



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA
DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD
DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO EN ALIMENTOS
Programa de Posgrado en Ciencias y Tecnología de Alimentos

**Estudio de las Propiedades Viscoelásticas de Grano, Masa y Pan
de Trigo Fuerte y Suave (*Triticum aestivum* L.) Mediante el
Método de Compresión Uniaxial Bajo Pequeña Deformación**

TESIS

Como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS DE LOS ALIMENTOS

Presenta:

M.C. Néstor Ponce García

Hermosillo, Sonora

Junio de 2014

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

APROBACIÓN

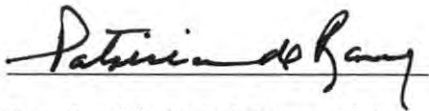
**Estudio de las Propiedades Viscoelásticas de Grano, Masa y Pan
de Trigo Fuerte y Suave (*Triticum aestivum* L.) Mediante el
Método de Compresión Uniaxial Bajo Pequeña Deformación**

M.C. Néstor Ponce García



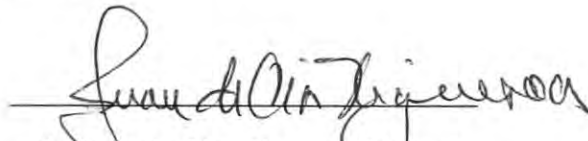
Dr. Benjamín Ramírez Wong

Director de tesis



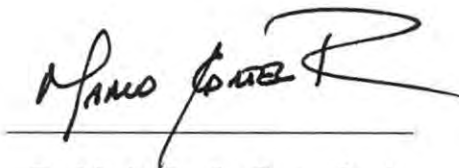
Dra. Patricia Isabel Torres Chávez

Miembro del Comité de tesis



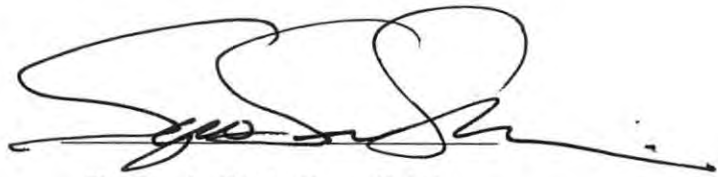
Dr. Juan de Dios Figueroa Cárdenas

Miembro del Comité de tesis



Dr. Mario Onofre Cortez Rocha

Miembro del Comité de tesis



Dr. Sergio Othón Serna Saldívar

Miembro del Comité de tesis

Hermosillo, Sonora

Junio de 2014

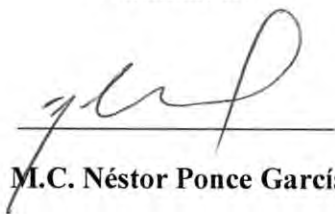
DERECHOS DE AUTOR

El presente trabajo de tesis se presenta como uno de los requisitos parciales para la obtención del grado de **Doctor en Ciencias de los Alimentos** de la Universidad de Sonora.

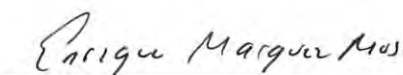
Se deposita en la biblioteca del Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos para ponerla a disposición de los interesados. Se permiten citas breves del material contenido en la tesis sin permiso del autor, siempre y cuando se otorgue el crédito correspondiente. Para reproducir, o en su caso referirse a este documento en forma parcial o total, se deberá solicitar la autorización al Coordinador de Programa del Posgrado.

Bajo cualquier otra circunstancia se debe solicitar permiso directamente al autor.

Atentamente



M.C. Néstor Ponce García



Dr. Enrique Márquez Ríos

Coordinador del Programa de Posgrado

Hermosillo, Sonora

Junio de 2014

AGRADECIMIENTOS

Dios, a quien todo debo.

A la Universidad de Sonora a través del Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos, por haberme brindado la oportunidad de continuar mi formación profesional en sus espacios.

Al personal académico, administrativo y compañeros, gracias.

A la Universidad Autónoma del Estado de México a través de la Facultad de Ciencias Agrícolas, por el invaluable apoyo y facilidades otorgadas para alcanzar esta meta.

Espero muy pronto retribuir la confianza depositada en mí, en beneficio de nuestra Institución y la sociedad.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca económica asignada para la realización de mis estudios de doctorado.

Al Dr. Benjamín Ramírez Wong, Director de tesis, por guiar y conducir a buen fin este proyecto.

A los integrantes del Comité de tesis:
Dr. Juan de Dios Figueroa Cárdenas, Dr. Mario Cortez Rocha,
Dra. Patricia Torres Chávez y Dr. Sergio Serna Saldívar,
mi sincero agradecimiento por cada una de sus valiosas aportaciones, sugerencias y consejos.

DEDICATORIAS

Especialmente dedicada a Don For[†] y Teresita[†]

*El sentimiento no me dejó ordenar y escribir cada palabra que deseaba;
afortunadamente y como siempre, Ustedes estaban conmigo cuando las pensaba.*

A Anayansi...

Por ser el *resorte* que impulsa mi amor, *esfuerzo* y *trabajo*;
la *fuerza* que *comprime* y *disipa* mi tristeza,
y el *grano de trigo* que multiplica mi felicidad.

A mi familia...

*Mi mejor ejemplo y orgullo para comprobar que el tiempo y la distancia
no son obstáculos que impidan expresar cuánto nos queremos.
A todos sin excepción, muchas gracias.*

A mis amigos...

*Quizá no muchos por situación, pero sí todos por convicción.
Gracias por seguirnos la pista.*

“No podemos resolver problemas pensando de la misma manera que cuando los creamos”
Albert Einstein

RESUMEN

Durante el procesamiento y elaboración de productos de trigo, las características fisicoquímicas del grano, la molienda, el comportamiento reológico de la masa y la textura del producto final, representan sólo algunos de los múltiples factores relacionados con la calidad del grano. El objetivo de esta investigación fue evaluar las propiedades viscoelásticas (PVE) de dos grupos trigo, sus masas y pan utilizando el método de compresión uniaxial bajo pequeña deformación, y relacionarlas entre sí. La investigación consistió en dos etapas. En la primera se desarrolló el método de compresión uniaxial bajo pequeña deformación (3%). Posteriormente se seleccionaron cuatro variedades de trigo del grupo suave (Bárceñas, Cortazar, Saturno y Urbina) y cuatro variedades de trigo del grupo fuerte (Kronstad, Nana, Norteña y Tacupeto). A los granos de trigo de cada grupo y variedad a contenido de humedad original y acondicionados a 15% se les evaluaron las siguientes PVE: trabajo total (W_tG), trabajo elástico (W_eG), trabajo plástico (W_pG) y módulo de elasticidad (E). Se utilizó un diseño de experimentos $2 \times 4 \times 2$, obteniendo un total de 16 tratamientos. En la segunda etapa se evaluaron las propiedades viscoelásticas del grano acondicionado, masa y pan utilizando el mismo método de compresión uniaxial bajo pequeña deformación, y se correlacionaron con la molienda y características fisicoquímicas y reológicas de la harina. Para la segunda etapa, granos de los mismos grupos y variedades de la primera etapa se acondicionaron a 16% de humedad. Los granos acondicionados se dividieron y utilizaron para dos propósitos: primero, para evaluar sus propiedades viscoelásticas W_tG , W_eG y W_pG . Segundo, para efectuar una molienda para producir harina y calcular el rendimiento harinero (RH). A las harinas obtenidas se les realizaron análisis fisicoquímicos y reológicos. Asimismo, a la masa de cada harina se les determinaron sus PVE utilizando dos métodos: el de compresión uniaxial bajo pequeña deformación para evaluar trabajo total (W_tM), trabajo elástico (W_eM) y trabajo plástico (W_pM); y el método dinámico para evaluar el módulo de elasticidad (G'), módulo de viscosidad (G'') y la tangente del ángulo de fase ($\tan \delta$). Posteriormente se elaboró pan con la harina de cada grupo y variedad. Al pan se le determinaron sus PVE utilizando el método de compresión uniaxial bajo pequeña deformación, evaluando el trabajo total (W_tP), trabajo elástico (W_eP) y trabajo plástico (W_pP). Adicionalmente, al pan se le determinó el volumen

específico y se le realizó un análisis de perfil de textura (APT). La evaluación de las PVE y el APT del pan se realizó a las 2, 24 y 48 h de almacenamiento. Para la masa se utilizó un diseño de experimentos de un factor para cada grupo de trigo y sus cuatro variedades. Para el pan de cada grupo de trigo se utilizó un diseño de experimentos factorial de dos factores: variedad y tiempo de almacenamiento. Los resultados de la primera etapa indicaron que el contenido de humedad fue el factor que más afectó las PVE del grano, seguido del grupo de trigo. Se presentó un descenso significativo del W_tG debido al incremento del contenido de humedad en el grano. El grupo de trigo fuerte tuvo un W_tG promedio mayor que el grupo suave. Los granos evaluados a humedad original mostraron un valor de W_eG más alto respecto a los granos acondicionados. El W_pG se incrementó al aumentar el contenido de humedad en el grano. En ambos grupos de trigo, el módulo de elasticidad (E) mostró una tendencia a disminuir al incrementarse el contenido de humedad en el grano. Se presentaron correlaciones negativas significativas entre las PVE del grano y las propiedades físicas grosor y peso de 1,000 granos. Los resultados de la segunda etapa, indicaron que las variedades del grupo de trigo suave presentaron correlaciones entre el grano acondicionado, la harina y la masa. En el grupo fuerte destacaron correlaciones entre el gluten húmedo y los parámetros viscoelásticos de la masa. Sin embargo, en ambos grupos no se presentaron correlaciones entre las propiedades viscoelásticas de la masa evaluada por el método de compresión uniaxial bajo pequeña deformación y el método dinámico oscilatorio. Por otra parte, se observó que el tiempo de almacenamiento fue el factor que más afectó las propiedades viscoelásticas y de textura del pan en ambos grupos de trigo. A medida que transcurrió el tiempo de almacenamiento W_tP , W_pP , la firmeza (FIR) y la gomosidad (GOM) del pan se incrementaron, mientras que W_eP , la elasticidad (ELS) y la cohesividad (COH) disminuyeron. Estos cambios fueron más evidentes en el pan del grupo suave. Se concluye que el procedimiento propuesto de compresión uniaxial bajo pequeña deformación, permitió en primera instancia evaluar las propiedades viscoelásticas de granos individuales de trigo de diferentes grupos y variedades con diferente contenido de humedad, identificando algunas correlaciones entre las PVE y físicas del grano. Adicionalmente, el método propuesto permitió evaluar el comportamiento viscoelástico de granos individuales acondicionados, sus respectivas masas y pan, estableciéndose algunas correlaciones entre las PVE de granos acondicionados y sus masas, además de algunas otras con las propiedades fisicoquímicas y reológicas de la harina.

ABSTRACT

During processing and manufacture of wheat products, the grain physicochemical characteristics, milling operation, dough rheological behavior, and textural characteristics of the final product, represents just some of the many factors related to grain quality. The aim of this investigation was to evaluate the viscoelastic properties (VP) of two wheat classes, their dough and bread, using the uniaxial compression test under small strain (3%), and relate to each other. Research was divided in two steps. In the first one, the uniaxial compression test under small strain was developed. Next, four soft wheat cultivars (Bárcenas, Cortazar, Saturno and Urbina), and four hard wheat cultivars (Kronstad, Nana, Norteña and Tacupeto), were selected and their VP were evaluated with their original moisture content and at tempered moisture of 15%. The following VP were evaluated in the wheat kernels from all cultivars: total work (W_tK), elastic work (W_eK), plastic work (W_pK), and modulus of elasticity (E). An experimental design of $2 \times 4 \times 2$ was used giving a total of 16 treatments. In the second step, the VP of tempered wheat kernels, dough and bread, were evaluated using the same method of uniaxial compression under small strain and correlated with the milling process, the physicochemical and rheological characteristics of flour. During the second step, wheat kernels of the classes and cultivars described in the first step were tempered at 16% of moisture content. The tempered kernels were divided and used for two purposes: first, to evaluate the viscoelastic properties W_tK , W_eK and W_pK . And second, to produce flour and calculate the flour extraction rate (ER). In the flours obtained were performed physicochemical and rheological analyses. In addition, the viscoelastic properties of dough from each cultivar were evaluated using two methods: the uniaxial compression test under small strain to assess the total work (W_tD), elastic work (W_eD) and plastic work (W_pD); and the dynamic oscillatory method, to assess the elastic modulus (G'), the viscous modulus (G'') and the tangent of the phase angle ($\tan \delta$). Subsequently, bread was produced with flour of each cultivar and class, and their VP were determined using the uniaxial compression test under small strain, evaluating the total work (W_tB), elastic work (W_eB) and plastic work (W_pB). Additionally, in bread were performed loaf volume and a texture profile analysis (TPA). The evaluations of VP and TPA in bread were performed at 2, 24 and 48 hours of

storage. For dough, an experimental design of one factor was used for each class of wheat and their four cultivars. For bread, a factorial experimental design of two factors (cultivar and time of storage) was used for each wheat classes. The results of the first step indicated that the moisture content was the factor that most affected the VP of the wheat kernels, followed by the wheat class. There was a significant decreased in W_tK as the moisture content increased. The hard wheat class had a higher W_tK average than the soft wheat class. Individual wheat kernels with their original moisture content showed a higher W_eK than the tempered kernels. The W_pK increased as the kernel moisture content was higher. In both wheat classes, the modulus of elasticity (E) showed a tendency to decrease with increasing moisture content of the grain. There were significant negative correlations among the VP of the wheat kernels and the physical properties such as kernel thickness and 1,000-kernels weight. Results of the second step indicated that the soft wheat cultivars showed correlations among the tempered wheat kernel, flour and dough. In the hard wheat class highlighted correlations between wet gluten and the VP parameters of dough. However, in both wheat classes no correlations between the viscoelastic properties of the evaluated dough by uniaxial compression method under small strain, and the dynamic oscillatory method were present. In the other hand, it was observed that the storage time was the factor that most affected the VP and the TPA in both wheat classes. As the storage time increased, total work (W_tB), plastic work (W_pB), firmness (FIR), and gumminess (GUM) of bread were higher, while elastic work (W_eB), elasticity (ELS), and the cohesiveness (COH) decreased. These changes were more evident in bread of soft wheat. It is concluded that the proposed uniaxial compression test under small strain can be applied to evaluate the viscoelastic properties of individual wheat kernels from different classes and cultivars at different moisture content, identifying some correlations between the VP and physical properties of the wheat kernels. Additionally, the proposed method allowed the measurement of the viscoelastic behavior of individual tempered wheat kernels and their respective dough and bread, establishing some correlations between the VP of the tempered wheat kernels and their dough, as well as some others with the physicochemical and rheological properties of the flour.

CONTENIDO

	Página
DERECHOS DE AUTOR	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
DEDICATORIAS	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	viii
CONTENIDO	x
LISTA DE FIGURAS	xiv
LISTA DE TABLAS	xvi
NOMENCLATURA	xviii
INTRODUCCIÓN	1
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
El Trigo.....	4
Generalidades.....	4
Producción.....	5
Mundial.....	5
Nacional.....	5
Clasificación y usos.....	7
Generalidades.....	7
Clasificación en México.....	8
Anatomía y morfología del grano.....	8
Composición química del grano	11
Generalidades.....	11
Agua.....	11
Carbohidratos.....	11
Proteínas.....	13
Lípidos.....	14
Minerales y vitaminas.....	15
Criterios fisicoquímicos de calidad en el grano.....	15
Peso hectolítrico.....	16
Peso de 1000 granos.....	16
Contenido de humedad.....	17
Contenido de proteína.....	17
Contenido de ceniza.....	18
Proceso de Molienda.....	19
Generalidades.....	19
Producción de harina.....	19
Criterios fisicoquímicos de calidad en harina.....	21
Calidad de proteína.....	22
Gluten.....	25
Volumen de sedimentación.....	26
Industria de la Panificación.....	26
Generalidades y formulación.....	26

CONTENIDO (Cont...)

	Página
Procesamiento.....	27
Calidad del pan.....	28
Generalidades.....	28
Envejecimiento del pan.....	29
Textura.....	31
Reología y Viscoelasticidad en Cereales.....	33
Generalidades.....	33
Conceptos reológicos fundamentales.....	33
Comportamiento de materiales ideales.....	35
Elástico (sólido de Hooke).....	35
Plástico (St. Venant).....	35
Viscoso (líquido Newtoniano).....	37
Viscoelástico.....	37
Propiedades Reológicas y Viscoelásticas en Grano de Trigo.....	39
Generalidades.....	39
Compresión uniaxial.....	40
Antecedentes en granos de trigo.....	42
Dureza.....	42
Módulo de elasticidad.....	44
Viscoelasticidad.....	46
Resistencia a la fractura.....	47
Propiedades Reológicas y Viscoelásticas en Masa.....	48
Generalidades.....	48
Estructura y formación de la masa.....	48
Pruebas y ensayos reológicos.....	55
Generalidades.....	55
Deformación a escala pequeña y grande.....	55
Ensayos reológicos empíricos.....	56
Farinógrafo.....	56
Otros ensayos empíricos.....	59
Ensayos reológicos fundamentales.....	59
Método dinámico oscilatorio.....	60
Métodos extensionales.....	62
Otros ensayos fundamentales.....	62
Propiedades Reológicas y de Textura en Pan.....	63
Generalidades.....	63
Ensayos reológicos y de textura.....	64
HIPÓTESIS.....	66
OBJETIVOS.....	67
General.....	67
Particulares.....	67
MATERIALES Y MÉTODOS.....	68

CONTENIDO (Cont...)

	Página
Consideraciones Generales.....	68
Evaluación de las Propiedades Viscoelásticas de Granos de Trigo.....	68
Materia prima.....	68
Limpieza y almacenamiento.....	70
Evaluaciones físicas.....	70
Peso hectolítrico.....	70
Peso de 1000 granos.....	70
Fuerza máxima a la fractura.....	70
Dimensiones.....	72
Evaluaciones químicas.....	72
Contenido de humedad.....	72
Molienda integral del grano.....	74
Contenido de ceniza.....	74
Contenido de proteína.....	74
Proteína polimérica.....	74
Perfil electroforético.....	74
Evaluación viscoelástica del grano.....	74
Desarrollo del método.....	74
Acondicionamiento.....	78
Evaluación.....	78
Diseño de experimentos y análisis estadístico.....	78
Evaluación de las Propiedades Viscoelásticas de Grano de Trigo y su Relación con Molienda, Masa y Pan.....	80
Materia Prima.....	80
Acondicionamiento.....	80
Molienda.....	82
Caracterización de la harina.....	82
Fisicoquímica.....	82
Farinográfica.....	84
Viscoamilográfica.....	84
Evaluación viscoelástica de grano.....	84
Evaluación viscoelástica de la masa.....	85
Preparación.....	85
Evaluación por compresión uniaxial.....	85
Desarrollo del método.....	85
Evaluación.....	87
Evaluación por método dinámico oscilatorio.....	87
Elaboración del pan.....	89
Evaluación fisicoquímica del pan.....	91
Volumen específico.....	91
Contenido de humedad en miga y corteza.....	91
Evaluación viscoelástica del pan.....	91

CONTENIDO (Cont...)

	Página
Desarrollo del método.....	91
Evaluación.....	93
Evaluación de la textura.....	93
Diseño de experimentos y análisis estadístico.....	95
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	96
Evaluación de las Propiedades Viscoelásticas de Granos de Trigo.....	96
Características físicas del grano.....	96
Peso hectolítrico.....	96
Peso de 1000 granos.....	98
Fuerza máxima a la fractura.....	98
Dimensiones.....	99
Características químicas del grano.....	100
Contenido de humedad.....	100
Contenido de ceniza.....	102
Contenido de proteína.....	102
Proteína polimérica insoluble.....	103
Perfil electroforético.....	103
Características viscoelásticas del grano.....	108
Correlaciones simples.....	116
Evaluación de las Propiedades Viscoelásticas de Grano de Trigo y su Relación con Molienda, Masa y Pan.....	118
Molienda y extracción de harina.....	118
Características de la harina.....	120
Fisicoquímicas.....	120
Farinográficas.....	125
Viscoamilográficas.....	129
Características viscoelásticas del grano acondicionado.....	133
Características viscoelásticas de la masa.....	137
Compresión uniaxial bajo pequeña deformación.....	137
Método dinámico oscilatorio.....	141
Correlaciones simples.....	147
Características fisicoquímicas del pan.....	151
Volumen específico.....	151
Humedad de la miga y la corteza.....	151
Características viscoelásticas del pan.....	158
Características de textura.....	164
Discusión General.....	170
CONCLUSIONES.....	173
RECOMENDACIONES.....	175
REFERENCIAS.....	176
ANEXO 1. Artículo Publicado.....	191
ANEXO 2. Artículo Enviado.....	196

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Principales componentes morfológicos del grano de trigo: A. Sección longitudinal; B. Sección transversal.....	10
2	Relación entre los componentes individuales de la harina, especialmente sus fracciones proteicas.....	24
3	Representación esquemática de una curva típica esfuerzo-deformación en sólidos celulares.....	30
4	Clasificación de los materiales según su comportamiento reológico...	36
5	Modelos mecánicos viscoelásticos.....	38
6	Productos elaborados a base de trigo de acuerdo a su contenido de proteína y dureza de grano.....	45
7	Diagrama representativo de las moléculas involucradas en la formación de la masa (no a escala).....	50
8	Interpretación molecular del desarrollo del gluten: A. Inicio de mezclado; B. Desarrollo óptimo; C. Sobremezclado.....	52
9	Transformación de masa en estructura esponjosa. Hipótesis de la 'película líquida'.....	54
10	Parámetros obtenidos a partir de farinograma: A. Harina fuerte; B. Harina suave.....	58
11	Función de entrada y respuestas del ángulo de fase δ	61
12	Diagrama general de la metodología desarrollada durante la investigación	69
13	Prueba de fuerza máxima a la fractura (F_{frac}) en grano de trigo.....	71
14	Dimensiones en un grano de trigo.....	73
15	A. Compresión uniaxial bajo pequeña deformación en grano de trigo. Determinación del módulo de elasticidad (E); B. Huella o área de contacto del grano posterior a la compresión (digitalizada).....	76
16	Esquema de ciclo de compresión carga-descarga.....	77
17	Diagrama y fórmula de acondicionamiento para granos de trigo.....	79
18	A. Mezclador rotativo horizontal para acondicionamiento de grano; B. Interior del contenedor de grano al término de la homogeneización.....	81
19	Molino experimental de trigo para producción de harina.....	83
20	A. Cilindro de aluminio contenedor de masa; B. Cilindros de aluminio con masa y piezas de papel encerado sobre la superficie para evitar desecación.....	86
21	Prueba de compresión uniaxial bajo pequeña deformación en masa....	88
22	Prueba dinámica oscilatoria en masa.....	88
23	Diferentes operaciones en pan: A. Enfriamiento; B. Medición de volumen; C. Medición de peso.....	90
24	Operaciones en pan: A. Rebanado; B. Rebanadas en molde; C. Compresión uniaxial a pequeña deformación.....	92

LISTA DE FIGURAS (Cont...)

Figura		Página
25	Análisis de perfil de textura en pan.....	94
26	Subunidades proteicas de variedades de trigo suave en gel de policrilamida.....	106
27	Subunidades proteicas de variedades de trigo fuerte en gel de policrilamida.....	107
28	Curvas fuerza-distancia a una deformación de 3% en granos de trigo suave Saturno (A-B); y fuerte Nana (C-D) a humedad original y de acondicionamiento a 15%.	113
29	Efecto del contenido de humedad sobre el módulo de elasticidad (<i>E</i>) de granos de trigo a humedad original y de acondicionamiento a 15%.	115
30	Curvas viscoamilográficas de harinas fuertes.....	131
31	Curvas viscoamilográficas de harinas suaves.....	132
32	Curvas fuerza-distancia promedio del comportamiento viscoelástico en granos de trigo del grupo suave y fuerte acondicionados a 16% (A-B); y sus respectivas masas (C-D).....	142
33	Valores y comportamiento del ángulo de fase ($\text{Tan } \delta$) de masas: A. Variedades del grupo suave; B. Variedades del grupo fuerte. Las barras indican la desviación estándar.....	146
34	Volumen específico (VEP) de pan elaborado con: A. Harina de variedades de trigo suave; y B. Harina de variedades de trigo fuerte... ..	153
35	Efecto del tiempo de almacenamiento sobre la humedad: A. Miga; y B. Corteza de pan elaborado con harina de variedades de trigo suave.. ..	156
36	Efecto del tiempo de almacenamiento sobre la humedad: A. Miga; y B. Corteza de pan elaborado con harina de variedades de trigo fuerte.. ..	157
37	Valores medios del comportamiento viscoelástico a diferentes periodos de almacenamiento en pan elaborado con variedades de trigo suave	160
38	Valores medios del comportamiento viscoelástico a diferentes periodos de almacenamiento en pan del grupo fuerte.....	161
39	Valores medios y comportamiento de los parámetros de textura con el tiempo de almacenamiento en pan del grupo suave.....	166
40	Valores medios y comportamiento de los parámetros de textura con el tiempo de almacenamiento en pan del grupo fuerte.....	166

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
1	Principales países productores de trigo durante el ciclo 2012, de acuerdo a la FAO.	6
2	Clasificación de los trigos mexicanos con base en la funcionalidad del gluten	9
3	Composición química proximal de trigo fuerte y suave.....	12
4	Análisis de varianza, valor de F , del efecto del grupo y variedad de trigo sobre las propiedades físicas del grano.....	97
5	Valores medios de las propiedades físicas de granos de trigo.....	97
6	Análisis de varianza, valor de F , del efecto del grupo y variedad de trigo sobre las propiedades químicas del grano.....	101
7	Valores medios de las propiedades químicas de granos de trigo de diferentes grupos y variedades.....	101
8	Variantes alélicas de las gluteninas de alto peso molecular (G-APM) en grano de trigo de diferentes grupos y variedades.....	105
9	Análisis de varianza, valor de F , del efecto del grupo, variedad y humedad sobre las propiedades viscoelásticas del grano.....	109
10	Valores medios de las propiedades viscoelásticas de granos de trigo diferentes grupos y variedades, a humedad original y acondicionamiento (15%) evaluados bajo pequeña deformación.....	110
11	Coeficientes de correlación simple (r) entre propiedades físicas y viscoelásticas de granos de diferentes grupos y variedades.....	117
12	Análisis de varianza, valor de F , del efecto de la variedad sobre la fuerza máxima de compresión en los grupos de trigo suave y fuerte.....	119
13	Valores medios de fuerza de compresión máxima y rendimiento de harina de granos acondicionados de variedades del grupo suave y fuerte	119
14	Análisis de varianza, valor de F , del efecto de la variedad de trigo del grupo suave sobre las propiedades fisicoquímicas de la harina	121
15	Análisis de varianza, valor de F , del efecto de la variedad de trigo del grupo fuerte sobre las propiedades fisicoquímicas de la harina.....	121
16	Valores medios de las propiedades fisicoquímicas de harinas obtenidas del grupo suave y fuerte.....	122
17	Análisis de varianza, valor de F , del efecto de la variedad de trigo del grupo suave sobre las propiedades farinográficas de la harina.....	126
18	Análisis de varianza, valor de F , del efecto de la variedad de trigo del grupo fuerte sobre las propiedades farinográficas de la harina.....	126
19	Valores medios de las características farinográficas de harinas de variedades del grupo suave y fuerte.....	127
20	Análisis de varianza, valor de F , del efecto de las variedades de trigo del grupo suave y fuerte sobre la viscosidad máxima de la harina.....	130

LISTA DE TABLAS (Cont...)

