espitia R (eds). Campo Experimental Valle de México, INIFAP. Chapingo, Edo. de México. 313 p.
- Weegles P L, R J Hammer, J D Schofield (1996) Functional properties of wheat glutenin. *J. Cer. Sci.* 23:1-18.
- Yamazaki W T, J R Donelson (1983) Kernel hardness of some U.S. wheats. *Cer. Chem.* 60:344-350.