Tabla		Página
21	Valores medios de viscosidad máxima de harina de variedades del grupo suave y fuerte.....	130
22	Análisis de varianza, valor de F , del efecto de la variedad de trigo suave acondicionado sobre las propiedades viscoelásticas del grano...	134
23	Análisis de varianza, valor de F , del efecto de la variedad de trigo fuerte acondicionado sobre las propiedades viscoelásticas del grano...	134
24	Valores medios de las propiedades viscoelásticas de granos de trigo acondicionados del grupo suave y fuerte.....	135
25	Análisis de varianza, valor de F , del efecto de la variedad de trigo suave sobre las propiedades viscoelásticas de masa evaluada por compresión uniaxial a pequeña deformación.....	138
26	Análisis de varianza, valor de F , del efecto de la variedad de trigo fuerte sobre las propiedades viscoelásticas de masa evaluada por compresión uniaxial a pequeña deformación.....	138
27	Valores medios de las propiedades viscoelásticas de masas de variedades del grupo suave y fuerte obtenidos por compresión uniaxial bajo pequeña deformación.....	140
28	Análisis de varianza, valor de F , del efecto de las variedades de trigo del grupo suave y fuerte sobre las propiedades viscoelásticas de la masa evaluada por método dinámico oscilatorio.....	143
29	Valores medios de las propiedades viscoelásticas de masas de variedades del grupo suave y fuerte obtenidos por método dinámico oscilatorio.....	145
30	Correlaciones simples (r) entre parámetros de grano de trigo acondicionado, harina y masa de trigo suave.....	148
31	Correlaciones simples (r) entre parámetros de harina y masa de trigo fuerte.....	150
32	Análisis de varianza, valor de F , del efecto de las variedades de trigo del grupo suave y fuerte sobre el volumen específico del pan.....	152
33	Análisis de varianza, valor de F , del efecto de la variedad y tiempo de almacenamiento sobre el contenido de humedad en la miga y corteza de pan de trigo del grupo suave y fuerte.....	154
34	Análisis de varianza, valor de F , del efecto de la variedad y tiempo de almacenamiento sobre las propiedades viscoelásticas de pan de trigo del grupo suave y fuerte, evaluadas por compresión uniaxial bajo pequeña deformación.....	159
35	Análisis de varianza, valor de F , del efecto de la variedad y tiempo de almacenamiento sobre las características de textura de pan de trigo del grupo suave.....	165
36	Análisis de varianza, valor de F , del efecto de la variedad y tiempo de almacenamiento sobre las características de textura de pan de trigo del grupo fuerte.....	165

NOMENCLATURA

Abreviatura/ Símbolo	Descripción	Unidad
A	Área	mm ² , cm ² , m ²
AA	Absorción de agua	%
CCH	Contenido de ceniza en harina	%
CHH	Contenido de humedad en harina	%
COH	Cohesividad de pan	-
CPH	Contenido de proteína en harina	%
<i>d</i>	Distancia	mm
DM	Tiempo de desarrollo máximo	min
<i>E</i>	Módulo de elasticidad	MPa
ELS	Elasticidad de pan	-
EST	Estabilidad de la masa	min
F	Fuerza	N
FIR	Firmeza de pan	N
F _{frac}	Fuerza máxima a la fractura de grano	N
F _{máxG}	Fuerza máxima de compresión en grano	N
F _{máxM}	Fuerza máxima de compresión en masa	N
F _{máxP}	Fuerza máxima de compresión en pan	N
<i>G'</i>	Módulo de almacenamiento o elástico	Pa
<i>G''</i>	Módulo de pérdida o viscoso	Pa
GEG	Grado de elasticidad de grano	%
GEM	Grado de elasticidad de masa	%
GEP	Grado de elasticidad de pan	%
GH	Gluten húmedo	%
GOM	Gomosidad de pan	-
HC	Humedad de la corteza de pan	%
HM	Humedad de la miga de pan	%
ITM	Índice de tolerancia al mezclado	UB
P1000	Peso de mil granos	g/1,000-granos
PhL	Peso hectolítrico	kg/hL
PVE	Propiedades viscoelásticas	-
RES	Resilencia de pan	-
RH	Rendimiento de harina o harinero	%
R _m	Resistencia máxima a la extensión	UB
Tan δ	Ángulo de fase	-
TLL	Tiempo de llegada	min
UB	Unidades Brabender	-
VEP	Volumen específico de pan	cm ³ /g
VM	Viscosidad máxima	cP
VS	Volumen de sedimentación	mL

NOMENCLATURA (cont...)

Abreviatura/ Símbolo	Descripción	Unidad
W	Trabajo o fuerza de la masa	J/g
W_e	Trabajo elástico	N·mm
W_eG	Trabajo elástico de grano	N·mm
W_eM	Trabajo elástico de masa	N·mm
W_eP	Trabajo elástico de pan	N·mm
W_p	Trabajo plástico	N·mm
W_pG	Trabajo plástico de grano	N·mm
W_pM	Trabajo plástico de masa	N·mm
W_pP	Trabajo plástico de pan	N·mm
W_t	Trabajo total	N·mm
W_tG	Trabajo total de grano	N·mm
W_tM	Trabajo total de masa	N·mm
W_tP	Trabajo total de pan	N·mm
Símbolos griegos		
ε	Deformación (strain)	%
σ	Esfuerzo (stress)	Pa
σ_0	Esfuerzo inicial	Pa
τ	Esfuerzo de corte	Pa
γ	Velocidad de corte	s
η	Viscosidad Newtoniana	cP

INTRODUCCIÓN

El trigo es uno de los tres cereales más importantes a nivel mundial en términos de producción y consumo. La diversidad de productos que a partir de este cultivo se elaboran y la consecuente derrama económica que éstos generan, han contribuido a que el trigo sea el alimento que más atención reciba por parte de los investigadores en cereales, quienes cada vez se interesan más en el estudio de sus propiedades y características.

Actualmente, la inversión de tiempo y recursos para llevar a cabo análisis completos durante toda la cadena que conforma la industria del trigo son poco viables, especialmente cuando el número de muestras es elevado, o cuando se requiere obtener información expedita y de primera mano. Sin embargo, las exigencias del entorno hacen necesario contar con la mayor cantidad de datos e información respecto a las características de la materia prima, ya que cuanto más se conozcan sus propiedades, mayores serán las posibilidades de estimar la calidad y comportamiento de los productos que se elaboran a partir de ella. Derivado de lo anterior, una de las principales metas de los productores de trigo, la industria molinera y la industria panificadora, ha sido tratar de encontrar métodos relativamente sencillos que les permitan evaluar el potencial del grano para anticipar resultados sobre la calidad del producto final.

Diversas investigaciones han intentado determinar la calidad del pan mediante la combinación de mediciones en grano, harina o masa utilizando modelos predictivos, sin llegar hasta el momento a resultados ampliamente convincentes. Ninguna prueba o método de evaluación relacionada con las características físicas, o de las subunidades proteicas de alto peso molecular del grano, por citar algunas, ofrecen resultados confiables para predecir la calidad panadera de una determinada variedad o línea de trigo; además, suelen ser ensayos específicos para una característica particular, o bien, técnicamente difíciles para ser considerados como prueba de calidad rápida.

Los principios de reología pueden utilizarse como auxiliares de control de proceso, simulación y predicción de la respuesta de materiales biológicos a diferentes condiciones de flujo y deformación aplicados constantemente durante su manejo, procesamiento y control de calidad.

La reología aplicada permite acceder a una descripción cuantitativa de las propiedades mecánicas de los materiales, lo que favorece la obtención de información relacionada con la estructura, composición y funcionalidad del material. Esto ha generado que se hayan utilizado diversos ensayos reológicos y mediciones a nivel de laboratorio buscando predecir la calidad del producto final, con el objetivo de que la información obtenida se extrapole al comportamiento del material a niveles superiores. Sin embargo, muchos ensayos reológicos desarrollados para evaluar las características y propiedades de sistemas biológicos como los granos de cereales o la masa son empíricos, siendo complicado establecer correlaciones con otras mediciones objetivas.

Una de las clasificaciones reológicas más relacionada con el estudio de los cereales y sus productos, es la viscoelasticidad. De acuerdo con lo anterior, prevalece la necesidad de generar una extensión a partir de la cual se determinen y evalúen las características viscoelásticas de la materia prima inicial (grano), productos intermedios (masa) y producto final (pan), considerando que la calidad respectiva de cada producto se encuentra supeditada a su predecesor. En este sentido, el estudio y evaluación del comportamiento viscoelástico de los granos pudiera ser una herramienta valiosa que contribuya y complemente el proceso de selección de variedades y grupos de trigo, en función del producto final que se desee elaborar.

Las propiedades viscoelásticas de granos de trigo han sido estudiadas de dos formas: en grano seccionado con forma geométrica bien definida (cubo, paralelepípedo o cilindro); y en grano entero. Si bien ambas formas presentan ventajas y desventajas durante su evaluación, domina la ventaja de que en los granos enteros las propiedades originales no se modifican. Adicionalmente, el contenido de humedad en el grano (seccionado o entero) es la condición que presenta más efecto significativo sobre las propiedades reológicas. Sin embargo, a pesar de que el estudio del comportamiento viscoelástico de granos de trigo ha sido considerado por diferentes investigadores, aún es necesario determinar y establecer más y mejores métodos de evaluación de las propiedades viscoelásticas y la relación entre éstas y los productos subsecuentes.

En este contexto, en el presente estudio se evaluaron las propiedades viscoelásticas de granos individuales de trigo, masa y pan utilizando el mismo método desarrollado de compresión uniaxial bajo pequeña deformación (3%), bajo la premisa de que el comportamiento viscoelástico de este tipo de materiales biológicos puede comprenderse adecuadamente a partir de la aplicación de deformaciones lo suficientemente pequeñas (<5%) y a una velocidad de deformación mínima, requerimientos que atienden y permiten la aplicación de las leyes de Hooke y de viscosidad de Newton para trabajar en la región viscoelástica lineal del material. Adicionalmente, se evaluaron las propiedades fisicoquímicas del grano; fisicoquímicas y reológicas de la harina, así como el perfil de textura del pan, a fin de contar con mayores elementos e información que contribuyera a una mejor interpretación, análisis y correlación del comportamiento viscoelástico de los sistemas evaluados.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El Trigo

Generalidades

El fruto maduro de trigo es un grano no perecedero que puede ser almacenado para utilizarse paulatinamente como materia prima en la elaboración de muchos alimentos procesados, o bien, como semilla para siembras futuras (Serna, 2009). Entre los cereales, el trigo es uno de los más importantes en términos de producción y consumo a nivel mundial. Se estima que los primeros cultivos existieron hace aproximadamente 10,000 años A.C. como parte de la 'Revolución Neolítica'. Con el paso del tiempo el trigo se domesticó, gestándose así una selección de las especies con mejores rasgos genéticos, buscando mejorar las condiciones y niveles de producción (Shewry, 2009). Sin embargo, debido a los diferentes tipos de trigo que actualmente se producen, así como a la diversidad cultural entre las sociedades que lo cultivan, se ha propiciado que prevalezca una marcada distinción de prácticas agronómicas en su producción (Mallick et al., 2013).

Los estudios sobre la calidad del trigo no suelen abarcar gran número de variedades, restringiéndose frecuentemente sólo a las cultivadas en una misma región o país. Bordes et al. (2008) realizaron un estudio sobre las características agronómicas y la calidad reológica y de panificación de 372 variedades de trigo fuerte representativas del mundo, concluyendo que en términos de los más importantes indicadores de calidad relacionados con los hábitos de crecimiento, cosecha, molienda y aptitud panificable, destacan marcadas diferencias de calidad entre variedades, debido principalmente a la diversidad genética, las condiciones climatológicas durante el desarrollo de la planta, así como por la siembra indistinta de variedades antiguas y recientes, dependiendo de la zona o región de cultivo.

El trigo es el cultivo que más atención recibe por parte de los investigadores en cereales, quienes cada vez evalúan más de cerca sus propiedades y características. Esta gramínea abarca un campo extenso y complejo de estudio conformado principalmente por ámbitos agronómicos y de producción, de manejo post-cosecha del grano, además de los relacionados con las industrias de transformación primaria y de productos terminados.

Producción

La producción de cereales tiene un papel preponderante en la actividad agrícola mundial. Con el crecimiento de la población, la demanda por este tipo de cultivos aumentó, llevándolos a ocupar la mayor parte de la superficie sembrada en las áreas más productivas del mundo. El trigo es considerado como uno de los tres cereales más importantes del mundo, conjuntamente con el maíz y el arroz, en función de su producción y consumo.

Mundial. La producción de trigo en más de 120 países alrededor del mundo, se debe principalmente a su gran capacidad de adaptación a diferentes condiciones climatológicas, lo que ha propiciado que por encima de cualquier otra especie, el trigo y los productos que a partir de él se elaboran, aporten la mayor cantidad de nutrimentos a la dieta humana del mundo (Paulsen & Shroyer, 2004).

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés), la producción mundial de trigo en el año 2012 se cifró en alrededor de 675 millones de toneladas (<http://faostat.fao.org/>. Fecha de consulta: marzo 18, 2014). En la Tabla 1 se presentan los principales países productores de trigo y su respectivo aporte en millones de toneladas durante el año 2012.

Nacional. En México, durante el ciclo agrícola 2012 se cosecharon 578, 836 hectáreas de trigo con una producción total aproximada de 3.3 millones de toneladas, esto de acuerdo a datos oficiales de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) (<http://www.siap.gob.mx> Fecha de consulta: marzo 18, 2014).

Durante el ciclo agrícola 2012, en México se produjeron principalmente dos tipos de trigo: suave o Grupo 3 (47%) y cristalino o Grupo 5 (48%). Los principales estados productores fueron: Sonora (55%), Baja California (15%), Guanajuato (10%), Chihuahua y Michoacán (3% cada uno) (<http://www.slideshare.net/CIMMYT/diagnostico-trigo-2013> Fecha de consulta: marzo 18, 2014).

Tabla 1. Principales países productores de trigo durante el ciclo 2012, de acuerdo a la FAO.

País	Producción	
	Millones toneladas	(%)
Comunidad europea (CE)	134.0	19.9
China	121.4	18.0
India	94.8	14.0
USA	61.7	9.1
Rusia	37.7	5.6
Australia	29.9	4.4
Canadá	27.0	4.0
Pakistán	23.5	3.5
Turquía	20.1	3.0
Ucrania	15.7	2.3
Irán	13.8	2.0
Kasajistán	13.3	2.0
Argentina	11.0	1.6
Otros países	71.0	10.5
TOTAL	674.9	100

Fuente: <http://faostat.fao.org/>. (Fecha de consulta: marzo 18, 2014).

De acuerdo con Espitia et al. (2004), la superficie de trigo harinero (*Triticum aestivum* L.) de riego en México se ha reducido drásticamente debido principalmente a la escasez de agua. Esto ha contribuido a que la industria recurra a la importación de trigo para suplir la demanda nacional. Por otro lado, un factor que ha impedido incrementar las siembras de riego de temporal ha sido que los productores frecuentemente enfrentan problemas para comercializar el grano, ya que la industria molinera nacional prefiere importar trigo del mercado internacional, bajo el argumento de que los trigos mexicanos no poseen la calidad de panificación requerida.

Clasificación y usos

Generalidades. El trigo común, conocido también como trigo harinero (*Triticum aestivum* L.) es hexaploide con 21 pares ($2n=42$) de cromosomas. Esta especie no se encuentra de manera silvestre; se ha cultivado por el hombre desde hace aproximadamente 9,000 años. Los trigos durum o cristalinos (*Triticum turgidum* L.) son tetraploides ($2n=28$), mientras que las especies ancestrales como einkorn (*Triticum monococcum* L.), son diploides ($2n=14$) (McIntosh, 2004).

Aunque existen diversos tipos de trigo, los que se consideran comercialmente relevantes son limitados, dominando ampliamente las especies de los géneros *T. aestivum* y *T. turgidum*. Para propósitos comerciales, los trigos comunes principalmente se han clasificado de acuerdo a sus propiedades. Los sistemas de clasificación se basan cada vez más en las propiedades físicas y químicas del grano relacionadas directamente con aspectos de procesamiento, de acuerdo al tipo de producto final que se pretenda elaborar.

En general, los principales criterios determinantes de la calidad del trigo son: la dureza o suavidad (textura) del grano, el hábito de crecimiento de la planta de acuerdo a la época del año en que se cultivó, el color (rojo o blanco) y el contenido de proteína del grano. Parámetros más específicos son el peso por volumen, el grado de contaminación con materiales ajenos, incluyendo otros cereales o especies de grano, el contenido de humedad del grano y otros criterios relacionados con la evaluación de las propiedades de la masa, los cuales permiten definir con bastante certeza el destino potencial del grano (Orth & Shellenberger, 1988).

Clasificación en México. En México, el trigo se cataloga en tres tipos principales: fuerte, suave y cristalino. Sin embargo, el sistema de clasificación mexicano agrupa a los trigos de acuerdo a la fuerza del gluten y los enumera en cinco grupos de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-FF-036-1996. En la Tabla 2 se presenta el sistema de clasificación del trigo en México y las respectivas características funcionales de cada grupo.

Anatomía y morfología del grano

En la familia de las gramíneas (*gramineae*) una célula fertilizada en el ovario se desarrolla como una semilla sencilla o simple, comprendiendo así el fruto entero. La pared del fruto (pericarpio) y la cubierta de la semilla permanecen unidas, como resultado de que la semilla y el fruto no se pueden separar, es decir, el grano es un fruto de una sola semilla. Este tipo de frutos, incluidos los cereales, botánicamente reciben el nombre de carióspsides (Belderok et al., 2000).

En el trigo, el pericarpio, las envolturas del grano y las células de aleurona forman lo que industrialmente se conoce como salvado, el cual constituye entre 8-10% del peso total del grano. Por otro lado, la fertilización del óvulo da lugar a dos tejidos diferentes: el embrión y el endospermo. El endospermo ocupa alrededor del 80-90% del peso seco del grano en madurez y representa el principal tejido de almacenaje de almidón y proteína. La capa aleurona (rica en proteína) forma parte del endospermo, pero algunos restos quedan adheridos al salvado después del proceso de molienda. El embrión representa aproximadamente un 2% del peso seco total del grano, existiendo variabilidad genética en el rango de peso de los granos y en menor medida, en la proporción de cada parte respecto al peso final (Satorre et al., 2004).

La longitud y grosor del grano difiere entre variedades, siendo en promedio de unos 8 y 4 mm respectivamente, con un peso que oscila alrededor de 35 mg. Los granos de trigo son redondeados en su parte dorsal y poseen un surco a lo largo de su parte ventral (Hoseney, 1991). En la Figura 1 se presenta la estructura y composición morfológica general de un grano de trigo.

Tabla 2. Clasificación de los trigos mexicanos con base en la funcionalidad del gluten.

Clasificación	Características funcionales o usos
Grupo I. Fuerte	Apto para panificación tecnificada y mezcla de trigos
Grupo II. Medianamente fuerte	Panificación semitecnificada y/o artesanal
Grupo III. Suave	Galletería, pastelería. Mejora tenacidad
Grupo IV. Tenaz	Poco extensible. Utilizado en galletería
Grupo V. Cristalino	Utilizado en elaboración de pastas y sopas

Fuente: Serna (2009).

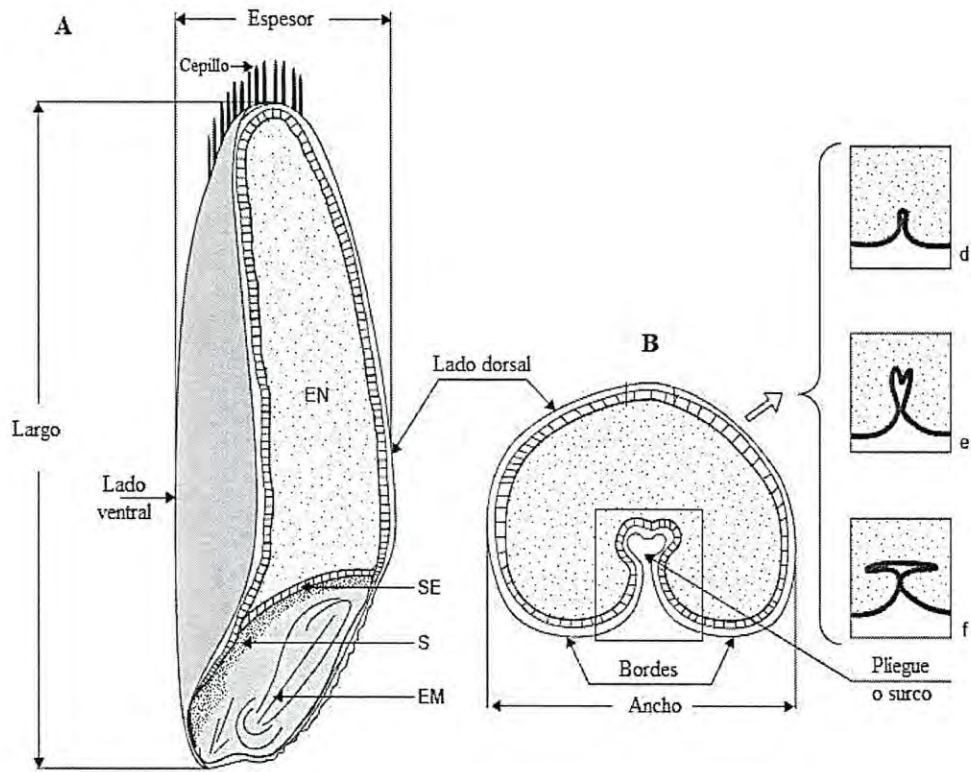


Figura 1. Principales componentes morfológicos del grano de trigo: A. Sección longitudinal; B. Sección transversal. EN, endospermo; SE, epitelio escutelar; S, escutelo; EM, embrión; d, e, f, segmentos con la forma típica del pliegue o surco. Fuente: Adaptado de Grundas & Wrigley (2004).

Composición química del grano

Generalidades. El grano maduro de trigo comprende tres componentes principales: almidón, proteínas y polisacáridos, los cuales en conjunto comprenden cerca del 90% del peso seco, mientras que los constituyentes menores incluyen lípidos, minerales y vitaminas (Shewry et al., 2013). Los componentes difieren en su distribución dentro del grano dependiendo de factores como la variedad y las condiciones de crecimiento, incluidas la cantidad de agua, tipo de suelo, temperatura y fertilización. En la Tabla 3 se presentan los valores de la composición química proximal de granos de trigo fuerte y suave.

Agua. El contenido de agua en el grano es variable dependiendo de diversas condiciones, entre las que destacan el momento u oportunidad de cosecha, las condiciones climatológicas y la forma de almacenamiento. El contenido de agua de un grano sano almacenado bajo condiciones óptimas, no deberá ser superior a 14% (Callejo, 2002). El contenido de humedad se cuantifica principalmente para fines de comercialización y, en su caso, es un factor preponderante para llevar a cabo un correcto acondicionamiento del grano previa molienda. Por otro lado, la cuantificación del resto de los constituyentes del grano se debe expresar en términos de materia seca, promoviendo así que la variación de los valores por efecto del contenido de humedad se reduzca al mínimo.

Carbohidratos. Alrededor del 80% del grano está constituido por carbohidratos (ELN + fibra cruda). Únicamente del 3 a 5% de estos carbohidratos son estructurales y se encuentran conformados por la fracción fibrosa, la cual a su vez está constituida por carbohidratos insolubles. El resto es material de reserva constituido principalmente por almidón, mismo que se encuentra en el endospermo harinoso (Serna, 2009).

El almidón consiste en polímeros de glucosa, amilosa y amilopectina. La amilosa es esencialmente lineal, está conformada por aproximadamente 99% de enlaces glucosídicos α -1,4 y tiene un peso molecular entre 1×10^5 y 1×10^6 . La amilopectina es ramificada y además de enlaces α -1,4 (95%), también incluye enlaces α -1,6 (5%); es más pesada que la amilosa alcanzando un peso en el orden de 1×10^7 – 1×10^9 . La relación de los dos polisacáridos varía de acuerdo al origen botánico del almidón (Tester et al., 2004).

Tabla 3. Composición química proximal de trigo fuerte y suave ^a.

Tipo de trigo	Proteína	Extracto etéreo	Fibra cruda	Cenizas	ELN ^b
			(%)		
Fuerte	14.4 11.5 – 17.0	2.3 1.8 – 2.8	2.9 2.8 – 3.0	1.9 1.8 – 2.0	78.5 75.2 – 82.1
Suave	9.9 8.0 – 12.0	2.8 2.6 – 2.9	2.7 2.5 – 2.8	1.7 1.8 – 1.9	82.9 80.4 – 85.1

^a Los valores están expresados en materia seca. Los números superiores indican el valor promedio y los inferiores se refieren al intervalo dentro del cual se encuentran generalmente los valores.

^b ELN=Extracto Libre de Nitrógeno.

Fuente: Adaptada de Serna (2009).

En el trigo, el almidón habitualmente está constituido entre 20-30% de amilosa y 70-80% de amilopectina (Šramková et al., 2009). A través de la luz polarizada, los gránulos de almidón nativo son birrefringentes y exhiben un patrón conocido como 'cruz de malta', la cual indica un arreglo ordenado de las moléculas de almidón (Van Der Borght et al., 2005). El incremento del almidón es responsable del aumento del tamaño del grano, lo que pudiera ser benéfico en las variedades de trigo destinadas a la producción de harina (Shewry et al., 2013).

Proteínas. El contenido de proteína en el trigo varía más ampliamente que el contenido de almidón. Sin embargo, debido a que el almidón es el componente dominante en el grano, variedades con bajo contenido de almidón, pueden llegar a tener alto contenido de proteína, por lo tanto, es importante considerar la cantidad de proteína sobre el peso del grano y en base al peso seco. Los granos de los cereales contienen relativamente poca cantidad promedio de proteína (10-12% bs) en comparación con otros alimentos como las leguminosas (Shewry & Haldford, 2002). Por otro lado, de los 10 aminoácidos considerados como esenciales en la dieta humana, las proteínas del grano de trigo sólo son deficientes en el contenido de lisina, mientras que algunos otros aminoácidos esenciales están presentes en cantidades relativamente más altas a los requerimientos nutrimentales (Shewry, 2009).

Las proteínas de los cereales influyen directamente en la utilización del grano, específicamente durante la preparación y elaboración de diferentes alimentos. Esto es particularmente importante en el caso del trigo, ya que este cereal se consume en la dieta humana después de su procesamiento en pan u otros alimentos (Shewry et al., 2013). En este sentido, Gianibelli et al. (2001) discuten que las proteínas son el componente más importante del trigo, debido a que a partir de éstas se determina la funcionalidad y uso del grano. Sin embargo, el estudio de estas macromoléculas resulta complejo debido entre otras razones a que de acuerdo con Wrigley et al. (2009), un análisis proteómico ha demostrado la presencia de alrededor de 1,700 polipéptidos en el endospermo del trigo, de los cuales sólo alrededor del 30% se han podido identificar.

Una clasificación de proteínas de las plantas basada en su solubilidad en diferentes solventes, es la de Osborne. Ésta se utiliza ampliamente para catalogar a las proteínas en tres grupos: proteínas de almacenamiento; proteínas estructurales y metabólicas; y proteínas protectoras.

Las proteínas de almacenamiento caen en tres diferentes fracciones de Osborne y juegan un papel muy importante en la funcionalidad del trigo, además de estar presentes en tres diferentes tejidos del grano (Shewry, 2009).

En relación a su funcionalidad, Southan & MacRitchie (1999) señalan que la razón principal por la cual las proteínas rigen las propiedades de la masa, se debe a que durante el desarrollo de la masa se forma un sistema coloidal a manera de red continua que se extiende a través de todo el sistema y que se conoce como gluten. Las propiedades del gluten dependen de dos tipos de proteínas: las gluteninas y las gliadinas, las cuales a su vez y de manera combinada, contribuyen a la formación de la masa y determinan las propiedades viscoelásticas que se expresan durante el procesamiento y elaboración de diversos productos. Habitualmente se hace referencia a proteínas monoméricas y poliméricas, siendo las gliadinas y gluteninas las principales representantes de cada uno de estos dos grupos, respectivamente.

Lípidos. En contraste con la proteína y el almidón, la fracción lipídica es un componente menor del grano de trigo, que constituye alrededor de 3 a 4% del peso del grano entero, e incluso, un poco menos (1-2.5% por peso) en el endospermo. Los lípidos en el trigo conforman una mezcla compleja de componentes y mantienen una distribución irregular en varias partes del grano. Una tercera parte del total de la fracción lipídica se localiza en el germen, la cual representa apenas un 4% del peso total del grano; por lo tanto, el germen posee el más alto contenido de lípidos (Šramková et al., 2009).

Más de 20 clases de lípidos existen en el grano, las cuales pueden dividirse en dos grupos: los lípidos no polares y los polares. El endospermo es la fracción del grano de trigo que posee menor contenido de lípidos, por lo tanto, la composición y contenido de lípidos en la harina puede diferir dependiendo del proceso de molienda. Cuando las proteínas de la harina se remueven, las propiedades de la masa y la capacidad para elaborar productos panificables se pierden. En contraste, esas cualidades prevalecen cuando los lípidos se remueven de la harina. La hidrólisis lipídica puede ocurrir durante el almacenamiento del grano o la harina debido a la presencia de enzimas, tales como la lipasa y fosfolipasa, ocurriendo el consecuente incremento en el nivel de ácidos grasos libres y la disminución de la calidad del producto (Wrigley et al., 2009).

Minerales y vitaminas. En general, el trigo puede considerarse como una fuente importante de algunas vitaminas y minerales, los cuales se encuentran principalmente en el pericarpio, el germen y la capa aleurona. Sin embargo, durante el proceso de molienda muchos de estos nutrientes se remueven y se pierden. Las principales vitaminas del trigo son las del complejo B, particularmente la tiamina (B1), riboflavina (B2), niacina (B3), piridoxina (B6) y folatos (B9) (Serna, 2009).

Por otro lado, el trigo y otros cereales son fuente importante de hierro y zinc, ambos minerales comúnmente deficientes en las dietas humanas a nivel mundial. En general, las líneas y variedades de trigo liberadas recientemente contienen menor proporción de minerales que las variedades más antiguas (Shewry, 2009). En el trigo, el fósforo es el macromineral encontrado en mayor cantidad y se asocia particularmente con el ácido fítico, el cual a su vez se localiza también en la capa aleurona y al mismo tiempo se relaciona con otros minerales como el Ca, Mg, Fe, Zn y Cu (Serna, 2009).

Criterios fisicoquímicos de calidad en el grano

Generalidades. Los criterios de calidad en el grano son tan variados como sus usos. En la mayoría de los casos, éstos se refieren a las características del endospermo. La calidad del trigo tiene diferentes significados o connotaciones de acuerdo al uso o destino final que recibirá el grano. En síntesis, la calidad industrial del trigo se caracteriza mediante el análisis de parámetros físicos, químicos y reológicos (Halverson & Zeleny, 1988).

El análisis físico del trigo incluye entre otros, el rendimiento harinero, la textura del grano (dureza) y su peso hectolítrico. El diseño y construcción de maquinaria y equipo utilizado durante las diferentes operaciones de manejo post-cosecha (almacenamiento y secado) del grano, precisan el conocimiento de algunas propiedades físicas, tales como la forma, tamaño, volumen y densidad del grano. El contenido de humedad es el principal factor que influye sobre las propiedades físicas del grano (Aydin, 2007; Gorji, et al., 2010).

Las características químicas del trigo han sido evaluadas convencionalmente por diferentes métodos, considerando que este cultivo es particularmente útil para productos determinados

(Ohm et al., 1998). El análisis químico comprende determinaciones como el contenido de humedad, contenido de proteína (e inclusive sus proporciones), contenido de ceniza y el volumen de sedimentación. Las determinaciones fisicoquímicas contribuyen a definir ciertas características o cualidades en el grano para conocer su funcionalidad y, eventualmente, para canalizar mejor su uso o destino final (Espitia et al., 2004).

Peso hectolítrico. Uno de los criterios físicos de calidad más evaluados en el grano, es su peso por unidad de volumen. El método 55-10 (AACCI) es el más utilizado para determinar esta propiedad. La prueba consiste en cuantificar el peso de una muestra de granos perfectamente homogeneizada en un volumen conocido (Halverson & Zeleny, 1988). En países donde se utiliza el sistema métrico (México), el resultado se expresa en kilogramos por hectolitro (kg/hL).

Entre otras consideraciones, el tamaño del grano como tal tiene poca o ninguna influencia en esta determinación. La forma del grano y la uniformidad del tamaño y forma son factores importantes que afectan la prueba, en la medida en cómo se orienten los granos dentro del contenedor. Otro factor que influye es la densidad del grano, la cual se rige por la estructura del grano y su composición química, incluido el contenido de humedad. El peso por unidad de volumen es un dato importante en todos los sistemas de calidad primarios, porque permite establecer un índice aproximado del rendimiento harinero, pero sin llegar a establecerse como un factor determinante (Posner & Hibbs, 1999).

Peso de 1000 granos. El peso del grano usualmente se expresa en gramos (g) por 1,000 granos (g/1,000-granos) y está en función del tamaño y densidad del grano. Cuanto más grande y densa es la cariósida, se espera que la proporción de endospermo sea mayor, prevaleciendo una relación más precisa con el rendimiento de harina respecto a la prueba de peso por volumen. A mayor peso de los granos, se comprende mayor densidad y mayor rendimiento de harina. La prueba es sencilla y rápida, ya que utiliza un contador semiautomático de granos, los cuales se pesan analíticamente determinando su peso (Posner & Hibbs, 1999).

Contenido de humedad. Actualmente se reconoce la necesidad de medir y controlar el contenido de humedad en el grano de trigo para prolongar su tiempo de conservación y mantener un nivel económico competitivo durante su comercialización. Por lo tanto, las técnicas de medición deben ser efectivas, rápidas y seguras durante la evaluación (Chua et al., 2007).

La determinación del contenido de humedad es una de las consideraciones más importantes en relación a la calidad del trigo. El contenido de humedad del grano se expresa en términos de porcentaje y aunque no determina su grado de calidad, éste parámetro se debe reportar en todas las muestras con fines informativos. El contenido de humedad tiene una importancia directa con el valor económico del producto, porque se relaciona inversamente con el contenido de materia seca (Halverson & Zeleny, 1988).

Se reconocen métodos directos e indirectos para la determinación del contenido de humedad en el grano, los cuales a su vez se pueden efectuar en grano molido, o en el mejor de los casos, en el grano entero. Los métodos indirectos ocupan sólo unos minutos para determinar el contenido de humedad y se basan en el principio de la conductancia o capacitancia eléctrica, sin embargo, eventualmente deben ajustarse a una curva de calibración obtenida por algún método directo. Los métodos más confiables se llevan a cabo en grano entero.

Contenido de proteína. En términos generales, el contenido de proteína es el resultado del análisis del contenido total de nitrógeno. El paso de digestión en el análisis de nitrógeno generalmente involucra: 1) el uso de un ácido oxidante para transformar todos los compuestos nitrogenados (principalmente la proteína) en amoníaco por subsecuente cuantificación mediante titulación en el método Kjeldahl o, 2) pirolisis de los compuestos nitrogenados a gas nitrógeno por el método de Dumas (Bekes et al., 2004).

Actualmente, la espectroscopía de infrarrojo cercano es un método rutinario utilizado para determinar el contenido de proteína del grano y puede aplicarse en el grano entero como transmisión de infrarrojo cercano (NIT, por sus siglas en inglés) o durante la molienda como reflectancia de infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés). Estos métodos ‘instantáneos’ realizan un escaneo de la muestra en el espectro infrarrojo determinando la absorbancia a

cierta longitud de onda, y registran el contenido de proteína por comparación con un lote de muestras pre-calibrado. Por lo tanto, estos métodos son comparativos y dependen de un método alternativo de referencia basado en la determinación del contenido de nitrógeno total.

Es factible utilizar el contenido de nitrógeno como un indicador cuantitativo del contenido de proteína, debido a que otros compuestos que contienen nitrógeno representan componentes mínimos en el grano de trigo. El factor 5.7 se utiliza generalmente para convertir el resultado del análisis de nitrógeno a contenido de proteína; este factor es más bajo que el factor normal de 6.25 utilizado para granos diferentes al trigo, reflejando el elevado nivel de aminoácidos ricos en nitrógeno (como la glutamina) en el gluten. La mayoría de los métodos para analizar la estructura y composición de las proteínas involucran extracción, siendo importante considerar que los resultados pueden llegar a ser diferentes dependiendo del medio en el que se realicen (Bekes et al., 2004).

El contenido no debe considerarse como un indicativo directamente proporcional a la calidad de proteína, ya que la evaluación de ésta última obedece a otros factores y métodos (Halverson & Zeleny, 1988).

Contenido de ceniza. Las cenizas son los residuos inorgánicos remanentes del grano (o harina) después de su incineración y se expresan como porcentaje de la muestra original. El contenido de ceniza se debe corregir a su correspondiente valor en base seca para poder realizar comparativos. El mayor contenido de sustancias minerales del grano se encuentra en la capa aleurona, las capas superficiales (salvado) y en mínima escala en el endospermo. El gradiente del contenido de ceniza se incrementa del centro a las partes más superficiales del grano. Algunos elementos minerales presentan correlación con el contenido de proteína, tanto en harina como en salvado (Possner & Hibbs, 2009).

Un elevado contenido de cenizas en el grano no debe interpretarse forzosamente como factor determinante para alcanzar un elevado contenido de cenizas en la harina y viceversa. En general, las cenizas por sí mismas no afectan las propiedades de la harina, sin embargo, conocer su contenido en grano y en productos intermedios de molienda, puede ser importante como herramienta en el control de procesos (Possner & Hibbs, 2009).

Proceso de Molienda

Generalidades

La mayor cantidad de trigo que se produce en el mundo se utiliza principalmente para la producción de harina refinada. El objetivo principal de la molienda de trigos harineros consiste en separar el endospermo del salvado y el germen, procurando la menor cantidad posible de estos dos últimos compuestos en la harina producida (Prabhasankar et al., 2000; Haddad et al., 1999).

De manera general, el proceso de molienda consiste en tres operaciones fundamentales: la ruptura del grano mediante un sistema de quiebra, la clasificación de partículas de acuerdo a su tamaño (separación de los tres componentes anatómicos) y la reducción del tamaño de las partículas de semolina y harina gruesa en harina fina, intentando alcanzar el mayor rendimiento de harina posible, sin demeritar sus propiedades de calidad (Belderok et al., 2000). A partir de las tres operaciones fundamentales de molienda combinadas, se obtiene en promedio un 75% de harina y 25% de salvado y otros subproductos (Prabhasankar et al., 2000; Kamil et al., 2011).

Las distintas fracciones obtenidas se tamizan propiciando que el endospermo se reduzca de tamaño de manera progresiva hasta obtener la granulometría deseada de una harina (malla US -100) o semolina (malla US 80 a +100) (Serna, 2003).

Producción de harina

El proceso de molienda inicia desde el momento de la recepción del grano en la planta molinera. El lote se transfiere a un almacén o silo identificando sus principales características y atributos. Durante su descarga, el grano se pre-limpia removiendo los contaminantes de mayor tamaño. El grano limpio se separa de sus contaminantes de menor tamaño y de los más ligeros, utilizando para ello un flujo de aire a contracorriente (Bass, 1998; Dexter & Sarkar, 2004).

El trigo puede molerse por lotes individuales, o bien, previamente pueden realizarse mezclas entre diferentes lotes de grano con el objetivo de generar atributos de calidad específicos en la

harina, de acuerdo a las características particulares de cada lote. Sin embargo, en caso de mezclar trigos de diferentes lotes, variedades o grupos, será necesario considerar durante todo el proceso las características de la nueva mezcla, tales como el contenido de humedad, contenido de proteína y tiempo de acondicionamiento, a fin de controlar adecuadamente la calidad y características finales de la harina (Callejo, 2002).

De acuerdo a Possner & Hibbs (1999), el acondicionamiento de trigo consiste en la preparación del grano previo a su molienda mediante la remoción o adición de agua seguida por un periodo de reposo. El acondicionamiento es una de las etapas más importantes durante la molienda, porque influye directamente en el rendimiento y calidad de la harina, ambos factores de consideración en el costo del producto. De igual forma, Dubois & Juhué (2000) señalan que el nivel de agua requerido en el acondicionamiento del trigo dependerá básicamente del contenido inicial de humedad en el grano y de su dureza, la cual se relaciona a su vez con la estructura del grano.

Generalmente se recomienda ajustar el contenido de humedad del grano entre 16% y 16.5%. El agua debe distribuirse tan uniformemente como sea posible, para lograr una adecuada homogenización con la masa de granos. La penetración y absorción del agua por el grano facilita la separación del endospermo y el salvado. Una vez adicionada la cantidad de agua necesaria en un lote, debe transcurrir un periodo de reposo que básicamente dependerá del tipo de trigo, aunque un periodo promedio de 24 horas se considera apropiado (Dubois & Juhué, 2000).

El proceso de molienda comprende cuatro sistemas: 1) sistema de quiebra, el cual separa el endospermo del salvado y el germen; 2) sistema de separación, que clasifica las partículas pequeñas de salvado y el endospermo de mayor tamaño; 3) sistema de reducción, que reduce el endospermo a harina; y 4) sistema de colas o restos, que separa la fibra del endospermo recuperado de los otros tres sistemas. Las características de calidad de las partículas de la harina están fuertemente determinadas por el sistema de reducción. Los efectos más obvios son la cantidad de almidón dañado en la harina y las variaciones en el color debido a la presencia de partículas de salvado. Los sistemas más modernos de molienda consisten en

molinos de rodillos (estriados en el sistema de quiebra y lisos en el sistema de reducción) aunados a un sistema eficiente de tamizado y purificación (Callejo, 2002).

Criterios fisicoquímicos de calidad en harina

Asegurar la calidad y características de la harina es de gran importancia en la industria molinera. La elaboración de productos terminados se considera la forma más segura y efectiva para la evaluación de la calidad harinera. Desafortunadamente, en ocasiones sólo se cuenta con poca cantidad de muestra, hecho que limita la elaboración de productos. Existen diversos análisis fisicoquímicos predictivos y complementarios utilizados frecuentemente en la industria molinera para evaluar la calidad de las harinas. La calidad de una harina representa la conformidad de varios atributos medibles y que son significantes en términos de su uso final (Colombo et al., 2008).

La prueba física más común es la determinación de color, la cual se realiza con colorímetros tipo Hunter Lab, Kent-Jones o Agron, siendo ésta última la más practicada considerando el método AACCI 14-30 (Serna, 2009). La determinación del color puede aprovecharse en dos formas. Primero para medir la blancura, la cual determina en cierta forma el color en la harina en función de ciertos compuestos removidos o blanqueados. En segundo lugar, el color se puede medir ignorando la blancura, centrándose en la influencia que tiene el color de las partículas de salvado (Mailhot & Patton, 1998).

Por otro lado, son diversos los análisis químicos practicados a las harinas, destacando el contenido de humedad, ceniza y grasa (Serna, 2009). Es necesario determinar el porcentaje de humedad de la harina para realizar otros ensayos de calidad y/o para ajustar los valores reportados de base húmeda a base seca y viceversa. El método aprobado que comúnmente se utiliza para determinar el contenido de humedad en una harina es el 44-15 (AACCI).

El contenido de ceniza (minerales) de una harina ha sido considerado como una medida de calidad importante. El método más usual empleado para su determinación es el 08-12 (AACCI). De acuerdo con Kim & Flores (1999), la pureza de una harina tradicionalmente se expresa en contenido de ceniza. Menor contenido de ceniza en la harina indica menor presencia de salvado y germen. El contenido de minerales de la harina por sí mismo no se

considera un buen indicador de calidad panificable, pero a partir de su contenido es posible estimar un índice del grado de refinamiento durante su procesamiento. De hecho, algunos sectores de la industria molinera insisten en que el contenido de ceniza debería ser una especificación para determinar cierto grado de calidad en una harina.

La evaluación de la cantidad de grasa (Método AACCI 30-10) y fibra (Método AACCI 32-10) son ensayos menos practicados, debido a que su determinación es más complicada (Serna, 2009).

Calidad de proteína

La caracterización de las proteínas del trigo considerando sólo su contenido, implica una pérdida importante de información relacionada con su composición. Esta información se pierde directamente durante el análisis del contenido de nitrógeno total por cualquier método empleado. Existe una pérdida de información acerca de las interacciones proteína-proteína como resultado de la extracción de proteína en soluciones diluidas de harina o masa, especialmente si al hacerlo se rompen los enlaces disulfuro (Bekes et al., 2004).

De manera general, la calidad está determinada por la estructura molecular de las proteínas de almacenamiento, las cuales a su vez controlan la interacción entre proteínas durante procesos como el de panificación (Gianibelli et al., 2001).

Los trigos suaves y fuertes poseen calidades muy diferentes entre sí, sin embargo, la mayoría de las investigaciones realizadas sobre las proteínas de trigo, estudian principalmente aquellas relacionadas con los trigos fuertes. El contenido de proteína en las harinas suaves por lo general es bajo (7-8%), lo que ha sugerido que la calidad de proteína en este tipo de trigo sea más importante que su contenido. En las harinas provenientes de trigo fuerte, la funcionalidad de las proteínas juega un papel muy importante, principalmente durante la producción de volumen en productos de panificación (HadiNezhad & Butler, 2009).

De acuerdo a Gras et al. (2001), un gramo de harina de trigo harinero está conformado en promedio por 120 mg de proteína, 710 mg de almidón, 50 mg de lípidos y 120 mg de agua. Del total de proteína, 39 mg corresponden a gluteninas de bajo peso molecular (G-BPM), 9

mg a gluteninas de alto peso molecular (G-APM), 48 mg de gliadinas y 24 mg de globulinas (Figura 2).

Las gluteninas son proteínas poliméricas cuyas subunidades se entrelazan intermolecularmente por puentes disulfuro y de hidrógeno, incrementando considerablemente su peso molecular. Se conforman por dos grupos de subunidades: las de alto peso molecular (G-APM) y las subunidades de bajo peso molecular (G-BPM) (Gianibelli et al., 2001).

Las G-APM juegan un papel muy importante, al ejercer mayor influencia sobre la fuerza y elasticidad del gluten. Las subunidades G-APM son codificadas por genes en tres *loci* genéticamente diferentes, Glu-A1, Glu-B1 y Glu-D1, localizados en los cromosomas 1A, 1B y 1D, respectivamente. Las subunidades de gluteninas se pueden separar de acuerdo a su peso molecular y movilidad en sistemas electroforéticos de geles de policrilamida en presencia de dodecil sulfato de sodio (SDS-PAGE, por sus siglas en inglés). Los grupos de separación son A, B y C, pudiéndose establecer un grupo D que incluye subunidades con movilidad entre los grupos A y B. El grupo A incluye las G-APM, mientras que los grupos B, C y D las G-BPM (Figuroa et al., 2009).

Martínez-Cruz et al. (2010) han señalado que las G-BPM representan alrededor de una tercera parte del total de las proteínas y aproximadamente 60% del total de las gluteninas. Sin embargo, a pesar de su abundancia, estas subunidades han recibido menor atención en su estudio por parte de los investigadores, porque resulta difícil identificar subunidades de G-BPM y gliadinas en geles de policrilamida en presencia de SDS-PAGE, debido a que muestran entre sí patrones de movilidad electroforética similares, además de existir ligamiento genético entre las G-BPM y las γ - y ω -gliadinas. Sin embargo, se han desarrollado protocolos de electroforesis que han facilitado la identificación de G-BPM y gliadinas.

Las gliadinas son prolaminas monoméricas (Gianibelli et al., 2001) y se dividen a su vez en tres grupos de acuerdo a su contenido de azufre y peso molecular en: α -, β -, γ - y ω -gliadinas (Islas et al., 2005). Las gliadinas contribuyen principalmente a la viscosidad y extensibilidad de la masa, efecto importante, ya que se requiere de un balance entre fuerza y extensibilidad de la masa de acuerdo al procesamiento o producto a elaborar (Wrigley et al., 2009).

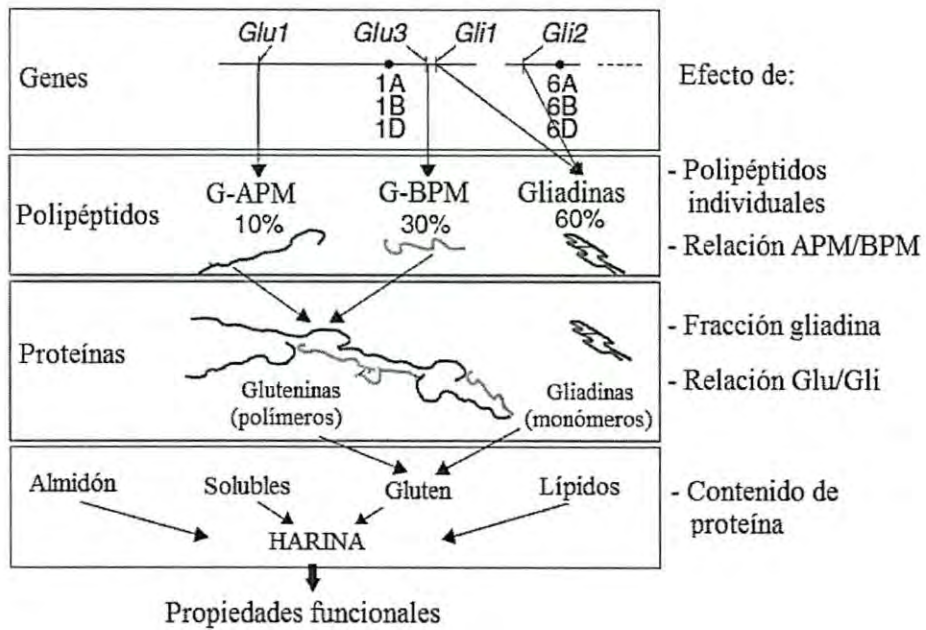


Figura 2. Relación entre los componentes individuales de la harina, especialmente sus fracciones proteicas.
Fuente: Adaptado de Bekes et al. (2004).

Sin embargo, poco se conoce sobre el efecto individual de las gliadinas y G-BPM, por lo que la identificación de estos componentes genéticos es necesaria para entender su influencia en la calidad (Martínez-Cruz et al., 2010).

Algunas combinaciones alélicas son más favorables para producir gluten con mayor fuerza, mientras que ocurre lo contrario con otras combinaciones alélicas. Entre las gluteninas que tienen influencia sobre la fuerza de gluten se encuentran las subunidades 1, 2*, 7+8, 17+18 y 5+10, con efecto positivo; las subunidades 7+9 y 2+12, con efecto intermedio, y las subunidades 0, 20, 13+19, 3+12 y 4+12, con efecto negativo (Espitia et al., 2008).

El análisis y evaluación de la calidad de las proteínas del trigo es diverso, siendo el solvente con que se extrae a la proteína y el sistema analítico utilizado para separar las distintas fracciones proteínicas, los principales factores que determinan su separación y cuantificación. Los sistemas analíticos más utilizados son la cromatografía líquida de alta resolución (HPLC, por sus siglas en inglés) en su modalidad de fase inversa, de interacción hidrofóbica y de exclusión por tamaño, así como los sistemas electroforéticos con dodecil sulfato sódico principalmente en geles de poliacrilamida (SDS-PAGE) (Islas et al., 2005).

Gluten. El gluten es una red de proteínas insolubles que se forma como consecuencia del amasado entre la mezcla harina-agua. El gluten se conforma por G-APM, G-BPM y gliadinas que le confieren a la masa capacidades y propiedades viscoelásticas y reológicas (fuerza, extensibilidad, viscosidad y elasticidad) únicas, las cuales a su vez determinan la calidad del producto final (Dobraszczyk, 2004a).

El gluten se obtiene por lavado de la masa con agua corriente o con solución salina diluida, considerando su insolubilidad. Durante el lavado es conveniente realizar un amasado continuo y ligero para remover la mayor cantidad posible de almidón (Abang et al., 2008). El método más utilizado para obtener y determinar el contenido de gluten húmedo de una harina es el 38-12 (AACCI) que utiliza un equipo semiautomático de lavado y amasado.

De acuerdo a Veraverbeke & Delcour (2002), los factores que contribuyen a la baja solubilidad del gluten son el mínimo contenido de aminoácidos con lado ionizable en sus

cadenas, así como el alto contenido de aminoácidos no polares y de glutamina. Sin embargo, la solubilización completa de las proteínas del gluten sin afectar su estructura nativa, no es posible.

Volumen de sedimentación. Uno de los análisis más sencillos que se utilizan para determinar la calidad de proteína de una harina es el índice de sedimentación (o prueba de Zeleny), el cual permite cuantificar el volumen de sedimentación de una suspensión de harina en ácido láctico diluido. El sedimento obtenido se relaciona con el hinchamiento de las gluteninas, hecho que se asocia íntimamente con la calidad panificable de la harina. La relación entre el volumen de sedimentación y la calidad de proteína, es directamente proporcional (Colombo et al., 2008).

Industria de la Panificación

Generalidades y formulación

La Norma Oficial Mexicana NOM-147-SSA-1996 establece que al producto que resulta de hornear una masa obtenida de harina fermentada por acción de leudante, agua y sal con adición o no de otros ingredientes, se le llama pan. Debido a su importancia ancestral, el pan es ciertamente uno de los productos alimenticios más estudiados. De acuerdo a Mondal & Datta (2008), se estima que el primer pan fue elaborado hace unos 10,000 años A.C. y que se obtuvo a partir de experimentos deliberados realizados con agua y harina.

Sommier et al. (2005) consideran que los diversos fenómenos dinámicos que gobiernan la transición de un sólido dividido (harina de trigo) a un medio continuo (masa) y luego a un sólido suave (pan) ofrecen un amplio campo de investigación, debido a la complicada y compleja comprensión de los cambios que ocurren durante todo el proceso. Los cambios moleculares más importantes son la agregación de las proteínas y la gelatinización del almidón, mientras que la expansión, el incremento de volumen y la transición de la masa en pan, propiamente dicho, son las características macroscópicas más relevantes. Actualmente las formulaciones para elaborar pan son variadas y diversas, sin embargo, la harina y el agua son los ingredientes más significativos en cualquier receta de pan, debido a que ambos ingredientes influyen directamente en la textura de la miga y la corteza de cada pieza.

En una formulación panadera, la cantidad de harina requerida se considera como 100%, mientras que la proporción (porcentaje) del resto de los ingredientes está en función del peso de la harina. Dentro de los ingredientes que además de la harina y el agua forman parte de una receta mínima para obtener un pan con buenos atributos de calidad, se encuentran la sal, el azúcar y la levadura (*Saccharomyces cerevisiae*). El pan es un producto fermentado, debido precisamente al efecto fermentativo de los azúcares liberados de la harina de trigo a partir del almidón por la acción de las enzimas naturales de la harina, así como por la acción de las levaduras adicionadas para este fin (Sommier et al., 2005).

Durante la fermentación, los azúcares se convierten en agua (vapor) y CO₂, los cuales se expanden debido a la alta temperatura y son retenidos en el interior de la masa gracias a la presencia y propiedades del gluten. Mondal & Datta (2008) señalan que el azúcar se adiciona como iniciador del proceso fermentativo, mientras que la sal se adiciona para dar fuerza al gluten, así como para controlar la acción de la levadura durante la expansión de la masa.

Procesamiento

Los procesos industriales de panificación son altamente mecanizados y requieren de un estricto control de calidad de la harina de trigo, debido a que afecta algunas variables del proceso y calidad del producto terminado. Serna (2003) refiere que durante la manufactura del pan se realizan los siguientes pasos básicos: premezcla de ingredientes, amasado, fermentación, prensado/desgasado/formado, fermentación final y horneado. La manufactura industrial del pan por lo general se realiza por cualquiera de los siguientes métodos: panificación directa, proceso de esponja o esponja-líquida, o método continuo. Las formulaciones son distintas para cada proceso.

El proceso de esponja es el más practicado a nivel industrial, ya que presenta diversas ventajas tales como menor tiempo de amasado y en especial, porque se producen panes con mejor sabor y textura interna.

La panificación directa se practica por lo común en pequeñas panaderías y consiste en la mezcla de todos los ingredientes y el seguimiento de la masa hasta su transformación en el

producto terminado. Suele ser un proceso largo debido a los tiempos de reposo durante la fermentación.

Los sistemas continuos son muy mecanizados, requieren de ingredientes líquidos y de un tiempo menor de fermentación. Requiere menos mano de obra, pero de un estricto control en la calidad de la materia prima y condiciones de proceso (Serna, 2003).

Calidad del pan

Generalidades. La calidad del pan es muy difícil de predecir a partir de las características del grano, harina o masa. En muchos programas de reproducción de semillas, cientos de nuevas líneas se verifican cada año buscando encontrar trigos de alta calidad aptos para panificación. La habilidad para estimar la calidad panadera utilizando muestras limitadas puede resultar muy benéfica en dichos programas. Adicionalmente, si la calidad panadera se pudiera predecir rápidamente a partir del grano o la harina, la industria molinera y panadera podrían ajustar sus procesos y maximizar los beneficios para dar a los consumidores una calidad deseable y consistente en sus productos. Diversas investigaciones han intentado predecir la calidad del pan mediante la combinación de mediciones en grano, harina o masa utilizando modelos predictivos, sin llegar hasta el momento a resultados ampliamente convincentes (Dowell et al., 2008).

Derivado de lo anterior, uno de los principales objetivos en la ciencia de los cereales ha sido desarrollar procedimientos que permitan evaluar el potencial de las harinas para elaborar productos de panificación sin la necesidad de llevar a cabo una prueba estándar de horneado (MacRitchie, 2014). Sin embargo, ninguna prueba o método utilizado actualmente, tales como el volumen de sedimentación, el número de caída (falling number) o la determinación de subunidades de glutenina de alto peso molecular, por citar algunas, ofrecen resultados confiables para predecir la calidad panadera de una determinada variedad o línea de trigo; además, suelen ser ensayos lentos y técnicamente difíciles para ser considerados como prueba de calidad rápida. Por otro lado, muchos de los instrumentos y pruebas desarrolladas para la evaluación de las características y propiedades de la masa son empíricas, por lo que resulta difícil establecer correlaciones con otras mediciones objetivas (Figueroa et al., 2012).

Envejecimiento del pan. Desde el momento en que un pan sale del horno inician una serie de cambios adversos que reducen la aceptación del producto por parte del consumidor. El cambio más significativo se conoce bajo el término de ‘envejecimiento’ o ‘staling’. El envejecimiento o staling incluye todos los procesos o cambios en la corteza y la miga durante el almacenamiento, siendo el más evidente el incremento de la firmeza de la miga (endurecimiento), fenómeno asociado estrechamente con la pérdida de la frescura. El proceso de envejecimiento involucra la disminución de la movilidad del agua debido a la re-asociación de polímeros y la cristalización de la amilopectina (Curic et al., 2008). Otros fenómenos relacionados con el envejecimiento del pan incluyen: cambios en el contenido de humedad, migración de la humedad dentro del producto y posibles interacciones entre el almidón y el gluten (Patel et al., 2005), así como cambios notables en el sabor, aroma (Primo-Martín et al., 2006) y color.

Para lograr una mejor comprensión sobre las consecuencias de la recristalización del almidón en la calidad del pan, es importante estudiar los cambios en las propiedades mecánicas de la miga del pan. En algunos estudios, las propiedades mecánicas del pan han sido evaluadas determinando la relación esfuerzo-deformación aplicando deformaciones relativamente altas. De acuerdo con la teoría de Ashby y Gibson, el pan tiene una estructura porosa, definida como ‘celular’. Más aún, se distinguen sólidos ‘celulares’ con células abiertas (como una esponja) y sólidos ‘celulares’ con células cerradas (como espuma). Sin embargo, la estructura de la miga del pan está lejos de ser un material ideal en cualquiera de los dos casos, debido a la amplia variación en el tamaño de las células de gas y las densidades locales (Keetels et al., 1996).

La Figura 3 representa una curva típica de una esponja ideal cuando se comprime. Al principio, la curva se deforma linealmente como material elástico (región I). Al continuar la compresión, ocurre una flexión o pandeo de la curva indicando una deformación plástica o quebradiza. La flexión se recupera parcialmente indicando una zona elástica, mientras que la deformación plástica o quebradiza es irreversible (la estructura colapsa, región II). Finalmente, hay una región en la cual el esfuerzo aumenta rápidamente, lo que propicia el incremento de la deformación debido a la fuerte compactación del material (región III).

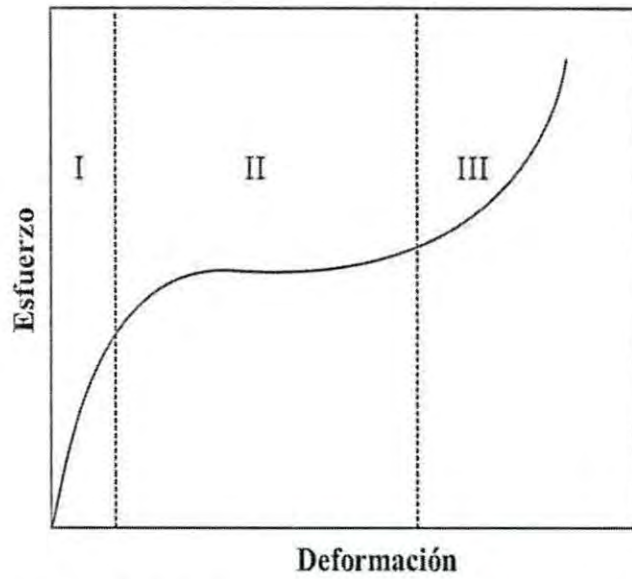


Figura 3. Representación esquemática de una curva típica esfuerzo-deformación en sólidos celulares.

Fuente: Adaptada de Keetels et al. (1996).

Por ejemplo, un pan fresco llega a presentar una recuperación cercana al 85% después de una deformación del 50%, lo cual se manifiesta en la frontera de las regiones II y III de la misma Figura 3. Debido a la limitada cantidad de agua presente en el pan, los gránulos de almidón están sólo parcialmente gelatinizados e hinchados. Por lo tanto, sólo una porción de las moléculas de amilosa permanece fuera de los gránulos. Tanto la amilosa como la amilopectina están presentes en los gránulos hinchados. Es en este nivel donde los cambios estructurales ocurren durante el almacenamiento. Lo anterior muestra que la estructura del pan es muy compleja, porque hay diferentes estructuras específicas a diferentes niveles y escalas. Esto dificulta relacionar la recristalización de la amilopectina con los cambios en las propiedades mecánicas de la miga durante el envejecimiento (Keetels et al., 1996).

Puede afirmarse que el envejecimiento o staling del pan afecta notablemente su textura, considerándose el principal problema del pan durante el almacenamiento. La firmeza del pan medida por compresión utilizando un analizador de textura, es el método más común para evaluar los efectos del envejecimiento en el pan (Xie et al., 2003). La firmeza de la miga del pan se expresa como la fuerza máxima necesaria para comprimir la muestra hasta ejercer cierta deformación controlada. Una fuerza mínima indicará una textura suave del producto. En otras palabras, la firmeza correlaciona negativamente con la suavidad o frescura del pan.

Textura. La textura se define como la manifestación de la estructura de un alimento. La forma en la cual esa estructura reacciona a una fuerza aplicada, representa la conjunción de los atributos mecánicos, geométricos y superficiales del producto, percibidos a través de receptores mecánicos, táctiles, visuales y auditivos. Por otra parte, la textura se relaciona con la deformación, desintegración y flujo del alimento cuando se aplica una fuerza (Bourne, 2002; Maldo & Conti-Silva, 2014).

La textura puede medirse por medio de pruebas objetivas (instrumentales) y subjetivas (sensoriales). Dentro de los diferentes dispositivos instrumentales que existen para evaluar la textura, el analizador de textura imita las condiciones de masticación y presenta buenas correlaciones respecto a la evaluación sensorial. Por esta razón, este equipo se utiliza ampliamente en diferentes tipos de alimentos para determinar sus características o perfil de textura (Maldo & Conti-Silva, 2014).

La calidad del pan se considera dependiente de las características de textura de la miga. Como ya se ha establecido, la miga tiene una estructura reológica razonablemente compleja, en la cual prevalecen principalmente propiedades viscosas y elásticas; por lo tanto, se considera viscoelástica. Sin embargo y en cierta medida, también puede observarse un comportamiento plástico. A nivel macroscópico, la miga del pan está conformada por dos fases, una sólida y una líquida. Si se observa transversalmente la miga, la fase sólida está enteramente conectada, mientras que las células de aire se encuentran aisladas. Dependiendo del volumen de cada fase y de su fuerza de unión, se determinan su estructura y propiedades mecánicas (Lacko-Bartošová & Korczyk-Szabó, 2013).

El análisis de textura en primera instancia evalúa mecánicamente las características del material sometido a la acción de una fuerza controlada, a partir de la cual como respuesta se genera una curva de deformación. Por otro lado, el análisis de textura del pan además de considerarse como una evaluación mecánica, es al mismo tiempo una determinación física objetiva de sus características, mientras que las pruebas reológicas y viscoelásticas de la masa ofrecen información sobre la capacidad panificable de la harina, vista como materia prima (Lacko- Bartošová & Korczyk-Szabó, 2013).

Las diferencias en la textura del pan se deben principalmente a aspectos o factores relacionados con los cambios que sufren componentes como el almidón, los lípidos y el agua, los cuales afectan principalmente la firmeza. Sin embargo, los atributos de textura normalmente se asocian a la combinación del efecto de varios parámetros físicos que ocurren durante el almacenamiento (Gámbaro et al., 2002).

En este contexto, el análisis de textura es uno de los métodos analíticos más útiles para cuantificar los efectos de la harina y los aditivos sobre las propiedades físicas de la corteza y miga del pan, además de que es posible determinar los efectos del tiempo de almacenamiento sobre la textura del producto.

Reología y Viscoelasticidad en Cereales

Generalidades

El concepto de reología se acredita a Eugene C. Bingham (1928), quien para acuñar esta definición se apoyó en el término “todo fluye”, derivado de los griegos. Actualmente se define a la reología como la ciencia que estudia la deformación y flujo de la materia: trata la manera en la cual los materiales responden a la aplicación de un esfuerzo o deformación. Por lo tanto, cuando la acción de fuerzas resulta en una deformación y flujo en el material, las propiedades mecánicas pueden ser referidas como propiedades reológicas (Steffe, 1996).

Así, las propiedades mecánicas se definen como aquellas que guardan una relación con el comportamiento de un material bajo la aplicación de fuerzas. En este sentido, el comportamiento esfuerzo-deformación de un material bajo carga estática y dinámica exhibirá ciertas características ya sea en el aire o en el agua, lo que se puede clasificar como propiedades mecánicas. Por otra parte, la reología considera el efecto del tiempo mientras permanece una carga en el material. Reológicamente entonces, el comportamiento mecánico de un material se expresa en término de tres parámetros: esfuerzo, deformación y tiempo. Todos los materiales exhiben propiedades reológicas que pueden ser estudiadas en diversas áreas (Mohsenin, 1986).

Los objetivos generales de las mediciones o evaluaciones reológicas son: a) obtener una descripción cuantitativa de las propiedades mecánicas del material; b) obtener información relacionada a la estructura molecular y composición del material; y c) caracterizar y simular el comportamiento del material durante su procesamiento y control de calidad (Dobraszczyk & Morgenstern, 2003).

Conceptos reológicos fundamentales

El estudio de los materiales puede tener un buen inicio a partir de la aplicación de los principios y conceptos fundamentales de su comportamiento mecánico y reológico, tales como los que a continuación se definen brevemente:

Deformación (Strain). Se define a la unidad de cambio en tamaño o forma de un material ($\Delta L/L$), debido a la aplicación de una fuerza, respecto a su tamaño o forma original. Es una

medida adimensional comúnmente representada por (ϵ). La deformación axial es una deformación lineal en un plano paralelo al eje longitudinal del material.

Esfuerzo (stress). Es la intensidad de la fuerza manifiesta en un punto del cuerpo o material producida por tensión, compresión o corte. Se expresa en unidades de fuerza por unidad de área (F/A), comúnmente en Pascales (N/m^2). Un esfuerzo uniaxial se representa bajo el símbolo sigma (σ).

Elasticidad. Capacidad de un material para recuperarse de una deformación por efecto de la acción de fuerza.

Plasticidad. Capacidad de un material para conservar una deformación permanente.

Viscosidad. Resistencia al flujo de un material.

Viscoelasticidad. Combinación del comportamiento sólido-líquido, en el cual la relación esfuerzo-deformación es dependiente del tiempo.

Viscoelasticidad lineal. Comportamiento viscoelástico en el cual la relación esfuerzo-deformación es una función del tiempo y no de la magnitud del esfuerzo.

Módulo de elasticidad o módulo de Young. Relación o cociente del esfuerzo respecto a la deformación. Se simboliza como E .

Límite elástico. Esfuerzo máximo al cual un material es capaz de mantenerse sin deformación permanente, mientras permanece el esfuerzo.

Punto de cedencia (yield point). En una curva esfuerzo-deformación o fuerza deformación, es el punto en el cual ocurre un incremento en la deformación con incremento o no de la fuerza. En algunos materiales agrícolas, este punto es un indicativo de la ruptura inicial de la estructura celular (Menjivar, 1990; Rao & Quintero, 2005).

Comportamiento de materiales ideales

Generalidades. Se considera que existen básicamente dos tipos de deformación: deformación elástica y flujo. A su vez, el flujo puede dividirse en flujo plástico y flujo viscoso. Por lo tanto, elasticidad, plasticidad y viscosidad son tres unidades fundamentales por las cuales el comportamiento reológico de un material puede describirse. Los tres cuerpos ideales clásicos que representan estas propiedades son el sólido de Hooke, el sólido de St. Venant y el líquido Newtoniano, respectivamente. Debido a que no existen materiales reales con comportamiento perfectamente elástico o plástico, los tres cuerpos ideales se han elegido como estándares de comparación en el análisis del comportamiento de cualquier material (Mohsenin, 1986).

La clasificación de los materiales de acuerdo a su comportamiento reológico y sus respectivas curvas se muestran en la Figura 4.

Elástico (sólido de Hooke). Es aquel en el que un sólido se deforma instantáneamente por efecto de una fuerza o carga recibida, la cual al ser retirada permite que el material recupere su estructura original de manera inmediata. Los materiales elásticos obedecen la ley de Hooke, donde el esfuerzo (σ) es directamente proporcional a la deformación (ϵ). La constante de proporcionalidad (E) se conoce como módulo: $\sigma = E(\epsilon)$ (Dogan & Kokini, 2007).

Plástico (St. Venant). Un material plástico se define como aquel que no sufre una deformación permanente hasta que cierto punto de esfuerzo se excede. Un cuerpo con comportamiento plástico perfecto no presenta elasticidad; bajo la influencia de pequeños esfuerzos no ocurre deformación. Cuando el esfuerzo se incrementa, el material de pronto puede iniciar su flujo a determinado esfuerzo inicial (σ_0). El material continúa su flujo a un mismo esfuerzo hasta que la carga se remueve; el material retiene una deformación total. Este comportamiento se representa con un bloque sólido que se fricciona respecto a una superficie fija (Dogan & Kokini, 2007).

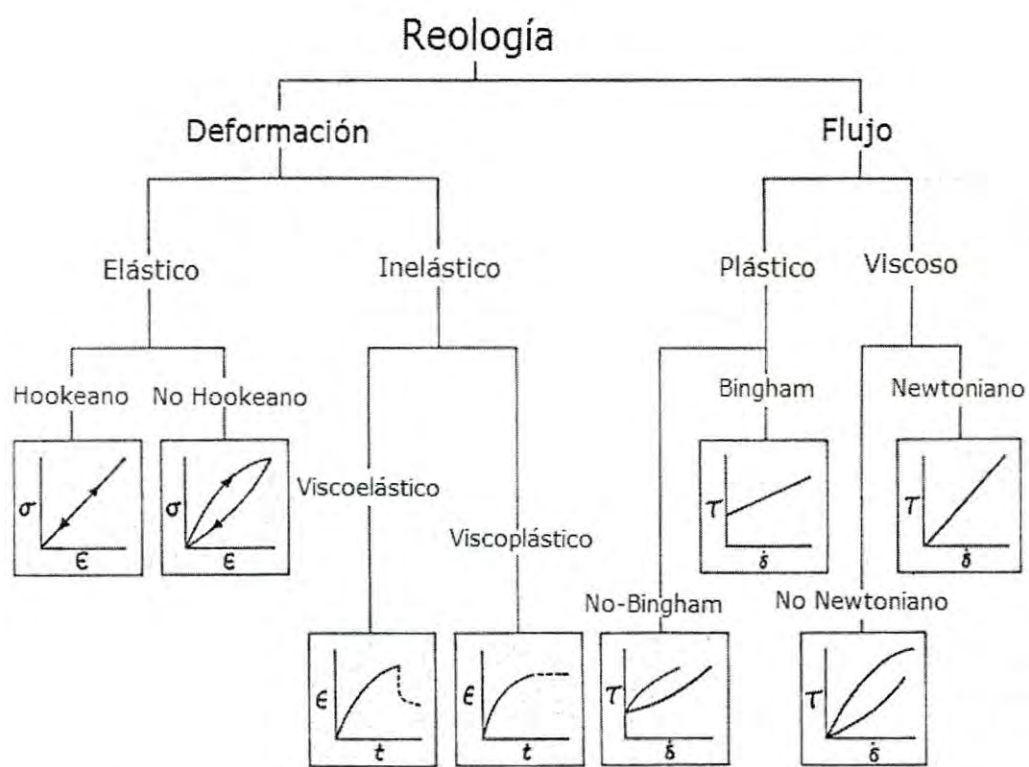


Figura 4. Clasificación de los materiales según su comportamiento reológico.
 Fuente: Mohsenin (1986).

Viscoso (líquido Newtoniano). En un líquido, la deformación y el flujo comienzan tan pronto como se aplique un esfuerzo de corte. En un líquido, la deformación es una función no sólo del esfuerzo, sino también del tiempo. Un fluido ideal se deforma a velocidad constante bajo la aplicación de un esfuerzo sin recuperar su configuración inicial cuando la carga se remueve. El flujo de un material viscoso simple se describe por la ley de viscosidad de Newton, dónde el esfuerzo de corte (τ) es directamente proporcional a la velocidad de corte ($\dot{\gamma}$). La constante de proporcionalidad (η) es llamada viscosidad Newtoniana: $\tau = \eta \dot{\gamma}$ (Mohsenin, 1986; Dogan & Kokini, 2007).

Viscoelástico. Los materiales viscoelásticos son los de comportamiento más complejo, ya que se encuentran entre sólidos elásticos y fluidos con cualquier comportamiento reológico. Ante la aplicación de un esfuerzo, un material viscoelástico responde deformándose instantáneamente con algún comportamiento elástico, la tensión aplicada produce una deformación. A partir del instante cero, el material fluye de acuerdo a un modelo reológico, de forma que la tensión se relaja al aproximarse el material a una nueva posición de equilibrio. A tiempo infinito, la tensión puede haberse relajado totalmente si el material fluye de acuerdo al modelo newtoniano, o bien, puede conservar un valor si el flujo es plástico general. Si el esfuerzo cesa en cualquier momento antes de la relajación, el material se retrotrae recuperando algo de su forma inicial (Núñez et al., 2001; Rao & Quintero, 2005).

Todo fluido tiene algo de comportamiento viscoelástico. Sin embargo, la viscoelasticidad sólo se hace notar cuando el tiempo de relajación es apreciable. El tratamiento de los materiales viscoelásticos es muy complejo y debe ser abordado de manera especial para cada caso específico integrando el comportamiento elástico y viscoso (flujo) en el modelo. Se han propuesto algunos modelos para este tipo de materiales, siendo las analogías de Maxwell y Kelvin (Figura 5) las que describen el comportamiento viscoelástico como un elemento viscoso (representado por un pistón) y otro elástico (representado por un resorte) dispuestos en serie o en paralelo (Núñez et al., 2001; Rao & Quintero, 2005).

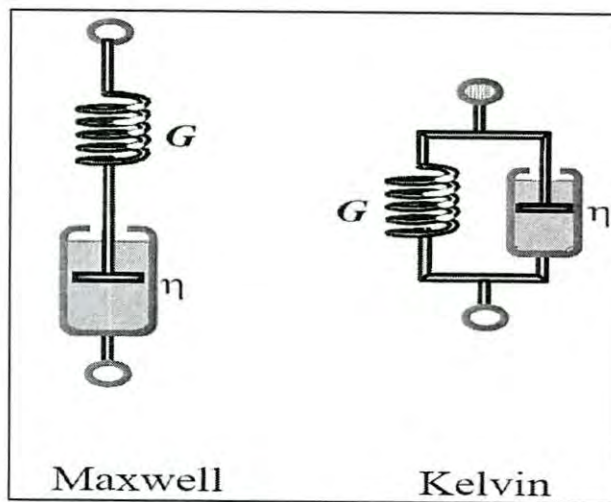


Figura 5. Modelos mecánicos viscoelásticos.
Fuente: Adaptado de Barnes (2000).

Existen diversas pruebas que pueden ser utilizadas para para el estudio viscoelástico de los materiales y determinar las relaciones entre esfuerzo, deformación y tiempo de acuerdo al tipo de carga aplicada. Como se ha mencionado antes, debe asumirse que la viscoelasticidad lineal es válida cuando se aplican esfuerzos suficientemente pequeños. Adicionalmente, la velocidad de deformación afecta directamente el comportamiento esfuerzo-deformación y cómo éste comportamiento puede explicarse en términos de modelos reológicos (Mohsenin, 1986).

Por otro lado, cualquier material presenta una desviación de los materiales ideales. Estas desviaciones pueden deberse en primera instancia a la relación entre el esfuerzo y la deformación para sólidos, así como al esfuerzo y velocidad de deformación para líquidos. En segunda instancia, la relación esfuerzo-deformación puede depender de la velocidad de deformación, así como de una mayor deformación derivada del tiempo. Esta dependencia del tiempo resulta en el comportamiento viscoelástico. En un material viscoelástico lineal, la velocidad del esfuerzo a deformación es una función sólo del tiempo y no de la magnitud del esfuerzo (Mohsenin, 1986).

Propiedades Reológicas y Viscoelásticas en Grano de Trigo

Generalidades

Los productos agrícolas deben ser considerados en sí mismos como sistemas biológicos, ya que difieren unos de otros. Estos materiales deben estimarse como 'vivos', debido a que constantemente sufren cambios en su forma, tamaño y otros aspectos. Durante su desarrollo y almacenamiento, las células de los biomateriales son sensitivas a factores externos como la humedad, oxígeno, temperatura y consumo de energía. Según la evidencia experimental, los productos agrícolas deben ser considerados como viscoelásticos (Mohsenin, 1986).

Los análisis realizados en granos enteros representan una alternativa de evaluación no destructiva, rápida, objetiva y complementaria a otros métodos, que pueden generar información interesante del estado original de la materia prima y de la posible funcionalidad del producto (Eckhoff et al., 1988). El estudio del comportamiento fuerza-deformación de granos en su estado natural, es un acercamiento interesante que provee mediciones y datos

objetivos (Khodabakhshian & Emadi, 2011) que pueden utilizarse en el mejoramiento de procesos aplicados específicamente en granos.

La elasticidad volumétrica de los materiales granulares se relaciona estrechamente con la elasticidad de los granos individuales. En este sentido, los granos de trigo poseen una forma geométrica compleja y la presencia en éstos de una hendidura pronunciada (surco) complican el estudio mecánico y reológico de sus propiedades. Para el análisis de un modelo a partir de un sólo grano, son tres las propiedades mecánicas necesarias: fuerza de ruptura, límite de deformación y el módulo de elasticidad o Young (Glenn et al., 1991).

Diversas investigaciones coinciden sustancialmente en la preponderante influencia y efecto que conllevan dos aspectos en referencia a la compresibilidad y elasticidad de los granos: la dureza y el contenido de humedad, e inclusive ambos parámetros.

Compresión uniaxial

Particularmente, las pruebas de compresión contribuyen sustancialmente en la determinación de las propiedades mecánicas y otros aspectos de control de calidad del grano, ya que por ejemplo, en sistemas en los que se maneja un flujo de granos el comportamiento mecánico del material no sólo debe centrarse al flujo en sí, sino también en la deformación resultante de los granos individuales (Afkari & Minaei, 2004; Raji & Favier, 2004).

La determinación de las propiedades mecánicas a partir de pruebas de compresión, inicia con la información que proporciona una curva fuerza-deformación. Evaluaciones como el límite elástico, punto de inflexión, punto de cedencia, ruptura, módulo de elasticidad, fuerza y resistencia máxima, se pueden obtener a partir de esta curva, ya que se basan en la aplicación de carga quasi-estática, más que en cargas de impacto (Cenkowski et al., 1991; Bargale & Irudayaraj, 1995; ASABE Standards, 2009). Durante la compresión de materiales agrícolas se aprecia que éstos no siguen la ley de Hooke, tal como ocurre con los materiales ideales, debido a que las propiedades de los primeros se ven más afectadas por factores como el contenido de humedad y la temperatura (Delwiche, 2000).

La respuesta esfuerzo-deformación de un grano a la compresión está determinada por dos aspectos principales: a) la forma y tipo de compresión aplicada (espacio entre superficies, velocidad, orientación de la muestra, entre otras); y b) las diferencias botánicas de las capas del grano al momento de su compresión (Anderssen & Haraszi, 2009). Durante los ensayos de compresión es importante tener en cuenta factores como el equipo de prueba, las condiciones específicas de preparación, la geometría de la muestra y la velocidad del ensayo, entre otros aspectos (ASABE Standards, 2009).

Las pruebas de compresión comúnmente se realizan a velocidad de deformación constante. Esto implica que dicho factor sea cada vez mayor, debido a la reducción progresiva de la longitud (altura). Lo anterior significa que, en caso de que se presente un dominio del mecanismo de fractura en el material, la curva esfuerzo-deformación mostraría una tendencia a declinar, a pesar de que la deformación y el efecto de la velocidad se incrementan. Por el contrario, si ocurre que domina el mecanismo de contacto, la curva mostraría un aumento en la inclinación hacia una velocidad mayor, lo que implicaría un aumento en la deformación (Molenda & Horabik, 2005).

El comportamiento mecánico de los granos bajo carga de compresión es dependiente del tiempo, por lo que la caracterización de éstos debe considerar los principios de la teoría viscoelástica. Esto debido a que los materiales viscoelásticos exhiben el fenómeno de esfuerzo-relajación, principalmente cuando se aplican esfuerzos suficientemente pequeños. Este comportamiento puede representarse por el modelo generalizado de Maxwell (Mohsenin, 1986; Singh et al., 1991; Bargale & Irudayaraj, 1995).

Waananen & Okos (1992) determinaron que la manera más directa de evaluar el esfuerzo-relajación es por medio de la aplicación de una deformación constante (comúnmente por compresión), midiendo el esfuerzo en función del tiempo. Las pruebas de velocidad de deformación constante, permiten determinar simultáneamente la pérdida de las propiedades de relajación. Khazaei & Mann (2005) establecieron que el tiempo de relajación determina cómo el material disipa el esfuerzo después de que fue aplicada una deformación rápida y repentina, por lo que el resultado de la prueba de relajación puede ser útil para estimar la susceptibilidad al daño del material.

El comportamiento viscoelástico del trigo utilizando compresión uniaxial con diferentes dispositivos, incluye en general platos paralelos. En granos individuales, la determinación de las propiedades mecánicas es particularmente difícil, debido a que estos parámetros se ven seriamente afectados por el porcentaje de deformación, temperatura y contenido de humedad. Al seccionar o cortar las muestras se altera su estructura y el resultado de su comportamiento, específicamente y en mayor medida en granos pequeños. Por lo tanto, para obtener datos reales de la respuesta mecánica de los granos de cereales, en medida de lo posible se deben evaluar los granos intactos (Ponce-García et al., 2008).

Antecedentes en granos de trigo

Dureza. Una de las principales propiedades del grano que determinan la calidad del producto final es su dureza, parámetro que en mayor medida interviene en el comportamiento mecánico del grano (Elbatawi & Arafa, 2008), aunque otros autores (Gorji et al., 2010) consideran que la dureza por sí misma no es un parámetro determinante de la calidad del grano, siendo necesaria la evaluación de otras propiedades mecánicas. Marzec et al. (2011) definieron 'dureza' como la resistencia mecánica de las cariósides a ser modificadas en su naturaleza, o como una propiedad que está determinada por la medida del comportamiento durante una deformación local. Sin embargo, no existe una definición universalmente aceptada de dureza y habitualmente también se reconoce bajo el término 'textura del endospermo'.

Por otro lado, los criterios expuestos que intentan dar a conocer la naturaleza y origen de la dureza del grano son igualmente diversos, siendo los más aceptados aquellos que la relacionan directa o indirectamente con factores genéticos. Esto permite establecer que ésta característica de los granos se asocia fuertemente a las condiciones ambientales que prevalecen durante el crecimiento del cultivo (Greffeuille et al., 2006; Lillemo et al., 2006; Véha, 2007). Adicionalmente, Morris (2002) y Topin et al. (2009) consideran que la dureza de los trigos suaves, fuertes y cristalinos depende genéticamente de la presencia y naturaleza de puroindolina.

En contraparte y a pesar de que se ha considerado que las propiedades mecánicas se relacionan con el factor hereditario, Gazza et al. (2008) no encontraron correlación entre la dureza del

grano y los niveles de puroindolina en trigos suaves y fuertes. En otro sentido, Dobraszczyk et al. (2002) afirmaron que la densidad del endospermo es la que influye en mayor medida en la dureza del grano, lo que coincide con otros investigadores (Nielsen et al., 2003; Greffeuille et al., 2007; Hrušková & Švec, 2009) quienes igualmente asociaron la dureza del grano principalmente al grado de adhesión entre los gránulos de almidón y la matriz proteica. En este sentido, Osborne et al. (2007) describieron que en trigos suaves la dureza se relaciona con una tendencia a la fractura a lo largo de la interfase almidón/proteína, mientras que en trigos fuertes, donde prevalece mayor adhesión de la interfase almidón/proteína, ocurre a lo largo de los límites de la célula.

Peyron et al. (2002) investigaron que durante el efecto de la molienda del trigo, la diferencia entre las propiedades mecánicas del salvado y el endospermo son el principal elemento que determina la calidad del proceso, por lo que después de remover el salvado se requiere menos energía para continuar con la molienda. Evers & Millar (2002) discutieron que las propiedades del grano íntegro y las propiedades físicas del endospermo se asocian a la forma en cómo éste se quiebra. Lo anterior es consistente con otros estudios (Dziki & Laskowski, 2006; Figueroa et al., 2011a) en los cuales se determinó que además del endospermo, las capas del salvado influyen en las propiedades mecánicas del grano.

La dureza ha sido evaluada convencionalmente utilizando diferentes métodos, prevaleciendo dificultades al momento de correlacionarla con la calidad del grano, específicamente cuando se obtiene sólo el valor de la fuerza aplicada. Otro inconveniente común ha sido la estandarización del valor de dureza utilizando escalas empíricas generadas a partir de instrumentos o métodos como el infrarrojo cercano (NIR), el sistema de caracterización simple de granos (SKCS, por sus siglas en inglés), el perfil promedio de respuesta a la fractura (aCRP, por sus siglas en inglés) o el índice de tamaño de partícula (PSI, por sus siglas en inglés) (Anderssen & Haraszi, 2009).

La falta de estandarización entre los resultados obtenidos por estos métodos, se debe en gran parte a la diferencia de escalas y/o unidades de medición, así como a la interpretación del concepto de dureza, ya que cada equipo utiliza un principio de acción distinto durante la evaluación. La forma más recurrente para determinar la dureza de los granos ha sido

utilizando fuerza de compresión a partir de diferentes métodos, tales como platos paralelos, punción e indentación, por citar algunos (Ponce-García et al., 2008).

Sin embargo, es importante destacar que independientemente del método utilizado, la dureza ha sido evaluada en dos sentidos bien definidos: en primer lugar, considerando el grano entero (Arnold & Roberts, 1966; Shelef & Mohsenin, 1967; Arnold & Mohsenin, 1971; Bargale et al., 1995; Afkari & Minaei, 2004; Elbatawi & Arafa, 2008). En segundo lugar, se han realizado numerosas evaluaciones a partir de granos seccionados o torneados, maquinando pequeñas piezas de endospermo en forma de cubo, cilindro o paralelepípedo (Glenn et al., 1991; Kang et al., 1995; Haddad et al., 2001; Delwiche, 2000; Dobraszczyk et al., 2002; Samson et al., 2005; Wang & Jeronimidis, 2008; Morris et al., 2011; Delwiche et al., 2012) lo que propicia que eventualmente se pierda la naturaleza de las propiedades originales del grano.

Pauly et al. (2013) refirieron que a pesar de diversas inconsistencias, los investigadores coinciden en que los trigos hexaploides comunes (*Triticum aestivum* L.) poseen dureza de endospermo que va de muy suave a fuerte, mientras que los trigos tetraploides (*T. turgidum* L.) presentan mayor dureza de grano en todas sus variedades, más allá del método de evaluación utilizado, o la forma en cómo se prepararon las muestras (Figura 6).

Módulo de elasticidad. El módulo de elasticidad o módulo de Young es una propiedad mecánica que además de la dureza ha sido tema de interés para diferentes autores, considerando principalmente la naturaleza viscoelástica de los granos. Shelef & Mohsenin (1967) fueron de los primeros investigadores en realizar estudios en este sentido. Una de sus investigaciones consistió en evaluar la pertinencia de cuatro métodos de compresión uniaxial para determinar el módulo de elasticidad en granos de trigo individuales. Los resultados obtenidos permitieron establecer que las valoraciones realizadas fueron dependientes del método aplicado, además de que establecieron la necesidad de contemplar el efecto del contenido de humedad y el tamaño del grano.

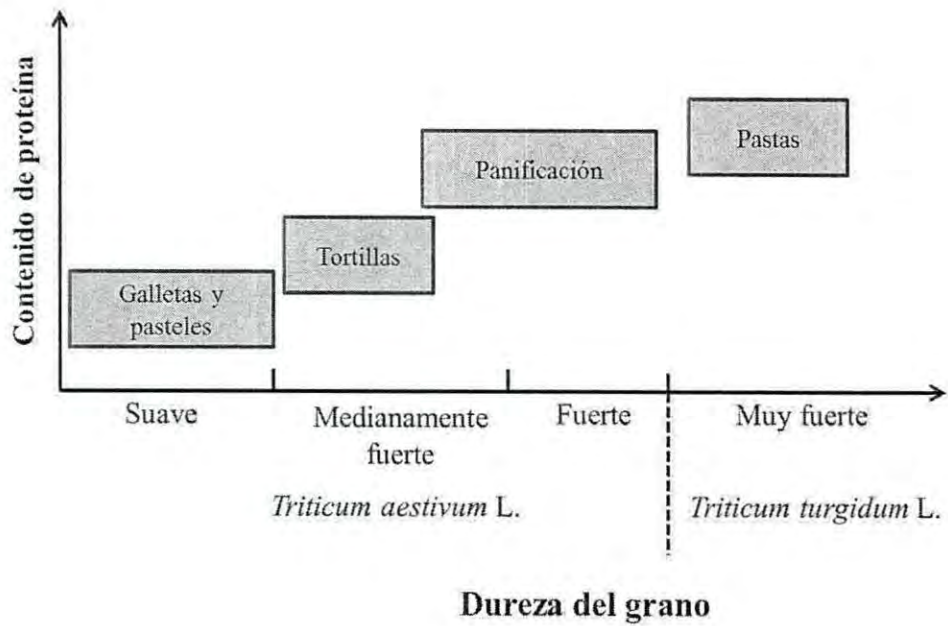


Figura 6. Productos elaborados a base de trigo de acuerdo a su contenido de proteína y dureza de grano.
 Fuente: Adaptado de Pauly et al. (2013).

Afkari & Minaei (2004) aplicaron carga quasi-estática a velocidad constante en granos enteros de trigo suave y duro con dos niveles de humedad. Los valores de módulo de elasticidad aparente fueron mayores para las variedades de trigo fuerte con menor contenido de humedad. Del mismo modo, a partir de la curva fuerza-deformación obtenida fue posible la discriminación entre variedades de trigo, además de que la geometría y forma de los granos influyó en sus resultados.

Elbatawi & Arafa (2008) realizaron una prueba conocida como tres-puntos de inflexión, a partir de la cual determinaron la distribución de las fuerzas de ruptura en granos de trigo, estableciendo que dichas fuerzas no se relacionaban significativamente con el ancho y largo de los granos, pero sí con su grosor. En cambio, los valores del módulo de elasticidad aparente, la fuerza de flexión y la energía de fractura se incrementaron cuando el contenido de humedad disminuyó.

Khodabakhshian & Emadi (2011) discutieron la importancia de la evaluación del módulo de elasticidad en granos enteros, al considerar que a partir de esta determinación es factible evaluar el atributo de textura evaluada como firmeza. Esto permite determinar el esfuerzo a la fractura considerando la teoría de la elasticidad.

Gubicza et al. (1996) describieron la indentación como método alternativo a la compresión entre platos para determinar el módulo de Young, al establecer que cuando se aplica la misma velocidad de carga y descarga era posible la evaluación de la viscoelasticidad (trabajo elástico y plástico) del material.

Viscoelasticidad. Ponce-García et al. (2008) propusieron y validaron un método de carga de compresión para evaluar propiedades viscoelásticas en granos intactos de trigo suave, fuerte y cristalino a diferentes niveles de humedad. Los resultados mostraron que el punto de cedencia presentaba una fuerza de ruptura similar en todas las muestras independientemente del tipo de trigo y nivel de humedad, mientras que la tendencia de las curvas fuerza-deformación permitió establecer que el comportamiento (trabajo) elástico (W_e) y el módulo de elasticidad (E) de los granos era mayor dependiendo del tipo de trigo: suave < fuerte < cristalino. Adicionalmente, los autores concluyeron que el incremento en el contenido de humedad de los granos revertía la

tendencia de comportamiento viscoelástico de los granos, al disminuir los valores de W_e y E , mientras que el trabajo plástico (W_p) se incrementaba.

La evaluación viscoelástica de los granos mediante pruebas esfuerzo-relajación y prueba de recuperación o fluencia (creep test, por su nombre en inglés) se han relacionado con el volumen de sedimentación, la composición alélica de las subunidades de glutenina y el trabajo elástico (Figueroa et al., 2009; 2012; 2013; Hernández et al., 2012a; 2012b), prevaleciendo en términos generales una relación directamente proporcional entre el módulo de elasticidad y el tamaño de los granos, además de que los granos de trigo fuerte presentan en general mayor elasticidad y calidad que los trigos suaves.

Resistencia a la fractura. El principio de evaluación de las propiedades mecánicas de granos de trigo tiene amplia relación con los procesos de molienda, por lo que diversas investigaciones han descrito el comportamiento de los granos en función de su resistencia a la fractura.

Gorji et al. (2010) midieron la resistencia a la fractura de granos en términos de fuerza y energía. La fuerza requerida para el inicio de la ruptura del grano decreció, cuando se incrementó el nivel de humedad. También determinaron que el grano en posición horizontal al momento de la compresión era más elástico y que su máxima fuerza mecánica se asociaba con niveles bajos de humedad y con una menor velocidad de prueba.

En un estudio similar, Kalkan & Kara (2011) determinaron el efecto del contenido de humedad en granos individuales de trigo sometidos a carga de compresión quasi-estática. Al igual que en el caso anterior, los valores de fuerza de ruptura del grano decrecieron con el incremento del nivel de humedad. En general, la deformación de los granos en los valores de ruptura obtenidos, mostraron una variación irregular dependiente del contenido de humedad.

Propiedades Reológicas y Viscoelásticas en Masa

Generalidades

Las propiedades reológicas de la masa son muy importantes, por dos razones: porque determinan el comportamiento de las piezas de masa durante su manejo mecánico, y porque afectan los procesos que gobiernan la estabilidad y el aumento de volumen durante el proceso de panificación. La masa es una mezcla compleja, en la cual la mayoría de sus propiedades reológicas se derivan de la harina, el agua y el aire. La masa es el principal compuesto intermedio en la transformación del trigo a pan. Sus principales constituyentes son aquellos liberados de la harina, siendo los más importantes las proteínas (gluten) y los carbohidratos (Faubion & Hosney, 1990; Stojceska et al., 2007).

Las propiedades reológicas de la masa están determinadas por el esfuerzo aplicado y la forma en cómo el material fluye o se deforma, es decir, la evaluación del efecto combinado esfuerzo-deformación, puede ser considerada una prueba reológica. Sin embargo, es preciso tomar en cuenta ciertas condiciones para deducir objetivamente un valor o característica reológica de la masa (Vergnes et al., 2003).

Estructura y formación de la masa

Las características microestructurales de la masa se desarrollan por la hidratación de los ingredientes y el aporte de energía durante el mezclado. Sin embargo, sólo la hidratación es suficiente para desarrollar cierto tipo de microestructura en la masa, debido a la presencia y propiedades químicas de los principales componentes de la harina (almidón y gluten) y su interacción con el agua durante la hidratación. Adicionalmente, la plastificación toma lugar propiciando mayor espacio intermolecular y el subsecuente descenso en la viscosidad.

La distribución de los componentes durante el desarrollo de la masa se ha descrito en estudios microscópicos como un sistema dónde los gránulos de almidón están rodeados por una fase de proteínas. Otros estudios describen a la masa como un sistema bi-continuo proteína/agua-almidón o incluso como un sistema de tres fases: proteína/agua-almidón/matriz de aire. Debido a que el agua cubre la superficie del almidón, los gránulos de almidón se fusionan en

una fase continua de agua y las proteínas se localizan en los espacios entre el agua y el almidón fusionado (Jekle & Becker, 2013).

Ktenioudaki et al. (2010) señalan que durante el mezclado, además del desarrollo del gluten que permite la retención de gas, se incorpora aire al sistema en forma de burbujas que sirven como núcleo para las células de gas, las cuales crecen durante la fermentación y en etapas tempranas del horneado. De acuerdo con Gras et al. (2000) esto significa que las propiedades microestructurales y reológicas están determinadas por: a) la interacción de los componentes con el agua; b) sus propiedades; c) la fase de agua libre; y d) la movilidad del agua. En general, la hidratación por sí misma modifica directamente la estructura de componentes, por ejemplo, la del gluten.

En la masa a nivel molecular se encuentran enlaces de hidrógeno y disulfuro entre proteínas; la escala nanoscópica, incluye la orientación de las proteínas; a nivel microscópico la red de proteínas, mientras que el nivel macroscópico se puede observar a través de la representación de alguna prueba reológica (Jekle & Becker, 2013).

La Figura 7 representa esquemáticamente las moléculas que intervienen en la formación de la masa. Se observa cómo las superficies de los dos gránulos de almidón aparecen cubiertas por algunos lípidos. Las moléculas de gliadina se disponen como moléculas de cadena simple, contrastando con los polímeros de las gluteninas, formados de subunidades (G-APM o G-BPM) unidas por enlaces disulfuro. Además se encuentran presentes burbujas de gas y lípidos entre los gránulos de almidón (Bekes et al., 2004).

Conjuntamente, el tipo de mezclador y el nivel de intensidad en el amasado imparten diferentes formas de mezclado a la masa. Ambos atributos (acción e intensidad) son importantes cuando se evalúa el desarrollo de la masa, debido a las diferentes deformaciones a las que la masa se somete (Ktenioudaki et al., 2010).

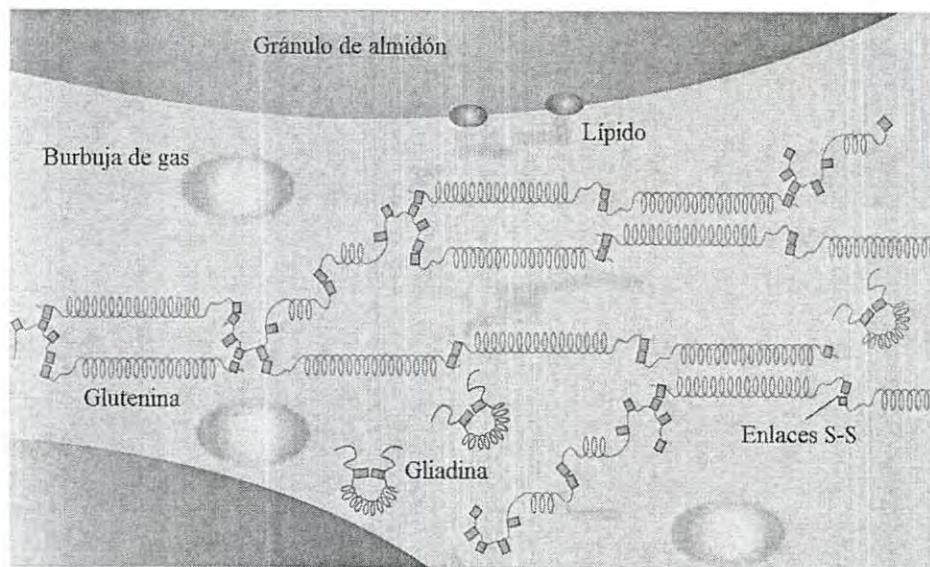


Figura 7. Diagrama representativo de las moléculas involucradas en la formación de la masa (no a escala).

Fuente: Adaptado de Bekes et al. (2004).

Hay dos requerimientos principales para lograr un completo desarrollo de la masa: a) la intensidad del mezclado; y b) el control de la energía para asegurar un buen desarrollo. Es muy probable que la energía requerida provea un mejor control durante la operación del mezclado, porque ésta se relaciona con la variación en el nivel de agua, la calidad de la harina y la temperatura. El aporte del trabajo (energía) se considera el parámetro del mezclado que más afecta los productos elaborados. Como diferentes procesos de mezclado involucran diferentes tipos de deformaciones, es de esperarse que las propiedades reológicas de la masa sean afectadas por el mezclado. La idea general se centra en que las propiedades reológicas de la masa se relaciona con la calidad final del producto (Ktenioudaki et al., 2010).

En cierta forma, el comportamiento reológico de la masa se puede predecir utilizando modelos moleculares del desarrollo del gluten durante el mezclado (Figura 8). El desarrollo óptimo de la masa se logra cuando la interacción entre los polímeros entrecruzados se fortalece y alcanza una resistencia máxima a la extensión y recupera su fuerza después de la deformación. Conforme transcurre el mezclado, los entrecruzamientos se rompen (ruptura de puentes disulfuro). Las gluteninas inician su depolimerización y la masa entonces se considera sobreamasada. La presencia de pequeñas cadenas en la masa hace que ésta se vuelva pegajosa. Las proteínas monoméricas (gliadinas), forman una matriz sin la red de polímeros largos contribuyendo a la resistencia a la extensión debido a su comportamiento viscoso. Esta es la razón por la cual se considera que las gliadinas actúan como plastificantes, promoviendo la viscosidad y extensibilidad del gluten. La importancia de conocer el comportamiento reológico de la masa promueve un mejor manejo y control de la masa durante su maquinado, además de influir en la calidad del producto final (Abang et al., 2010).

La estructura de la miga del pan depende de la incorporación de aire durante el mezclado de la masa. La distribución del número y tamaño de las discretas células de gas que se incorporan, dependen principalmente de las propiedades del gluten. Así, las diferentes etapas de la elaboración del pan alteran la distribución de las células y, por lo tanto, contribuyen a la estructura de la miga (Pauly et al., 2013).

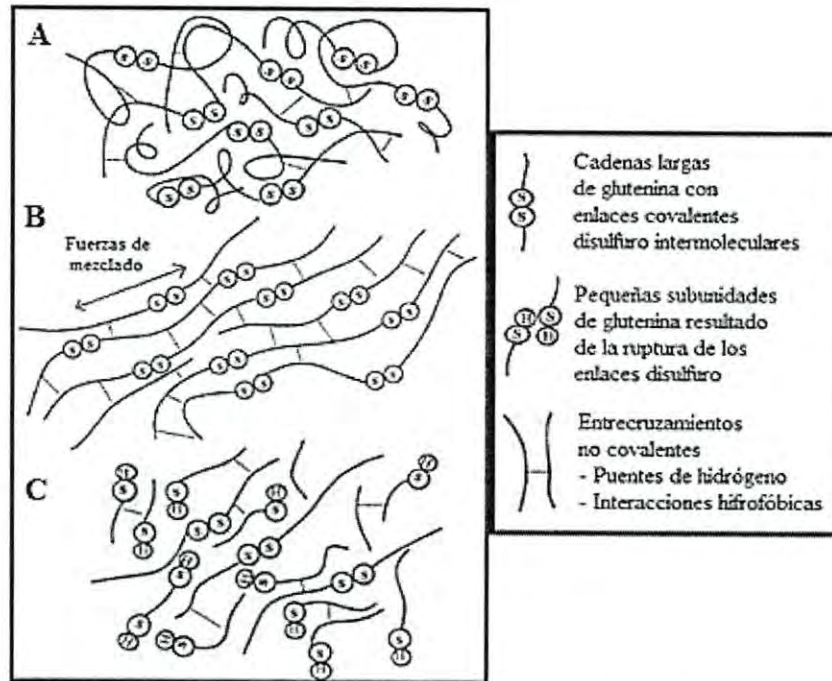


Figura 8. Interpretación molecular del desarrollo del gluten: A. Inicio de mezclado; B. Desarrollo óptimo; C. Sobremezclado.
Fuente: Adaptado de Abang et al. (2010).

La masa que se destina para elaborar pan es una estructura espumosa que es intrínsecamente inestable debido a la desproporción y coalescencia de las células de gas. Diversos estudios apoyan la hipótesis de que una ‘película líquida’ que rodea las células de gas es la responsable de su estabilización cuando la discontinuidad se presenta en la matriz gluten-almidón (Pauly et al., 2013).

La Figura 9 representa la transformación de la masa en estructura esponjosa y esquematiza la hipótesis de la ‘película líquida’.

La superficie activa molecular conformada entre otras, por proteínas y lípidos, puede contribuir a mantener la integridad de la capa líquida que rodea a las células de gas. Las proteínas activas pueden formar una capa continua bidimensional en la interfase a través de interacciones con las proteínas vecinas, las cuales dan una estructura de soporte a las células de gas. En la fase A de la Figura 9, la matriz gluten-almidón se debilita por retener las células de gas durante las últimas etapas de la fermentación y etapas iniciales del horneado. En el punto B, la película líquida se hace cargo de la estabilización de las células de gas, debido a la presencia de las proteínas y lípidos de superficie activos en la interfase aire-agua. Los arabinosilanos pueden actuar como estabilizadores de la capa interfacial o en el incremento de la viscosidad de la fase acuosa. Finalmente, durante el horneado (fase C), las células de gas promueven la expansión hasta que la capa líquida no es lo suficientemente capaz de rodear las células de gas, resultando una apertura de la célula y una pérdida de retención de gas (Pauly et al., 2013).

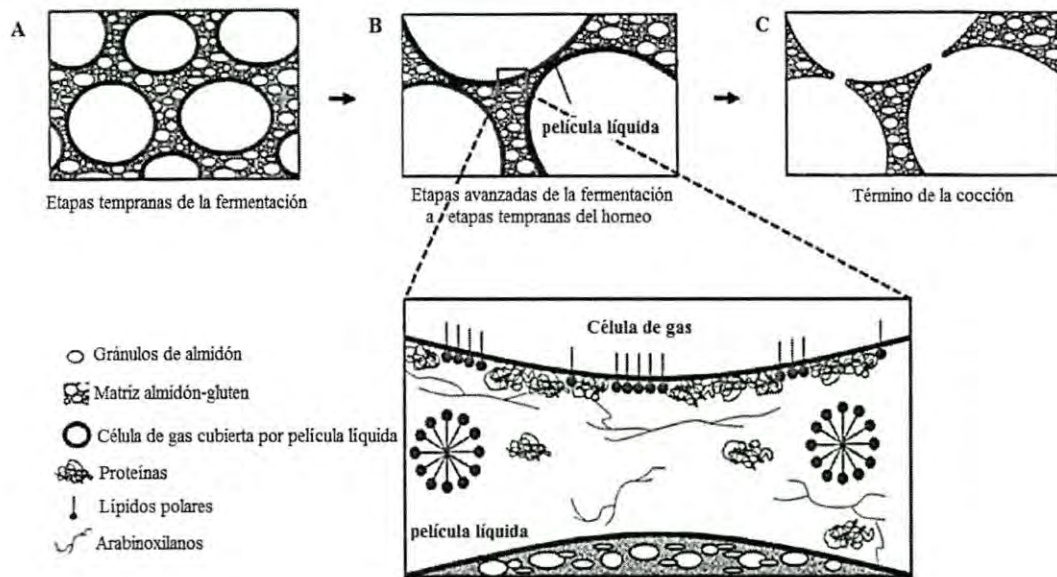


Figura 9. Transformación de masa en estructura esponjosa. Hipótesis de la 'película líquida'.

Fuente: Adaptado de Pauly et al. (2013).

Pruebas y ensayos reológicos

Generalidades. Un claro objetivo de la reología es determinar propiedades reproducibles de un material, de tal manera que sea posible la comparación entre distintas muestras, tamaños y formas, así como entre diferentes métodos. Las técnicas reológicas se clasifican de acuerdo al tipo o principio de deformación aplicado, tales como compresión, extensión, corte o torsión; adicionalmente, se considera también la magnitud de la deformación: pequeña o grande. En este orden de ideas, las principales técnicas utilizadas en la evaluación de las propiedades reológicas de los cereales y sus productos están convenientemente divididas en mediciones descriptivas o empíricas y en mediciones fundamentales (Dobraszczyk & Morgenstern, 2003).

Por otro lado, un aspecto interesante a considerar, es que muchas pruebas que se realizan pretenden conocer el efecto elástico, viscoso y plástico de la masa. El hecho de que el gluten (principal componente de la masa) presente simultáneamente deformación plástica y elástica a temperatura ambiente, indica su clara tendencia a ser un material viscoelástico poco común, debido a que como material natural es más extensible, mientras que cuando se funde es más elástico (Zhao et al., 2010).

Deformación a escala pequeña y grande. El uso de métodos o técnicas aplicando pequeña deformación es más meticuloso que aquéllos que utilizan deformaciones superiores. En las pruebas a pequeña deformación, las propiedades reológicas se definen con mayor precisión, precisamente por el efecto de esa pequeña deformación aplicada. En general, las pruebas a deformaciones grandes son más sencillas de llevar a cabo (Abang, et al., 2010).

En los ensayos a pequeña deformación se asume que el material evaluado tiene una forma regular continua y que la deformación (strain) ejercida es entre 1-3%. Diversos estudios se han desarrollado aplicando este tipo de deformaciones en masa y gluten, incluida la oscilación dinámica, pruebas de recuperación (creep test) y de relajación de esfuerzo. Por otro lado, un material recibe carga de deformación grande cuando el esfuerzo excede el valor de cedencia. Algunas de las pruebas más comunes utilizadas durante la evaluación de masa y gluten que se sustentan en deformaciones grandes son la extensión y compresión uniaxial, y la extensión biaxial (Abang, et al., 2010).

Ensayos reológicos empíricos. De acuerdo a Hernández (2013), las técnicas descriptivas o empíricas se utilizan para determinar propiedades tales como fuerza de punción, energía de extrusión y todas aquellas donde aspectos como la geometría de la muestra y la velocidad de la prueba influyen en la magnitud del parámetro estimado.

En la industria panificadora existe una larga tradición de utilizar mediciones empíricas descriptivas de las propiedades reológicas de la masa empleando instrumentos tales como el texturómetro, consistómetro, amilógrafo, farinógrafo, extensógrafo, alveógrafo, algunos viscosímetros de flujo y dispositivos de fermentación. Las pruebas empíricas son sencillas de realizar y proveen información útil del desarrollo de la masa como su consistencia, dureza y textura entre otros (Janssen et al., 1996).

A pesar de lo anterior, estas mediciones no cubren los requerimientos de una prueba reológica fundamental, debido principalmente a dos aspectos: a) la geometría de las muestras es variable y no bien definida; y b) los estados de esfuerzo y deformación son difíciles de controlar y no son uniformes, es decir, los datos obtenidos no pueden ser transformados a una cantidad física bien definida, lo que dificulta su interpretación. Por lo tanto, es imposible definir parámetros reológicos como el esfuerzo o la deformación, módulos o viscosidad. Estos métodos son puramente descriptivos y dependientes del tipo de instrumento, tamaño y geometría de la muestra y de condiciones específicas bajo las cuales la prueba se desarrolla (Dobraszczyk, 2004b).

Este tipo de pruebas son muy apreciadas y utilizadas para conocer el comportamiento de las masas durante su procesamiento y manejo, principalmente en la industria panificadora, gracias a que logran ofrecer aspectos directos y sencillos de un parámetro en particular. A pesar de que son diversos los equipos utilizados, destacan:

Farinógrafo. Es el equipo más común para determinar las propiedades reológicas de la masa (Voicu et al., 2012). La metodología para la evaluación de las masas con el farinógrafo es la descrita en el método estándar 54-21.02 (AACCI).

Migliori & Corra (2013) consideran que entre otros beneficios, el farinógrafo permite predecir la cantidad de agua que se debe adicionar a una harina (absorción de agua) para lograr una consistencia adecuada de la masa durante su mezclado, midiendo la resistencia mecánica de dicha acción. La 'forma Z' en que rotan sus aspas permite estirar y cortar a la vez durante la formación de la masa, gracias a lo cual el torque requerido se puede medir y expresar en unidades Brabender (UB). Adicionalmente se puede obtener información a partir de la curva (farinograma) que se grafica durante el trabajo de mezclado y torsión (Figura 10).

El ensayo inicia con la adición del agua a la harina, lo que propicia la hidratación de los compuestos más superficiales, entonces el agua se difunde en la harina conformando así la red de gluten. La energía mecánica determinada por las aspas mezcladoras acelera el proceso por un incremento continuo de la interfase líquido/sólido. Durante la operación de amasado, el momento de resistencia en el eje de las aspas presenta variaciones; primero durante la formación y desarrollo de la masa, acercándose a un valor máximo más allá de la consistencia normal, para después mantenerse en un valor constante durante algún tiempo (fase de estabilidad) dependiendo de las características de la harina. En la fase final del amasado (fase húmeda) la variación del torque decrece ligeramente, debido a que el tiempo de mezclado se ha extendido, propiciando que la fuerza de la masa sea menor (Voicu et al., 2012).

A partir de lo anterior, puede considerarse que la consistencia de la masa tiene características reológicas complejas como resultado del efecto combinado de las propiedades fundamentales de viscosidad, plasticidad y elasticidad, las cuales influyen en la eficiencia de los procesos de panificación. La consistencia de la masa varía con el contenido de humedad, temperatura y tiempo-forma de amasado, con la proporción de las fases de la masa (sólido/líquido/gas) y con la composición bioquímica de la harina (Voicu et al., 2012).

La medición de fuerza que se ejerce en la masa durante la prueba se considera como una serie secuencial de 'fuerza de ruptura'. La forma de la curva está asociada a la fuerza de la harina: una curva angosta que cae rápidamente indica una harina débil, mientras que una curva ancha y alta es característica de una harina fuerte, generalmente con alta absorción de agua, pico máximo de desarrollo amplio y alta estabilidad (Migliori & Corra, 2013).

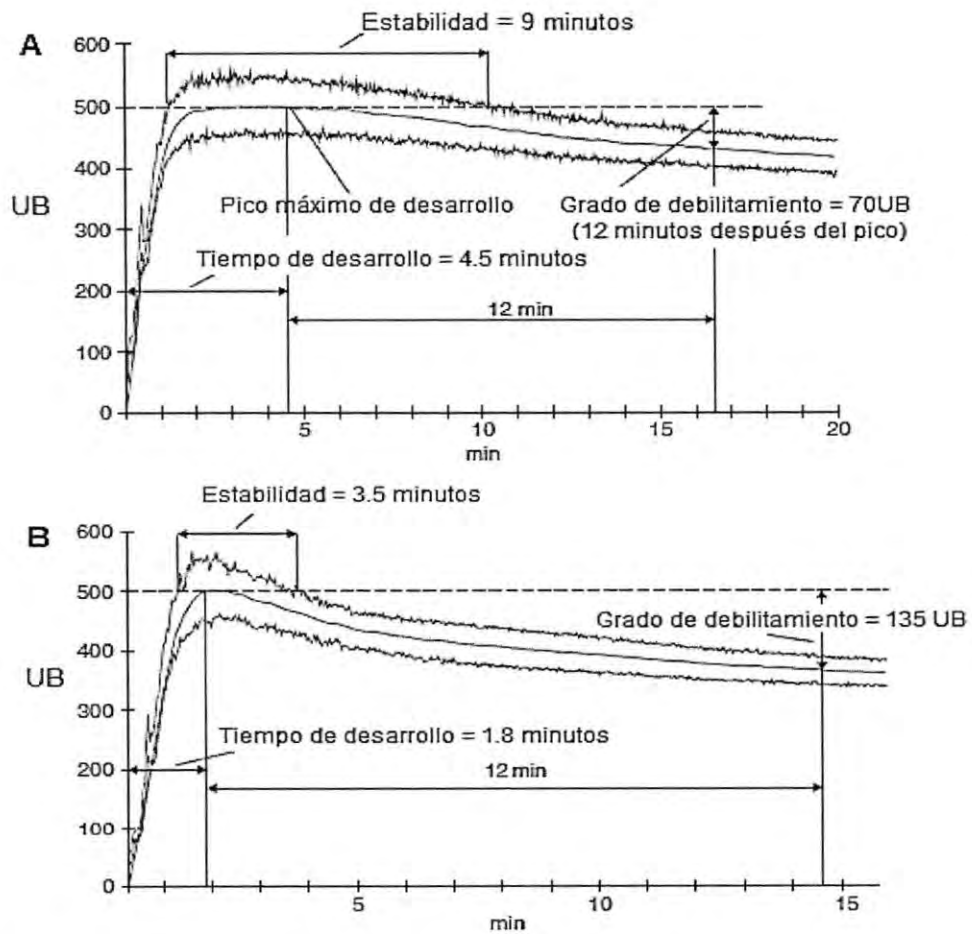


Figura 10. Parámetros obtenidos a partir de farinograma: A. Harina fuerte; B. Harina suave.

Fuente: Adaptado de Dobraszczyk (2004b).

Otros ensayos empíricos. Otros equipos descriptivos se utilizan con frecuencia en la industria. En el extensógrafo la masa se somete a la acción combinada de fuerzas de corte y, especialmente después de un periodo de reposo, se determina la extensibilidad E y la máxima resistencia a la extensión R_m utilizando el principio de extensión uniaxial. Otro equipo que evalúa la extensibilidad de la masa mediante el dispositivo de Kieffer, es el analizador de textura. En el alveógrafo Chopin, el principal parámetro determinado es la fuerza 'W' de la masa, la cual se mide por el principio de extensión biaxial al inflar una pieza de masa fermentada hasta su ruptura. Por otro lado, el parámetro de mayor importancia evaluado en el mixógrafo para discriminar la calidad de la masa es el 'tiempo al torque máximo' o 'tiempo de pico máximo'. Sin embargo, recientes publicaciones han demostrado que este parámetro no aporta suficiente información que pueda discriminar la calidad de panificación (Janssen et al., 1996; Dobraszczyk, 2004b).

Ensayos reológicos fundamentales. Las pruebas fundamentales estiman las propiedades que son inherentes al material, es decir, aquellas que no son dependientes de la forma o el tamaño de la muestra, así como tampoco del equipo y/o condiciones de carga. Ejemplos de este tipo de propiedades son el módulo de elasticidad, la relación de Poisson y el tiempo de relajación (Moshenin, 1986; Hernández, 2013).

Los equipos utilizados en este tipo de ensayos logran medir propiedades bien definidas como el esfuerzo, la deformación, o la viscosidad. Una pequeña cantidad de muestra de estudio usualmente se deforma de una forma controlada y la fuerza se mide por la distancia desplazada del objeto. Estos datos se utilizan para obtener una curva fuerza-desplazamiento. Normalmente para materiales duros o rígidos se debe dividir la fuerza y el desplazamiento por las dimensiones 'originales' del material, para obtener el esfuerzo (fuerza/área, sección transversal) y deformación (desplazamiento/dimensión original), porque los cambios en la dimensión de la muestra son pequeños y uniformes; esto permite eliminar el tamaño de muestra como una variable (Faubion & Hosney, 1990).

Algunos inconvenientes de este tipo de pruebas son: los instrumentos son costosos y complejos; los ensayos requieren de tiempo extensivo para su desarrollo; el equipo es difícil de mantener en un medio ambiente industrial, además de que el personal que debe operar el

dispositivo requiere cierto nivel de capacitación; a menudo se utilizan condiciones de deformación inapropiadas, y adicionalmente la interpretación de los resultados suele ser difícil. Los tipos más comunes de pruebas reológicas fundamentales utilizadas para evaluar cereales y sus productos son: a) deformación pequeña por oscilación dinámica; b) deformación pequeña y grande mediante pruebas de recuperación o fluencia (creep test) y esfuerzo de relajación; c) deformación grande por medición extensional; d) viscometría de flujo. En este sentido, las pruebas dinámicas oscilatorias son las más adecuadas para la evaluación de las propiedades reológicas de materiales viscoelásticos (Vergnes et al., 2003; Dobraszczyk & Morgenstern, 2003). Algunos de los principales ensayos o métodos fundamentales son:

Método dinámico oscilatorio. En estas pruebas se aplica un esfuerzo o deformación oscilatoria sinusoidal (en tiempo). Normalmente este tipo de ensayos se llevan a cabo entre platos paralelos, de los cuales el superior rota a cierta velocidad angular oscilatoria. Cuando se aplica una deformación sinusoidal, el material viscoelástico responde con un esfuerzo también sinusoidal, el cual es dependiente de las propiedades del material. El componente elástico representa el módulo de almacenamiento (G') y el componente viscoso se mide como módulo de pérdida (G''). La relación del módulo viscoso sobre el elástico (G''/G') es igual al ángulo de fase ($\text{Tan } \delta$). Usualmente estas pruebas operan en la región lineal a pequeña deformación en el orden del 1%.

Un material sólido elástico ideal produce un esfuerzo en fase con la deformación. Un material viscoso ideal presentará un esfuerzo de 90° fuera de la fase con respecto a la deformación aplicada. Un material viscoelástico ideal exhibiría un valor de 45° . Por lo tanto, el valor para este tipo de materiales está en el rango de entre 0° y 90° ; si su valor es entre 0° - 45° , entonces su contribución será más elástica, mientras que si se ubica entre 45° y 90° la contribución será más viscosa (Figura 11) (Dogan & Kokini, 2007).

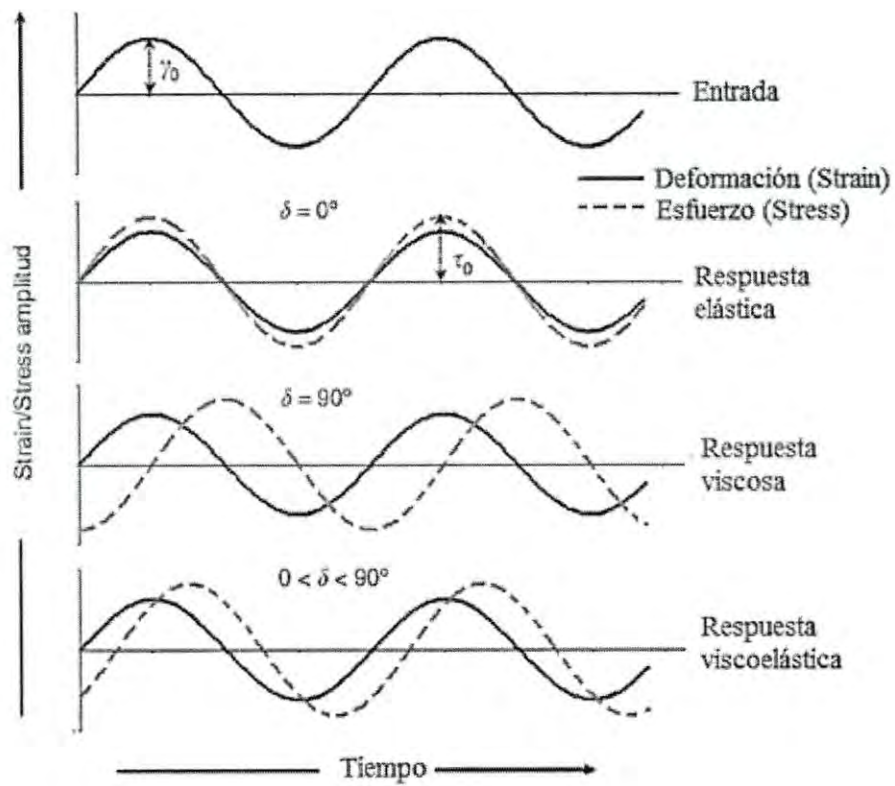


Figura 11. Función de entrada y respuestas del ángulo de fase δ .
Fuente: Adaptado de Dogan & Kokini (2007).

Esta prueba tiene la ventaja de contar con un buen soporte teórico, evaluar simultáneamente los módulos viscoso y elástico, además de que permite desarrollar diferentes mediciones con variación de la temperatura y/o la frecuencia. Sin embargo, algunas de las desventajas de este método son que las condiciones de deformación suelen ser inapropiadas en procesos o situaciones prácticas, porque se llevan a cabo bajo condiciones muy diferentes con respecto a las que en realidad se practican o desarrollan durante los procesos reales (Dobraszczyk & Morgenstern, 2003).

El equipo que más frecuentemente se utiliza para la determinación de las propiedades viscoelásticas de la masa y el gluten es el reómetro. La muestra se coloca entre platos paralelos, debiéndose eliminar la cantidad de muestra que sobresale de los mismos; entonces la superficie se recubre con aceite de silicón o petrolato para evitar su desecación durante el análisis (Abang et al., 2010).

Métodos extensionales. Se utilizan varios métodos para evaluar las propiedades de la masa en extensión: extensión uniaxial simple, donde la masa es estirada en una sola dirección; en la extensión biaxial la masa se estira en dos direcciones opuestas, pudiendo ser por compresión entre superficies lubricadas o por inflamiento de burbuja. Muchos alimentos se someten a deformaciones grandes en la práctica durante su procesamiento, por ejemplo, el flujo extensional es importante durante el mezclado de la masa. Las mediciones que se realizan a pequeña deformación no proveen información acerca del comportamiento del material bajo extensión grande. Por lo tanto, es necesario desarrollar mediciones bajo condiciones relevantes más relacionadas con las desarrolladas en la industria (Dobraszczyk & Morgenstern, 2003).

Otros ensayos fundamentales. Existen diferentes formas para medir la respuesta viscoelástica lineal. En las mediciones esfuerzo-relajación, la deformación se mantiene constante midiendo la respuesta de la fuerza, mientras que en las pruebas de recuperación (creep test) el esfuerzo se mantiene constante evaluando así la respuesta a la deformación. El esfuerzo del material se puede expresar entonces en términos de tiempo de relajación. La medición del esfuerzo de relajación de la masa y el gluten se puede describir por dos procesos: relajación rápida (0.1-10 segundos) y relajación lenta (10-10,000 segundos). Muchos investigadores han demostrado que la relajación lenta está asociada con buena calidad

panificable de la masa, con un tiempo de relajación relativamente independiente del contenido de agua, tiempo de mezclado o temperatura (Dobraszczyk, 2004b).

Propiedades Reológicas y de Textura en Pan

Generalidades

El estudio de la relación existente entre las propiedades del grano, harina, masa y las características del producto final continúa siendo un reto para muchos investigadores dedicados al ramo alimenticio. Sin embargo, diversos estudios relacionadas con la calidad del pan se han centrado principalmente en la evaluación del efecto de diferentes variables sobre el volumen final del producto (Różyło & Laskowski, 2011), así como en las propiedades de textura y mecánicas de la miga.

En este sentido, más allá de los parámetros y formas de evaluación de la calidad del pan, los resultados de las investigaciones son coincidentes al reportar que el contenido de humedad en la miga disminuye significativamente durante el almacenamiento, ocasionando cambios trascendentales en la textura del pan. Este fenómeno se ha atribuido consistentemente a la retrogradación del almidón (Primo-Martín et al., 2007). Sin embargo, el endurecimiento del pan también se ha asociado a otros mecanismos tales como el entrecruzamiento parcial entre el almidón solubilizado y el gluten, la deshidratación parcial del producto, e inclusive por el efecto de la transición vítrea. En cualquier caso, todos los eventos se relacionan directamente con el contenido de humedad en el producto (Baik & Chinachoti, 2000).

La textura y las propiedades mecánicas de la estructura de sólidos celulares como la miga del pan, son dependientes principalmente de la forma y uniformidad del poro, así como de la densidad relativa (presencia de burbujas de gas). La miga del pan como la de muchos otros materiales celulares, posee una estructura generalmente heterogénea. Esta heterogeneidad implica un inconstante ordenamiento de las células e imperfecciones ocasionales derivadas de la ausencia de paredes celulares, lo que propicia la aglomeración de las células adyacentes, limitando un orden estructural superior. La presencia de este tipo de defectos, así como variaciones en la estructura de la miga tienen efectos significativos sobre la evaluación de las propiedades mecánicas, al grado que tal disparidad dificulta considerablemente la predicción

del comportamiento reológico de la miga (Zghal et al., 2002). De acuerdo con esto, es importante tomar en cuenta que la morfología estructural de la miga debe ser un aspecto primario a considerar durante la evaluación del comportamiento mecánico y de textura del producto.

Ensayos reológicos y de textura

Los atributos reológicos y de textura del pan que mejor definen su calidad y frescura son la crujencia de la corteza y la firmeza de la miga. Diferentes métodos se han propuesto para medir o evaluar las características mecánicas de este alimento, dentro de las que destacan técnicas como la compresión, penetración, los procedimientos acústicos y los análisis sensoriales. Sin embargo, las mediciones instrumentales se utilizan preferentemente para evaluar objetivamente los atributos relacionados con las propiedades mecánicas. De hecho, características como el volumen y la firmeza del pan se han correlacionado con el pico máximo de fuerza, la pendiente lineal, la relación fuerza-deformación y el módulo de Young (Altamirano-Fortoul et al., 2013).

Cornford et al. (1964) demostraron que la interacción entre el módulo de elasticidad, tiempo y temperatura en la miga del pan se relacionaban, concluyendo que el incremento de la cristalinidad (asociado a la retrogradación) se podía medir en términos del descenso del módulo de elasticidad.

La influencia de la estructura celular (caracterizada por la densidad relativa) sobre las propiedades mecánicas de la miga del pan fue estudiada por Zghal et al. (2002). La variación entre la estructura y las propiedades mecánicas se obtuvo variando el tipo de harina, contenido de agua y condiciones generales de procesamiento de la masa. El ajuste de correlación entre las propiedades mecánicas y la densidad relativa de la miga fue muy bajo, por lo que los autores determinaron que la heterogeneidad de la densidad relativa de la miga (ocasionada por la coalescencia de las células de gas), fue el factor que más afectó los parámetros evaluados.

Różyło & Laskowski (2011) evaluaron las propiedades fisicoquímicas y alveográficas de harina, además del volumen y el perfil de textura de pan, para establecer modelos que permitieran establecer relaciones entre los diferentes parámetros valorados. Los resultados

mostraron que a partir de las propiedades alveográficas de la harina era posible predecir algunas características de textura del pan.

Los efectos del tiempo de almacenamiento en la firmeza y textura del pan se han evaluado principalmente por el método de compresión, sin embargo, Xie et al. (2003) propusieron un método alternativo al comparar los cambios durante el almacenamiento utilizando espectroscopía de infrarrojo cercano y un analizador de textura, logrando buenos resultados.

Zghal et al. (2002) evaluaron mediante pruebas de tensión la influencia de la estructura celular sobre las propiedades mecánicas de la miga del pan. Determinaron los parámetros mecánicos: módulo de elasticidad (determinado en la región elástica), esfuerzo de cedencia, deformación de cedencia y energía de cedencia, concluyendo que la densidad relativa de la miga fue el factor que más afectó las propiedades mecánicas.

Otras investigaciones (Baik & Chinachoti, 2000; Gámbaro et al., 2002; O'Brien et al., 2003; Patel et al., 2005; Curic et al., 2008; Baiano et al., 2009) refirieron la aplicación del método de compresión uniaxial utilizando el analizador de textura, para evaluar las características de textura y/o firmeza de la miga del pan y su relación con la calidad de la materia prima, el desarrollo de nuevas fórmulas, la estandarización de parámetros de procesamiento y el comportamiento reológico de la masa.

HIPÓTESIS

El método fundamental de compresión uniaxial bajo pequeña deformación, permite evaluar las propiedades viscoelásticas de granos individuales, masa y pan de diferentes grupos y variedades de trigo, las cuales se pueden correlacionar entre sí, con sus propiedades fisicoquímicas y con su aptitud panificable.

OBJETIVOS

General

Evaluar las propiedades viscoelásticas de diferentes grupos y variedades de granos enteros de trigo (*Triticum aestivum* L.), su masa y pan, utilizando el método de compresión uniaxial bajo pequeña deformación. Asimismo, relacionar las propiedades viscoelásticas y fisicoquímicas entre los tres materiales.

Particulares

Desarrollar un método fundamental que considere la aplicación experimental de la teoría de la elasticidad para evaluar propiedades viscoelásticas de grano, masa y pan de trigo.

Evaluar las propiedades viscoelásticas de granos de trigo fuerte y suave con diferente contenido de humedad utilizando el método de compresión uniaxial bajo pequeña deformación.

Evaluar las propiedades viscoelásticas de grano de trigo acondicionado, masa y pan utilizando el método de compresión uniaxial bajo pequeña deformación, y relacionarlas con propiedades de molienda, fisicoquímicas y reológicas de la harina.

MATERIALES Y MÉTODOS

Consideraciones Generales

El desarrollo de la presente investigación comprendió dos etapas: 1) Evaluación de las propiedades viscoelásticas de granos de trigo; y 2) Evaluación de las propiedades viscoelásticas de grano de trigo y su relación con la molienda, masa y pan.

Para establecer uniformidad en el manejo de conceptos empleados a lo largo de la investigación, los términos 'harina suave', 'harina fuerte', 'pan de variedades suaves' y 'pan de variedades fuertes', se refieren a aquellos productos provenientes del correspondiente grupo de trigo.

Las determinaciones y evaluaciones de la investigación se realizaron en las instalaciones del Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos (DIPA) de la Universidad de Sonora, excepto la determinación de las propiedades amilográficas de la harina (incluida en la Etapa 2), la cual se realizó en el Laboratorio de Cereales del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (CIAD) campus Hermosillo, Sonora. La metodología general se presenta esquemáticamente en la Figura 12. La metodología específica correspondiente a cada una de las etapas se describe a continuación.

Evaluación de las Propiedades Viscoelásticas de Granos de Trigo

Materia prima

Durante toda la investigación se trabajó con ocho variedades comerciales de trigo producidas en el país en el año 2011. De acuerdo a la fuerza de su gluten, éstas se dividieron en dos grupos atendiendo la Norma Mexicana NMX-FF-036-1996. Grupo I. Variedades fuertes: Kronstad (F2004), Nana (F2007), Norteña (F2007) y Tacupeto (F2001) cultivadas en el estado de Sonora, México. Grupo III. Variedades suaves: Bárcenas (S2002), Cortazar (S94), Saturno (S86) y Urbina (S2007), procedentes del estado de Guanajuato, México.

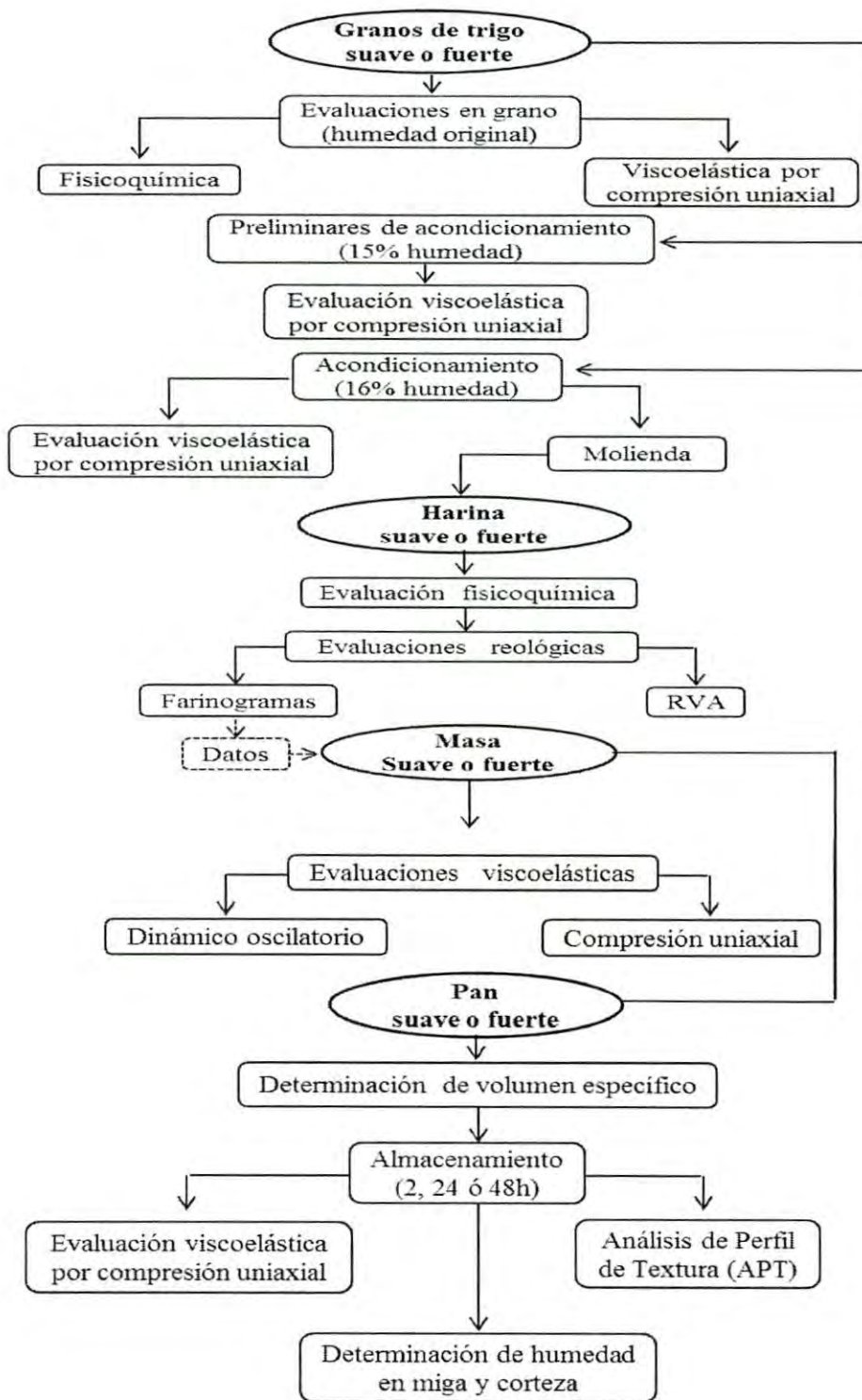


Figura 12. Diagrama general de la metodología desarrollada durante la investigación.

Limpieza y almacenamiento

La primera operación consistió en limpiar mecánicamente cada una de las muestras objeto de estudio, utilizando un equipo cribador semiautomático (Mod. Clipper M2BC. Commodity Traders International, IL, USA) a fin de remover la mayor cantidad posible de impurezas de tamaño mayor al grano. Posteriormente se realizó una limpieza manual con zarandas de aluminio con perforaciones triangulares de 1.98 mm (5/64") (Seedburo Equipment Co. IL, USA). Cada muestra limpia se empacó (en bolsa de polietileno y costal de rafia, perfectamente cerrados), identificó, etiquetó y se mantuvo en una cámara de refrigeración a 4°C, hasta la realización de sus respectivos análisis y/o molienda.

Evaluaciones físicas

Peso hectolítrico. Esta determinación se realizó siguiendo el método 55-10.01 (AACCI, 2000), reportándose el valor promedio (kg/hL) correspondiente a la evaluación de tres repeticiones.

Peso de 1000 granos. De cada muestra se contaron 1,000 granos seleccionados aleatoriamente, se pesaron en una balanza analítica (OHAUS Adventurer. OHAUS, Corp. Pine Brook, NJ, USA) y se registró su peso en gramos (g). Se realizaron tres evaluaciones por muestra, reportando el valor promedio correspondiente.

Fuerza máxima a la fractura. La fuerza máxima a la fractura (F_{frac} , en N) de los granos se midió con un analizador de textura universal (TA-XT Plus Texture Technologies Corporation, Stable Micro Systems, Surrey, England) provisto de una sonda de aluminio de 2 mm de diámetro (modelo SMS P/2). El procedimiento consistió en colocar un grano sobre la plataforma del analizador de textura con la parte ventral (surco) hacia abajo. La deformación utilizada para fracturar el grano fue de 25% a una velocidad de cabezal de 3.5 mm/s (Figura 13). Se realizaron 10 repeticiones por variedad de trigo y se reportó el valor promedio.

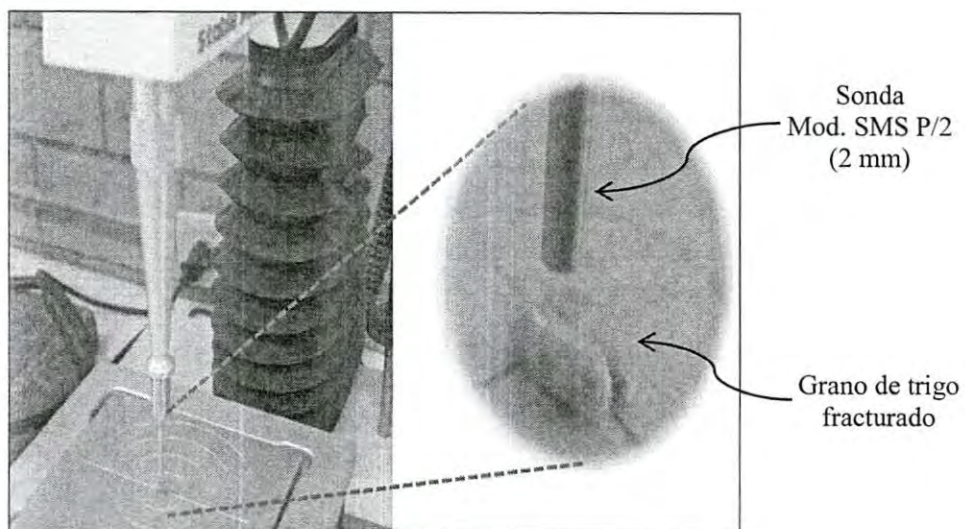


Figura 13. Prueba de fuerza máxima a la fractura (F_{frac}) en grano de trigo.

Dimensiones. A los granos seleccionados aleatoriamente para su evaluación viscoelástica, previamente se les midió el ancho y el largo (mm) (Figura 14), utilizando un vernier digital (modelo CD-6 CS, Mitutoyo, Japón). El grosor de cada grano se determinó con el analizador de textura simultáneamente durante la evaluación de las propiedades viscoelásticas. En este caso, cada grano se colocó entre los dos platos paralelos (la plataforma del analizador de textura y la sonda de aluminio de 10 mm diámetro [modelo SMS P/1KS]) dejando un espacio mínimo entre el grano y la sonda.

Al iniciar el proceso de carga y debido a la sensibilidad del equipo, éste detecta el momento en el cual ambas superficies (sonda y grano) se tocan; a partir de ese momento, la sonda se desplazó una distancia (d) correspondiente al 3% de deformación (porcentaje utilizado para evaluar las propiedades viscoelásticas del grano como se verá más adelante). El grosor total del grano (distancia en mm) es equivalente al 100% de deformación.

Al 3% de compresión, la distancia d (mm) de cada grano se registró y el grosor del grano se calculó a partir de la ecuación 1:

$$\text{Grosor} = (d/3) \times 100 \quad (1)$$

Dónde:

d es la distancia en mm al 3% de deformación.

Las dimensiones del ancho, largo y grosor reportadas fueron los valores promedio de 20 determinaciones para cada variedad de trigo y sólo se evaluaron en las muestras de grano sin acondicionar (humedad original).

Evaluaciones químicas

Contenido de humedad. La determinación de este parámetro en grano entero se realizó siguiendo el método ASAE Standard S352.2.567 (1999). De manera general, el principio de este método consistió en colocar 10 g de muestra (grano entero) a 130°C durante 19 horas. Se reportó el valor promedio (%) de 3 repeticiones por variedad.

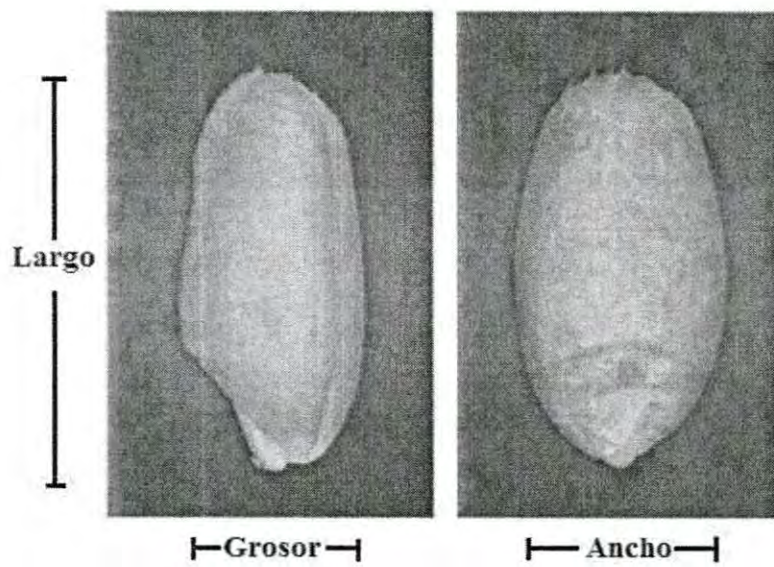


Figura 14. Dimensiones en un grano de trigo.

Fuente: Adaptado de <http://grain-gallery.com/en/wheat/images>. (Fecha de consulta: marzo 10, 2014).

Molienda integral del grano. Cincuenta gramos de cada variedad de grano se molieron en un molino de mortero (Retsch-RM200, Retsch GmbH. Haan, Germany). A partir de cada muestra de grano integral molido se realizaron las determinaciones de contenido de ceniza, proteína, proteína polimérica y perfil electroforético.

Contenido de ceniza. El contenido de ceniza del grano se determinó siguiendo el método 08-12.01 (AACCI, 2000). Se reportó el valor promedio de tres repeticiones por variedad de trigo.

Contenido de proteína. El contenido de proteína ($N \times 5.7$) se llevó a cabo de acuerdo al método 46-13.01 (AACCI, 2000), utilizando un determinador de nitrógeno (LECO FP-528. Leco Corporation MI, USA). Las determinaciones se realizaron por triplicado reportando el valor promedio correspondiente.

Proteína polimérica. La preparación de las muestras para determinar el contenido de proteína polimérica insoluble (PPI) se realizó siguiendo el método propuesto por Bean et al. (1998). La cuantificación se llevó a cabo por el método 46-13.01 (AACCI, 2000), utilizando el determinador de nitrógeno. Se reportó el valor promedio de tres repeticiones.

Perfil electroforético. El análisis electroforético de las gluteninas de alto peso molecular (G-APM) de cada una de las muestras de trigo se realizó de acuerdo a la metodología descrita por Lookhart (1991). Se empearon como patrones los genotipos: Cajeme 71, Chinese Spring y TAM 101.

Evaluación viscoelástica del grano

Desarrollo del método. En este estudio se realizaron algunas modificaciones al método propuesto por Ponce-García et al. (2008), con el objetivo de aplicar una deformación mínima (<5%) sobre el grano que permitiera considerar la teoría de la elasticidad y condiciones experimentales para trabajar dentro de la región viscoelástica lineal del material.

Con el uso del analizador de textura se midió la respuesta del grano a una carga de compresión uniaxial entre dos platos paralelos (una sonda de aluminio de 10 mm de diámetro [modelo SMS P/1KS] y la plataforma del analizador de textura). La deformación utilizada durante la

compresión fue de 3% a una velocidad de cabezal de 0.1 mm/s. Para calcular el esfuerzo ($\sigma = F/A$), fue necesario obtener la fuerza (F) registrada por el analizador de textura y el área de contacto (A) del grano.

Cada grano se pasó por un cojín con tinta y se colocó con la parte ventral (surco o hendidura) hacia abajo sobre una pieza de papel de 30 mm x 30 mm que se ubicaba en la base de la plataforma del analizador de textura (plato paralelo). Luego, otra pieza de papel se colocó en la parte superior del grano para que éste quedara entre las dos piezas de papel. La sonda de aluminio de 10 mm conectada al analizador de textura fue el otro plato paralelo (Figura 15A).

Una vez colocado el grano con tinta entre los dos platos paralelos, inició la compresión. Al concluir la carga, sobre la pieza de papel quedó impresa la huella correspondiente a la superficie de contacto del grano, la cual se digitalizó para medir su área (A) utilizando para ello el software IMAGE-J (Wayne Rasband, National Institute of Mental Health, Bethesda, Maryland, USA) (Figura 15B).

Por otro lado, el módulo de elasticidad (E) se determinó a partir de la curva esfuerzo-deformación obtenida a pequeña deformación y aplicando la siguiente ecuación:

$$E = \sigma/\varepsilon \quad (2)$$

Dónde:

σ = esfuerzo (fuerza/área),

ε = deformación. La deformación (ε) fue constante e igual a 3%.

El comportamiento viscoelástico de los granos se calculó a partir de las curvas carga/descarga obtenidas durante la compresión (Ponce-García et al., 2008). El área bajo la curva de carga representó el trabajo total ($W_t = W_p + W_e$) ejercido durante la compresión. La contribución reversible elástica (W_e) del trabajo total, puede deducirse a partir del área bajo la curva de descarga, ya que la energía absorbida por la deformación plástica (W_p), fue el resultado de la diferencia entre las dos ($W_p = W_t - W_e$) (Gubicza et al., 1996) (Figura 16).

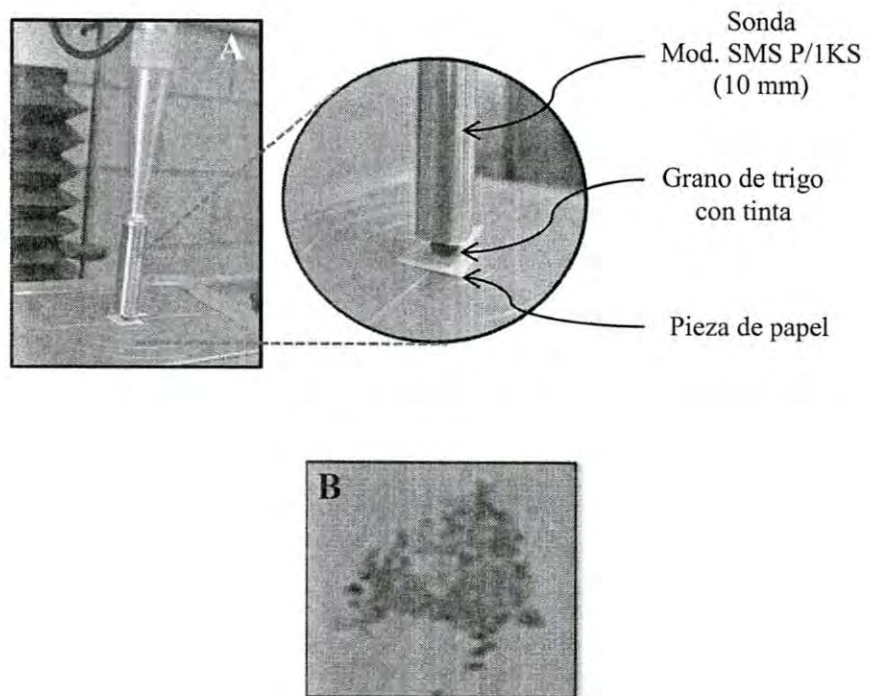


Figura 15. A. Compresión uniaxial bajo pequeña deformación en grano de trigo. Determinación del módulo de elasticidad (E); B. Huella o área de contacto del grano posterior a la compresión (digitalizada).

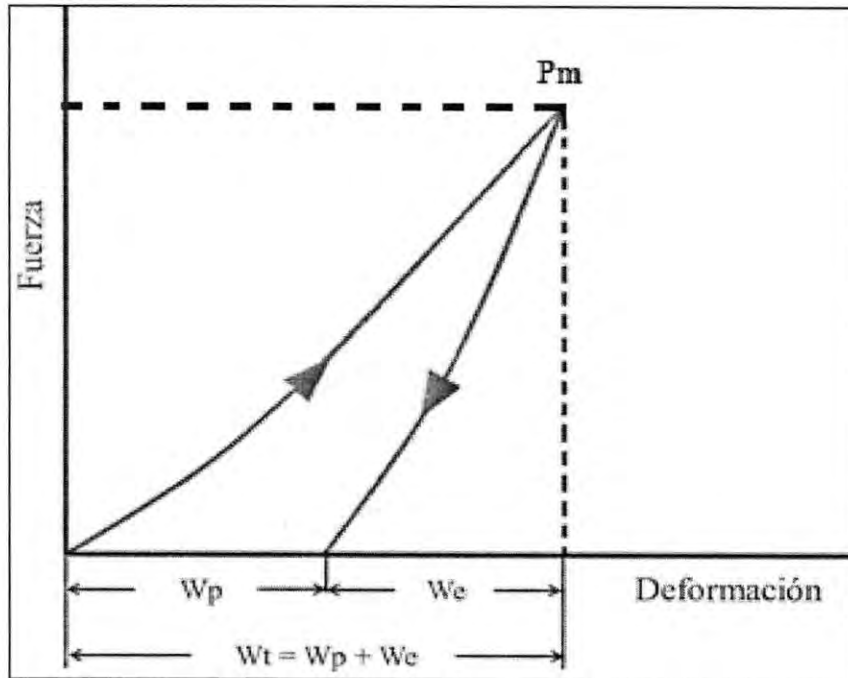


Figura 16. Esquema del ciclo de compresión carga-descarga. P_m , carga máxima; W_t , trabajo total; W_p , trabajo plástico (energía absorbida por la deformación); W_e , trabajo elástico o recuperable (desarrollado durante la descarga).

Fuente: Adaptado de Ponce-García et al. (2008).

Acondicionamiento. Para conocer el efecto del contenido de humedad sobre las propiedades viscoelásticas del grano, 50 g de cada variedad de trigo se acondicionaron a 15% de humedad de acuerdo al procedimiento reportado por Gorji et al. (2010) (Figura 17). El grano se acondicionó a 15% de humedad, debido a que ese nivel se considera como el mínimo nivel de acondicionamiento utilizado en la industria molinera.

Evaluación. Para determinar los parámetros viscoelásticos de los granos a humedad original y de acondicionamiento a 15% se tomaron aleatoriamente 20 granos de cada tratamiento y se procedió de acuerdo al método descrito en las páginas 74 y 75. Los parámetros viscoelásticos evaluados en los granos fueron: módulo de elasticidad (E , en MPa); trabajo total (W_tG), trabajo elástico (W_eG) y trabajo plástico (W_pG) en N·mm; además de su grosor (mm). El dato reportado para cada parámetro evaluado fue el valor promedio de 20 determinaciones (granos) por tratamiento (nivel de humedad).

Diseño de experimentos y análisis estadístico

Para evaluar las características físicas y químicas del trigo se utilizó un diseño de experimentos completamente al azar de dos factores. Los factores evaluados fueron: grupo de trigo (fuerte o suave) y variedad (cuatro por grupo). Para evaluar las propiedades viscoelásticas de los granos, se empleó un diseño experimental de tres factores, incluyendo el grupo, variedad y contenido de humedad (original y 15%). Con los datos obtenidos de las diferentes determinaciones se aplicó un análisis de varianza (ANDEVA) con un nivel de significancia del 95%. Se utilizó una prueba de Tukey para comparar medias entre tratamientos específicos. Se llevaron a cabo correlaciones simples de Pearson, considerándose significativas y muy significativas si $P < 0.05$ y $P < 0.01$, respectivamente. El análisis estadístico se realizó con el software SAS, versión 9.1.3 (SAS Institute, Cary, NC, USA 2002).

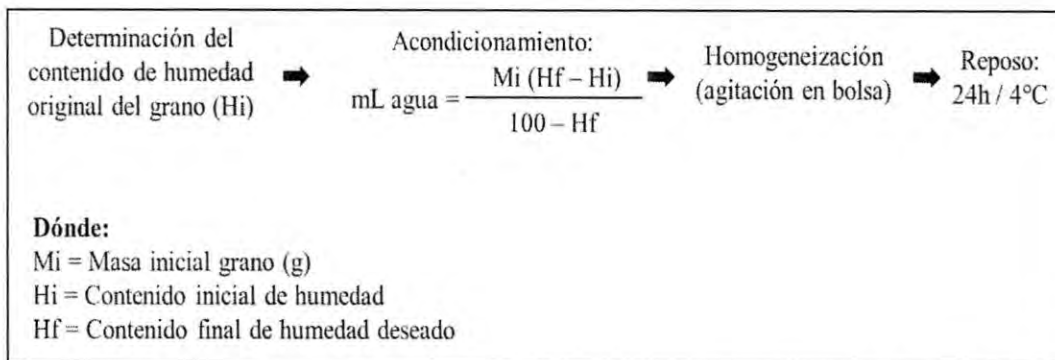


Figura 17. Diagrama y fórmula de acondicionamiento para granos de trigo.
Fuente: Adaptado de Gorji et al. (2010).

Evaluación de las Propiedades Viscoelásticas de Grano de Trigo y su Relación con Molienda, Masa y Pan

Materia prima

En esta etapa de la investigación se trabajó con las mismas ocho variedades comerciales de trigo, referidas en la página 68.

Acondicionamiento

Durante la molienda de trigo para la producción de harina, se considera que un nivel óptimo de acondicionamiento oscila entre 16%-16.5% de humedad. Así, cada una de las diferentes variedades de trigo utilizadas en esta parte del estudio se acondicionó a 16% de humedad, para llevar a cabo dos procedimientos: moler el grano acondicionado para obtener harina, y evaluar las propiedades viscoelásticas del grano a ese contenido de humedad.

El acondicionamiento a 16% de humedad se basó en el método propuesto por Gorji et al. (2010), modificando en esta etapa de la investigación el tiempo y forma en cómo se homogeneizó el agua con el grano. La modificación del método consistió en utilizar un mezclador horizontal rotativo (Chopin MR 10L, CHOPIN Technologies, Villeneuve-la-Garenne Cedex, France) manteniendo la homogeneización durante 1 h (Figura 18A).

Se acondicionaron 10 kg de cada variedad de trigo, sin embargo, debido a que la capacidad del contenedor-mezclador era limitada, cada lote de 10 kg se subdividió en 3 sub-lotes de 3.33 kg cada uno, cantidad de grano suficiente para ocupar un 50% del volumen total del contenedor, lo que permitió una adecuada incorporación del agua en el grano (Figura 18B). Al concluir el proceso de homogeneización, cada sub-lote de grano acondicionado se retiró del contenedor, se depositó en bolsa doble de polietileno, se identificó y se dejó reposar a 4°C durante 24 h (Gorji et al., 2010).

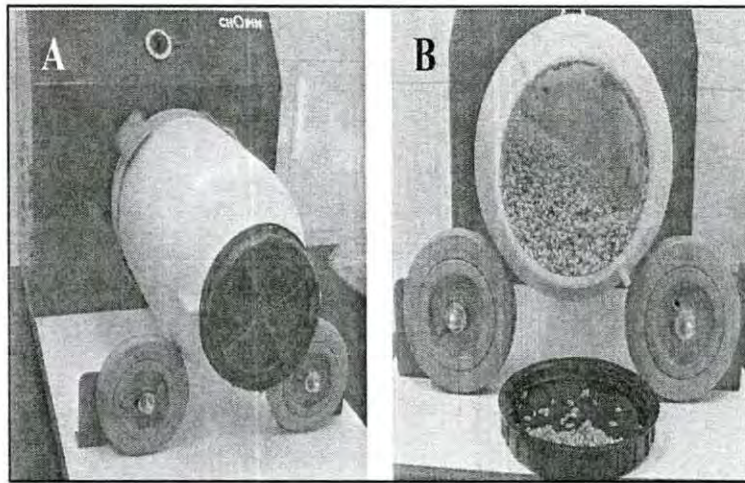


Figura 18. A. Mezclador rotativo horizontal para acondicionamiento de grano; B. Interior del contenedor de grano al término de la homogeneización.

Molienda

Para la producción de harina se utilizó un molino experimental (Brabender Quadrumat Jr. Mill Quadruplex; Brabender Instruments, South Hackensack, NJ, USA) (Figura 19), siguiendo el método 26-50.01 (AACCI, 2000). El peso de la harina de cada variedad de trigo se registró como dato para el cálculo del rendimiento de harina (%RH). La harina obtenida de cada variedad de trigo se homogeneizó durante 30 minutos utilizando una mezcladora (Mod. N50, Hobart. Troy, OH, USA) con aspa plana de aluminio (295578, Hobart. Troy, OH, USA). Posteriormente, la harina se colocó en bolsa doble de polietileno perfectamente identificada y se mantuvo en reposo (maduración) a temperatura ambiente durante dos semanas. Después de este periodo se realizaron los análisis fisicoquímicos y reológicos correspondientes, además de calcular el %RH de cada variedad.

Para estimar el rendimiento de harina de cada una de las variedades de trigo se utilizó la fórmula propuesta por Dubois & Juhué (2000):

$$\%RH = \frac{[(100-HF) \times (MF) \times (100)]}{(100-HB) \times (MB)} \quad (3)$$

Dónde:

HF=contenido de humedad de la harina, HB=contenido de humedad del trigo antes del acondicionamiento, MF=peso de la harina producida y MB=peso del trigo antes del acondicionamiento.

Caracterización de la harina

Fisicoquímica. El contenido de humedad y ceniza se determinaron por los métodos 44-15.02 y 08-12.01 (AACCI, 2000), respectivamente. El contenido de proteína (N x 5.7) se determinó a partir del método 46-13.01 (AACCI, 2000) utilizando un determinador de nitrógeno (Leco FP-528 nitrogen equipment, Leco, St. Joseph, MI, USA). El contenido de gluten húmedo (Glutomatic Perten instruments AB type 2200, Huddinge, Sweden) y el volumen de sedimentación se determinaron de acuerdo a los métodos 38-12.02 y 56-60.01 (AACCI, 2000), respectivamente. Cada análisis se realizó por triplicado reportando el valor promedio de cada determinación.

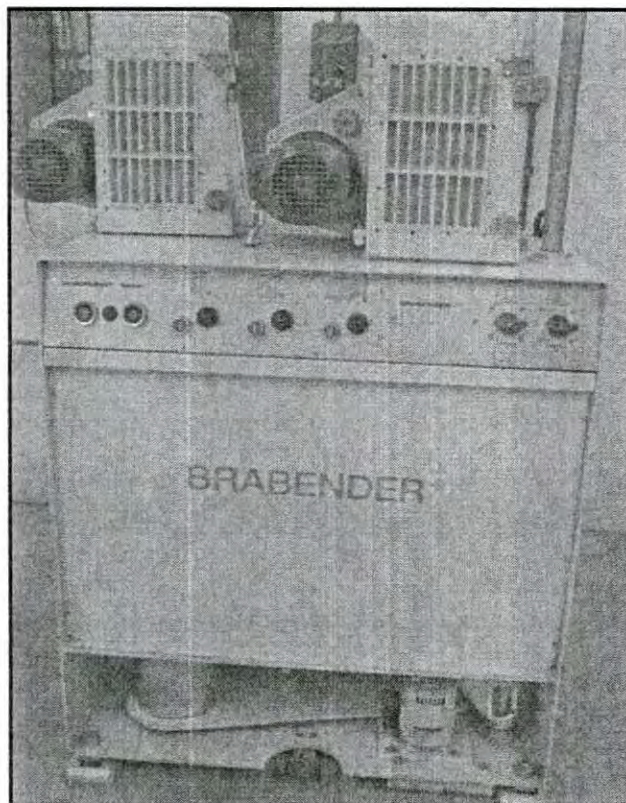


Figura 19. Molino experimental de trigo para producción de harina.

Farinográfica. Las propiedades farinográficas de la harina se evaluaron en un farinógrafo provisto de una mezcladora de 50 g (Brabender Type 810107, OHG, Duisburg, Germany) y siguiendo el método 54-21.02 (AACCI, 2000). Los parámetros evaluados fueron: absorción de agua (AA), tiempo de llegada (TLL), tiempo de desarrollo máximo (DM), estabilidad (EST) e índice de tolerancia al mezclado (ITM). Los farinogramas se realizaron por duplicado, reportando el valor promedio correspondiente para cada parámetro.

Viscoamilográfica. El procedimiento para determinar las propiedades viscoamilográficas de la harina consistió en preparar la muestra pesando 3.5 g de harina en un recipiente de aluminio y adicionar 25.5 mL de agua destilada. Se utilizó un equipo viscoamilográfico rápido (RVA Super 4, Newport Scientific). La muestra se mezcló con una paleta agitadora de plástico y se analizó mediante una rampa de calentamiento, en la cual la temperatura inicial fue de 50°C, posteriormente, se incrementó a 95°C manteniéndose durante 5 minutos. Finalmente, la temperatura disminuyó nuevamente hasta alcanzar 50°C. El parámetro evaluado fue la viscosidad máxima (VM) o pico máximo de viscosidad. Se reportó el valor promedio de dos repeticiones.

Evaluación viscoelástica del grano

Para conocer el efecto del contenido de humedad a 16% sobre las propiedades viscoelásticas del grano, pocos minutos antes de que los granos se molieran se tomaron muestras representativas de cada variedad (lote) de trigo acondicionado, y se realizó la evaluación viscoelástica del grano utilizando las mismas condiciones descritas para la evaluación viscoelástica de los granos de trigo de la primera etapa (sonda de 10 mm; deformación de 3% y velocidad de cabezal de 0.1 mm/s; págs. 74 y 75).

Las determinaciones se realizaron por separado para cada grupo de trigo, a fin de evaluar e interpretar el comportamiento de manera más específica entre variedades de un mismo grupo. Los parámetros viscoelásticos determinados fueron: W_tG ; W_eG y W_pG , en N·mm. Adicionalmente se reportaron la fuerza máxima a la compresión ($F_{máx}G$, en N) y el grado (porcentaje) de elasticidad (GEG) del grano. El dato reportado para cada parámetro evaluado fue el valor promedio de 20 determinaciones (granos).

Evaluación viscoelástica de la masa

Preparación. La masa de cada tratamiento (variedad de trigo) se preparó en la amasadora del farinógrafo mezclando 50 g de harina (14% bs) y agua destilada a 30°C. La cantidad de agua adicionada correspondió al valor de absorción de agua (AA) determinado en la caracterización farinográfica de cada harina. El mezclado se interrumpió al momento en que la masa alcanzó su tiempo de desarrollo máximo (DM), parámetro que igualmente se determinó durante la caracterización farinográfica.

Después del mezclado la masa se retiró de la mezcladora, se depositó en un recipiente plástico y se dejó reposar en una cámara de fermentación (National MFG.Co Lincoln, Nebr.) a 30°C y 85% de humedad relativa durante 20 minutos. Al transcurrir este periodo, la masa se retiró de la cámara de fermentación y el recipiente plástico que la contenía permaneció cerrado hasta realizar las pruebas correspondientes. A la masa preparada de esta forma se le evaluaron sus propiedades viscoelásticas por dos métodos: compresión uniaxial bajo pequeña deformación y dinámico oscilatorio.

Caracterización por compresión uniaxial. Para realizar esta determinación se procedió de la siguiente manera:

Desarrollo del método. Durante la presente investigación, uno de los objetivos fue evaluar las propiedades viscoelásticas de la masa aplicando el mismo método (compresión uniaxial bajo pequeña deformación) que el utilizado durante la evaluación viscoelástica del grano. Para esto fue necesario establecer algunas modificaciones y ajustes, los cuales consistieron particularmente en la forma en cómo colocar y mantener la masa entre los platos paralelos mientras se realizaba la compresión. Se diseñaron y construyeron cilindros de aluminio con una cavidad de 13 mm de diámetro x 3 mm de espesor (Figura 20A). El diámetro de la cavidad se determinó en función del diámetro de la sonda de aluminio (10 mm Modelo SMS P/1KS) que se utiliza en esta prueba, mientras que el espesor de la cavidad consideró el grosor promedio registrado en los granos de trigo evaluados en la primera etapa (análisis físico).

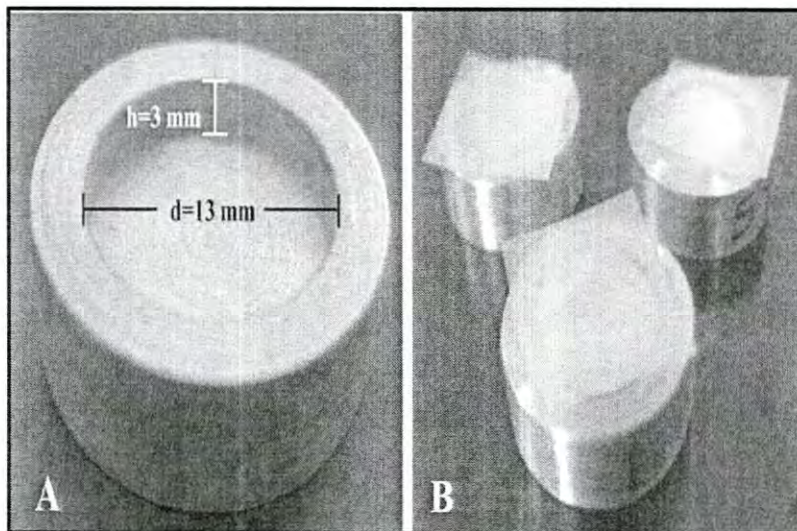


Figura 20. A. Cilindro de aluminio contenedor de masa; B. Cilindros de aluminio con masa y piezas de papel encerado sobre la superficie para evitar desecación.

El procedimiento para evaluar las propiedades viscoelásticas de la masa por compresión uniaxial bajo pequeña deformación, se realizó como se describe a continuación. Se pesaron 0.5 g de masa (previamente preparada) y se colocaron cuidadosamente en la cavidad del cilindro de aluminio. Luego, piezas de papel encerado de 20 mm x 20 mm se colocaron sobre la superficie del cilindro que contenía la masa para evitar su desecación (Figura 20B).

Posteriormente, se colocó una pesa de 1 kg durante 3 minutos sobre los cilindros de aluminio con masa para que ésta se relajara. Al término de este periodo, la pesa y las piezas de papel encerado se retiraron de los cilindros, unos segundos antes de iniciar la prueba de compresión (Figura 21).

Evaluación. El cilindro con masa se colocó sobre la plataforma del analizador de textura y se comprimió (Figura 21) siguiendo las mismas condiciones que durante la evaluación viscoelástica de los granos de trigo (deformación de 3% y velocidad de cabezal de 0.1 mm/s; págs. 74 y 75).

Las propiedades viscoelásticas evaluadas en la masa fueron: trabajo total (W_tM), trabajo elástico (W_eM) y trabajo plástico (W_pM), en N·mm. Adicionalmente se determinaron la fuerza máxima durante la compresión ($F_{máx}M$, en N) y el grado de elasticidad (GEM). Los datos reportados correspondieron al valor promedio de 5 determinaciones por variedad de trigo (masa).

Evaluación por método dinámico oscilatorio. La evaluación viscoelástica de la masa mediante la prueba dinámica oscilatoria se realizó en un reómetro (Mod. RFS III, Rheometrics Scientific, Piscataway, NJ, USA) equipado con platos paralelos de 25mm de diámetro. El procedimiento fue el siguiente: 2 g de masa preparada se colocaron en el plato inferior del reómetro, entonces se hacía descender el plato superior hasta alcanzar una separación de 2 mm con el plato inferior, quedando entre ambos platos la masa. La masa excedente se removió cuidadosamente y la superficie expuesta se cubrió con petrolato (vaselina) para evitar que perdiera humedad durante la prueba (Figura 22).

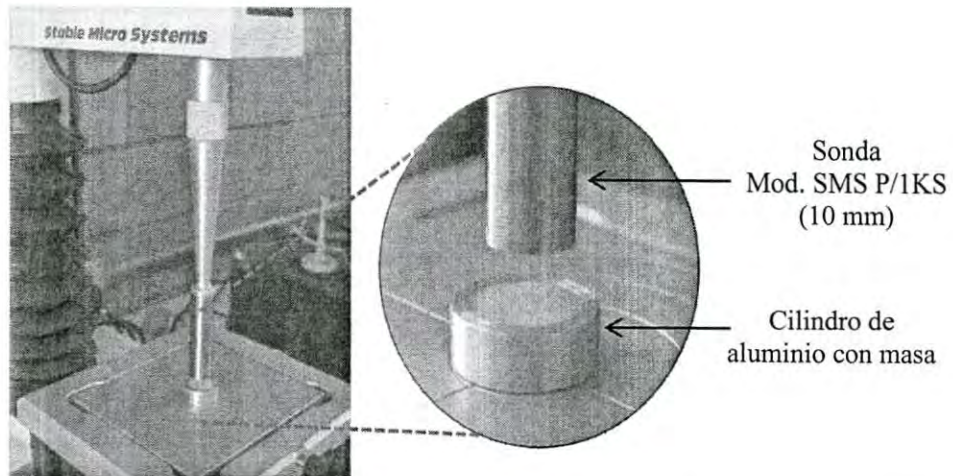


Figura 21. Prueba de compresión uniaxial bajo pequeña deformación en masa.

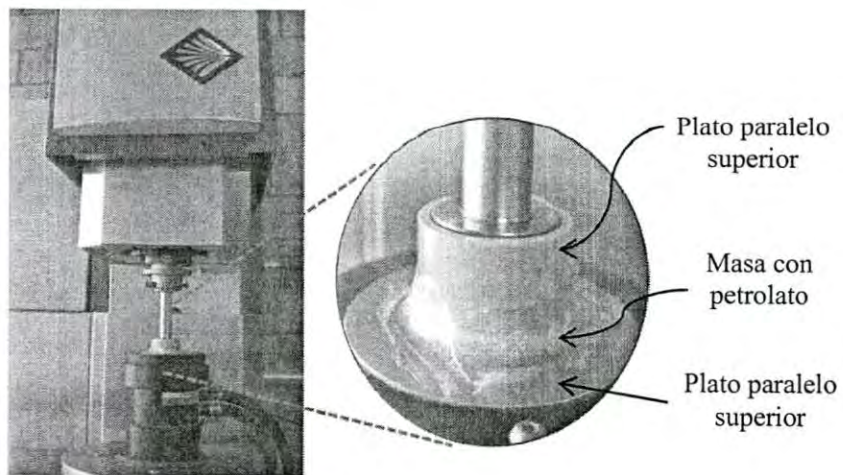


Figura 22. Prueba dinámica oscilatoria en masa.

Las condiciones de la prueba de barrido fueron: frecuencia dinámica oscilatoria de 0.1 a 100 rad/s y deformación de 0.1%, siendo ésta última la condición que permitió trabajar dentro de la región viscoelástica lineal, de acuerdo a lo reportado por Magaña et al. (2011). Los parámetros viscoelásticos evaluados fueron los módulos elástico (G') y viscoso (G''), en Pascales (Pa), así como la tangente del ángulo de fase, $\text{Tan } \delta$ (G''/G'). Se reportaron los valores promedio de dos repeticiones por cada variedad.

Elaboración del pan

La formulación básica para elaborar 3 piezas de pan por variedad consistió en 300 g de harina (100%), 3% de manteca vegetal, 1.7% de levadura seca instantánea (Nevada, SAFMEX), 2.5% de azúcar y 0.5% de sal. La cantidad de agua que se adicionó a cada harina correspondió al respectivo valor de absorción de agua (AA) registrado previamente en su farinograma. El proceso de elaboración se llevó a cabo siguiendo el método (modificado) 10-10.03 de la AACCI (2000), considerando el tiempo de desarrollo máximo (DM) registrado en el farinograma de cada harina. Cada lote de pan se conformó por 9 piezas. Al término del horneado, el lote se dejó enfriar durante 2 h a temperatura controlada (25°C) y posteriormente se determinó el volumen específico (VEP) de cada pieza de pan, tal como se describirá más adelante (Figura 23).

Después de medir el VEP, las 9 piezas que conformaron cada lote se dividieron en 3 sub-lotes de 3 panes cada uno. Cada sub-lote se colocó en bolsa doble de polietileno cerrada herméticamente y se mantuvo a temperatura controlada (25°C) hasta su evaluación. Para conocer el efecto del tiempo de almacenamiento sobre las propiedades viscoelásticas y de textura del pan, estas evaluaciones se realizaron durante tres periodos de almacenamiento, a las 2, 24 ó 48 h.

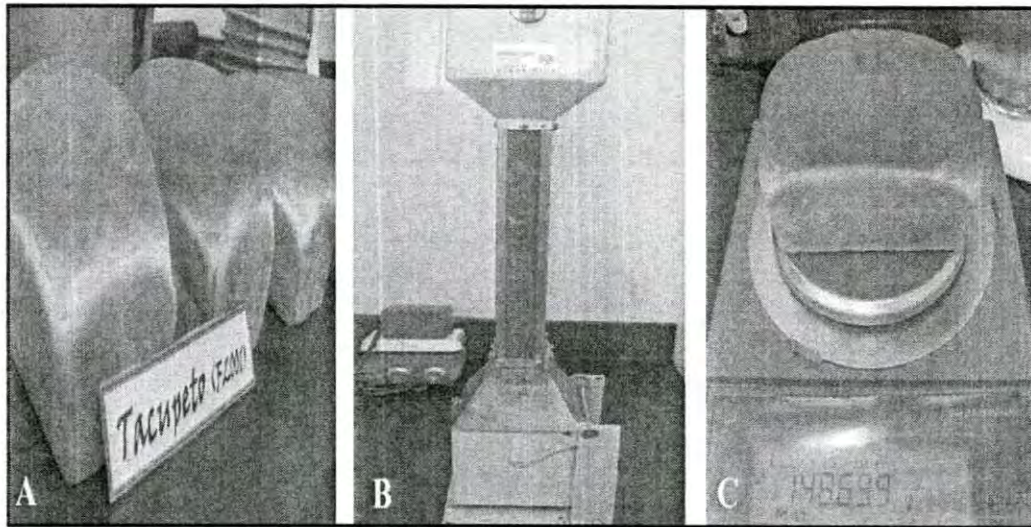


Figura 23. Diferentes operaciones en pan: A. Enfriamiento; B. Medición de volumen; C. Medición de peso.

Evaluación fisicoquímica del pan

Volumen específico. Al término del horneado, cada lote se dejó enfriar durante 2 h a temperatura ambiente (Figura 23A). Después de este periodo, a cada una de las 9 piezas que conformó el lote se les determinó el volumen (cm^3) utilizando un dispositivo de desplazamiento de semilla de nabo (mod. PUP, National, MFG) (Figura 23B). Posteriormente se registró el peso (g) de cada pieza de pan empleando una balanza analítica (Sartorius Mod. MC1 Laboratory LC 620 S. Germany) (Figura 23C). A partir del volumen y peso registrado en cada pieza de pan, se procedió a calcular su volumen específico (cm^3/g). El VEP reportado para cada variedad de pan fue el promedio correspondiente a la determinación de las 9 piezas que conformaron cada lote.

Contenido de humedad en miga y corteza. Al concluir el análisis viscoelástico y de perfil de textura correspondientes a cada día de almacenamiento (2, 24 ó 48 h), se colectaron muestras de miga y corteza de las rebanadas evaluadas y se colocaron en bolsas de polietileno cerradas herméticamente para determinar el contenido de humedad de la miga (HM) y de la corteza (HC) por el método 44-15.02 (AACCI, 2000).

Evaluación viscoelástica del pan

Desarrollo del método. Para llevar a cabo la evaluación de las propiedades viscoelásticas del pan, se utilizó el método de compresión uniaxial bajo pequeña deformación descrito anteriormente (págs. 74 y 75). Para su análisis viscoelástico y de textura, las muestras de pan se prepararon de la siguiente manera.

Cada una de las 3 piezas de pan del periodo de almacenamiento correspondiente (2, 24 ó 48 h) se cortó en rebanadas de 25 mm de espesor, utilizando un cuchillo eléctrico (Moulinex. Tipo 584. México) y un molde de madera (Figura 24A y B). Se utilizaron las mismas rebanadas para la evaluación viscoelástica y para el análisis de perfil de textura (procedimiento que se describirá más adelante).

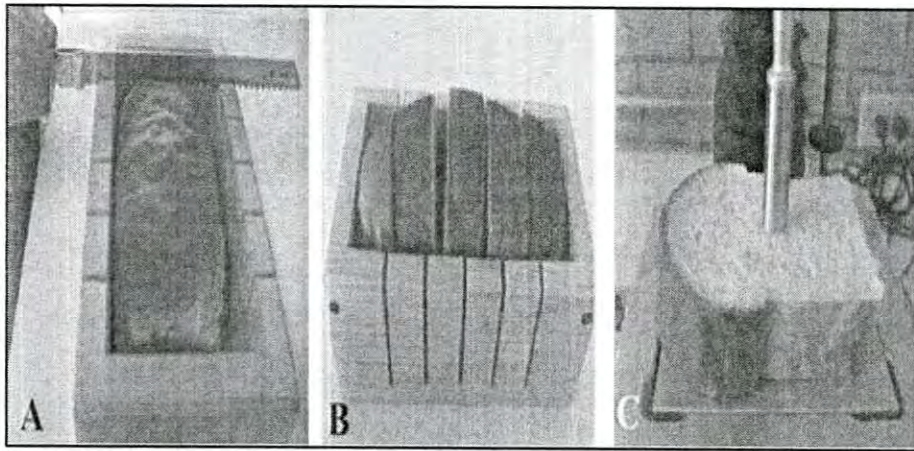


Figura 24. Operaciones en pan: A. Rebanado; B. Rebanadas en molde; C. Compresión uniaxial a pequeña deformación.

El espesor de las rebanadas consideró las necesidades del análisis de perfil de textura, en el cual se requiere que cada rebanada sea de 25 mm. Cada pieza de pan se rebanó instantes previos al inicio de la evaluación viscoelástica para evitar la desecación de las rebanadas. Se evaluaron las tres rebanadas centrales de cada pieza de pan, descartando las rebanadas de los extremos.

Evaluación. La compresión uniaxial bajo pequeña deformación se realizó en el centro de la rebanada (Figura 24C) siguiendo las condiciones del análisis viscoelástico de grano y masa: 3% de deformación a velocidad de cabezal de 0.1 mm/s.

Los parámetros viscoelásticos evaluados en el pan fueron: trabajo total (W_tP), trabajo elástico (W_eP) y trabajo plástico (W_pP), en N·mm, además de medir la fuerza máxima de compresión ($F_{máx}P$, en N) y el grado de elasticidad (GEP). Los datos reportados correspondieron al valor promedio de 9 rebanadas por periodo de almacenamiento.

Evaluación de la textura

Cada pieza de pan rebanado se colocó en bolsas de polietileno con cierre dentado hermético hasta la realización del análisis de perfil de textura (APT). La textura de cada rebanada se analizó siguiendo el método (modificado) 74-09.01 (AACCI, 2000) utilizando el analizador de textura con una sonda cilíndrica de acrílico de 25 mm de diámetro (Mod. P25/P) (Figura 25). La modificación consistió en utilizar una rebanada de 25 mm de espesor, en lugar de 2 rebanadas de 12.5 mm cada una. Los parámetros considerados en el APT fueron: firmeza (FIR); elasticidad (ELS); cohesividad (COH); resiliencia (RES) y gomosidad (GOM). Los datos reportados correspondieron al valor promedio de 9 rebanadas por periodo de almacenamiento.

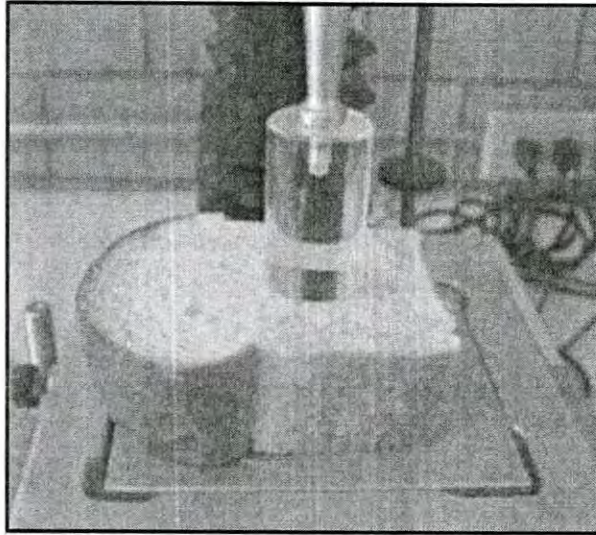


Figura 25. Análisis de perfil de textura en pan.

Diseño de experimentos y análisis estadístico

Para evaluar las propiedades de la harina y la masa se utilizó un diseño de experimentos completamente aleatorizado para cada grupo de trigo con cuatro niveles (variedades). Las propiedades viscoelásticas y de textura del pan se evaluaron utilizando para cada grupo de trigo un diseño de experimentos de dos factores. Los factores evaluados fueron: variedad y tiempo de almacenamiento (2, 24 ó 48 h). A todas las evaluaciones se les realizó un análisis de varianza (ANDEVA) con un nivel de significancia del 95%. Se utilizó una prueba de Tukey para comparar las medias entre tratamientos específicos. Se llevaron a cabo correlaciones simples de Pearson, considerándose significativas y muy significativas si $P < 0.05$ y $P < 0.01$, respectivamente. El análisis estadístico se llevó a cabo utilizando el software SAS, versión 9.1.3 (SAS Institute, Cary, NC, USA 2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación de las Propiedades Viscoelásticas de Granos de Trigo

Características físicas del grano

En la Tabla 4 se presenta el análisis de varianza (ANDEVA) del efecto del grupo y variedad de trigo sobre las propiedades físicas del grano. Se observó que tanto el grupo como la variedad de trigo presentaron un efecto muy significativo ($P < 0.01$) sobre todas las propiedades físicas evaluadas en el grano, siendo el grupo el factor que mayor influencia mostró en las determinaciones.

En la Tabla 5 se muestran los valores medios correspondientes a las propiedades físicas: peso hectolitro (PhL), peso de 1,000 granos (P_{1000}), fuerza máxima a la fractura (F_{frac}) y dimensiones (grosor, ancho y largo) del grano.

Peso hectolítrico (PhL). En cuanto al grupo, el PhL promedio del grupo fuerte fue mayor (74.6 kg/hL) que el del suave (71.6 kg/hL) en un 3%. Por otro lado, dentro de cada grupo se presentaron diferencias significativas ($P < 0.05$) entre variedades. El rango de valores entre las variedades del grupo de trigo suave osciló de 70.4 kg/hL (Cortazar) a 73.1 kg/hL (Bárcenas), mientras que en el grupo de trigo fuerte la variedad Tacupeto fue la que obtuvo el menor valor (74.2 kg/hL) y las variedades Nana y Norteña el mayor valor (75.0 kg/hL).

En variedades de trigo mexicano, Peña et al. (2008) reportaron valores similares de PhL a los obtenidos en este estudio, sin embargo, otros autores (Kihlberg et al., 2006; Hrušková & Švec, 2009; Kalkan & Kara, 2011) reportaron valores superiores (entre 77 y 87 kg/hL) durante la caracterización de diferentes variedades comerciales de trigo.

Tabla 4. Análisis de varianza, valor de F , del efecto del grupo y variedad de trigo sobre las propiedades físicas del grano.

FV ^a	F					
	PhL	P1000	F _{frac}	Grosor	Ancho	Largo
Grupo	1976.8** ^b	499.1**	228.1**	28.9**	11.5**	109.9**
Variedad	100.3**	247.4**	46.8**	13.7**	6.3**	76.1**

^a FV, fuente de variación; PhL, peso hectolítrico; P1000, peso de mil granos; F_{frac}, fuerza máxima a la fractura.

^b **Muy significativo (P<0.01).

Tabla 5. Valores medios de las propiedades físicas de granos de trigo.

Grupo/ Variedad	PhL ^a (kg/hL)	P1000 (g)	F _{frac} (N)	Grosor	Ancho	Largo
				Dimensión (mm)		
Suave						
Bárceñas	73.1 ±0.0a ^b	52.4 ±0.3a	119.1 ±14.1a	3.2 ±0.1b	3.3 ±0.1b	6.7 ±0.1b
Cortazar	70.4 ±0.3c	51.1 ±0.0b	82.1 ±6.3b	3.2 ±0.1ab	3.4 ±0.1ab	7.2 ±0.2a
Saturno	72.4 ±0.1b	49.4 ±0.1c	90.2 ±11.0b	3.1 ±0.1b	3.4 ±0.1ab	7.2 ±0.2a
Urbina	70.6 ±0.0c	51.6 ±0.6ab	111.6 ±10.5a	3.3 ±0.1a	3.4 ±0.2a	7.3 ±0.3a
Promedio	71.6	51.1	100.7	3.2	3.4	7.1
Fuerte						
Kronstad	74.5 ±0.0b	39.7 ±0.0c	132.7 ±10.3c	3.0 ±0.1c	3.2 ±0.0b	6.4 ±0.2c
Nana	75.0 ±0.0a	50.7 ±0.1a	149.9 ±10.2b	3.1 ±0.1ab	3.3 ±0.1a	7.4 ±0.2a
Norteña	75.0 ±0.0a	51.1 ±0.6a	167.6 ±12.9a	3.2 ±0.1a	3.4 ±0.1a	6.8 ±0.1b
Tacupeto	74.2 ±0.1b	47.6 ±0.6b	100.6 ±10.2d	3.0 ±0.1bc	3.4 ±0.1a	6.4 ±0.2c
Promedio	74.6	47.3	137.7	3.1	3.3	6.7

^a PhL, peso hectolítrico; P1000, peso de mil granos; F_{frac}, fuerza máxima a la fractura.

^b ±Desviación estándar. Dentro de una columna para un mismo grupo de trigo, letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (P<0.05).

Peso de 1000 granos (P1000). En cuanto al grupo, el peso promedio de mil granos del grupo suave fue 51.1 g, mientras que el de los trigos fuertes fue 47.3 g. Los valores más elevados en este parámetro se presentaron en las variedades suaves. Dentro de cada grupo se observaron diferencias estadísticas significativas entre variedades ($P < 0.05$). En el grupo suave, la variedad Saturno presentó el valor más bajo (49.4 g) y la variedad Bárcenas alcanzó el más alto (52.4 g). Los valores promedio de P1000 entre las variedades del grupo fuerte variaron de 39.7 g (Kronstad) a 51.1 g (Norteña).

Los pesos de 1,000 granos de este estudio fueron similares a los de otros autores (Hrušková & Švec, 2009; Marzec et al., 2011; Kalkan & Kara, 2011) y ligeramente superiores a los reportados por Kaur et al. (2013), quienes básicamente caracterizaron variedades regionales de grano para asociar su calidad con parámetros de molienda y calidad de harina.

Por otro lado, Dziki & Laskowski (2006) consideraron que este parámetro físico puede ser útil para comparar variedades cultivadas bajo diferentes condiciones climáticas y agronómicas. En general, a mayor P1000 se considera que la cariósipide alcanzó un llenado más uniforme y completo, así como menores daños en su constitución durante su desarrollo (por ejemplo, menor presencia de granos enjutados). Mabilie & Abecassis (2003) sugirieron que la morfología del grano de trigo es esencial para calcular el rendimiento harinero, lo que a su vez permite establecer la importancia de las pruebas de peso en grano, tales como el peso de 1,000 granos y el peso hectolítrico.

Fuerza máxima a la fractura. En cuanto al grupo (Tabla 5), se observó que el valor promedio de F_{frac} del grupo fuerte fue mayor (137.7 N) que el del grupo suave (100.7 N). Por otro lado, en el grupo suave el rango de valores entre variedades fue de 82.1 N (Cortazar) a 119.1 N (Bárcenas), mientras que en el grupo fuerte la variedad Tacupeto tuvo el menor promedio de fuerza máxima a la fractura (F_{frac}) con 100.6 N y la variedad Norteña obtuvo el valor más alto (167.6 N).

Los valores de F_{frac} alcanzados en este estudio fueron similares a los reportados por Dziki (2008) y Gorji et al. (2010), quienes midieron la resistencia a la fractura en términos de fuerza de ruptura del grano y energía y la asociaron con el consumo de energía durante la molienda.

Es importante considerar que la fuerza necesaria para fracturar un grano de trigo depende potencialmente de la densidad de su endospermo, condición asociada al grado de adhesividad entre la matriz proteica y los gránulos de almidón. De acuerdo con Dobraszczyk et al. (2002), genéticamente en una variedad de trigo fuerte se espera dominen características como la dureza o fuerza a la fractura, sin embargo, también se pueden presentar características típicas de trigo suave, por lo que una clasificación genética puede no necesariamente describir las características físicas del grano.

Dimensiones. En cuanto al grupo (Tabla 5), el grosor promedio del grupo suave (3.2 mm) fue ligeramente superior al del grupo fuerte (3.1 mm). Por otro lado, tanto en el grupo suave como el fuerte se presentaron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) entre sus respectivas variedades. En el grupo suave, la variedad Urbina mostró el valor más alto (3.3 mm) y la variedad Saturno el más bajo (3.1 mm), mientras que en el grupo fuerte el grosor de las variedades varió de 3.0 mm (Kronstad y Tacupeto) a 3.2 mm (Norteña).

En un estudio que determinó el grado de elasticidad y otras propiedades mecánicas de granos de trigo utilizando pruebas de compresión, Figueroa et al. (2011a) reportaron valores medios de grosor ligeramente inferiores a los de este estudio en granos suaves y fuertes de variedades de trigo mexicano con 13% de humedad. De acuerdo con Elbatawi & Arafa (2008) y Figueroa et al. (2011b), la dureza de un grano puede ser dependiente de su grosor, sin dejar de considerar el efecto del contenido de humedad del grano.

El valor promedio correspondiente al ancho en granos del grupo suave (3.4 mm) fue ligeramente mayor que el promedio del grupo fuerte (3.3 mm). En cada grupo de trigo se presentaron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) entre variedades. En las variedades del grupo suave la variedad Bárcenas presentó un promedio diferente (3.3 mm) al resto del grupo (3.4 mm). Entre las variedades del grupo fuerte, el ancho de grano osciló entre 3.2 mm (Kronstad) y 3.4 mm (Norteña y Tacupeto).

El largo del grano fue la dimensión que mostró mayor influencia por efecto del grupo y variedad. En los grupos de trigo (Tabla 5), se observó que el valor promedio de largo de grano del grupo suave (7.1 mm) fue mayor que el del grupo fuerte (6.7 mm). Ambos grupos de trigo

presentaron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) entre sus respectivas variedades. Las variedades suaves mostraron un rango entre 6.7 mm (Bárcenas) y 7.3 mm (Urbina). Las variedades del grupo fuerte presentaron promedios de 6.4 mm (Kronstad y Tacupeto) a 7.4 mm (Nana).

Kalkan & Kara (2011) reportaron valores similares para el largo de los granos, aunque observaron valores menores tanto para el grosor como para el ancho, durante una investigación en la que determinaron propiedades físicas, aerodinámicas y mecánicas de granos de trigo.

La evaluación de las dimensiones del grano es un factor de calidad importante en varios sentidos. Por ejemplo, Evers & Millar (2002) discutieron que además de ser elemental conocer el tamaño y la forma individual de los granos, la uniformidad de su morfología es muy importante en términos de procesamiento.

Características químicas del grano

En la Tabla 6 se presenta el análisis de varianza (ANDEVA) del efecto del grupo y variedad de trigo sobre las características químicas del grano. Se observa que tanto el grupo como la variedad tuvieron un efecto muy significativo ($P < 0.01$) sobre las propiedades: humedad, ceniza, proteína y proteína polimérica. El grupo tuvo mayor influencia que la variedad en los parámetros químicos determinados, excepto en el contenido de proteína.

En la Tabla 7 se presentan los valores medios de las propiedades químicas: humedad, ceniza, proteína y proteína polimérica de granos de trigo de diferentes grupos y variedades.

Contenido de humedad. En cuanto al grupo (Tabla 7), el contenido promedio de humedad original del grupo suave (9.7%) fue ligeramente mayor al promedio del grupo fuerte (9.4%). Por otro lado, se presentaron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) entre las variedades correspondientes a cada grupo de trigo. Las variedades del grupo suave presentaron valores de 9.4% (Bárcenas) a 10.1% (Saturno), mientras que en las variedades del grupo fuerte el rango osciló entre 9.1% (Nana) y 9.7% (Norteña).

Tabla 6. Análisis de varianza, valor de *F*, del efecto del grupo y variedad de trigo sobre las propiedades químicas del grano.

FV ^a	<i>F</i>			
	Humedad	Ceniza	Proteína	PPI
Grupo	45.1**	1557.6**	5.7* ^b	130.6** ^c
Variedad	12.7**	133.0**	133.9**	19.6**

^a FV, fuente de variación; PPI, proteína polimérica insoluble.

^b *Significativo (P<0.05).

^c **Muy significativo (P<0.01).

Tabla 7. Valores medios de las propiedades químicas de granos de trigo de diferentes grupos y variedades.

Grupo/ Variedad	Humedad	Ceniza ^a	Proteína ^a	PPI ^{a, b}
	(%)			
Suaves				
Bárceñas	9.4 ± 0.2b ^c	1.76 ± 0.02b	10.6 ± 0.0c	7.5 ± 0.0b
Cortazar	9.7 ± 0.1ab	1.78 ± 0.01b	12.7 ± 0.0b	7.8 ± 0.0ab
Saturno	10.1 ± 0.1a	1.65 ± 0.02c	12.4 ± 0.0b	7.8 ± 0.2ab
Urbina	9.8 ± 0.1ab	1.95 ± 0.03a	13.5 ± 0.1a	8.4 ± 0.3a
Promedio	9.7	1.78	12.3	7.8
Fuertes				
Kronstad	9.4 ± 0.0b	1.61 ± 0.01a	12.7 ± 0.1a	9.2 ± 0.0a
Nana	9.1 ± 0.0c	1.39 ± 0.01c	12.8 ± 0.0a	9.1 ± 0.2a
Norteña	9.7 ± 0.1a	1.36 ± 0.01c	12.6 ± 0.2a	9.5 ± 0.0a
Tacupeto	9.3 ± 0.0b	1.57 ± 0.00b	11.6 ± 0.0b	7.9 ± 0.1b
Promedio	9.4	1.48	12.4	8.9

^a Valores en base seca (%bs).

^b PPI, proteína polimérica insoluble.

^c ±Desviación estándar. Dentro de una columna para un mismo grupo de trigo, letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (P<0.05).

De acuerdo a Callejo (2002), el nivel máximo de humedad de almacenamiento permitido para grano de trigo es de 14%, siempre y cuando la temperatura y humedad relativa del producto no exceda 20°C y 70%, respectivamente.

Contenido de ceniza. En cuanto al grupo (Tabla 7), el contenido promedio de ceniza del grupo suave fue 1.78%, valor superior al promedio alcanzado por el grupo fuerte que fue 1.48%. Por otro lado, en ambos grupos de trigo se presentaron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) entre variedades. Las variedades suaves presentaron valores medios entre 1.65% (Saturno) y 1.95% (Urbina), mientras los valores medios de las variedades del grupo fuerte oscilaron entre 1.36% (Norteña) y 1.61% (Kronstad).

Los valores medios de ceniza obtenidos en ambos grupos de trigo en esta investigación, fueron similares a los reportados en otros estudios (Andersen & Harazi, 2009; Marzec et al., 2011) enfocados en la evaluación de las propiedades mecánicas y reológicas de granos de trigo.

El contenido de sustancias minerales en el grano, es un factor que puede estar influenciado por la genética del cultivo, así como por las condiciones agronómicas en que éste se produjo. Posner & Hibbs (1999) señalaron que un elevado contenido de ceniza en el grano no debe interpretarse forzosamente como factor determinante para alcanzar un elevado contenido de cenizas en la harina y viceversa.

Contenido de proteína. En relación al grupo (Tabla 7), el contenido promedio de proteína del grupo fuerte (12.4%) fue ligeramente mayor al del grupo suave (12.3%). En ambos grupos de trigo se presentaron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) entre variedades. En el grupo suave el rango de valores promedio entre variedades fue amplio, presentándose valores entre 10.6% (Bárceñas) y 13.5% (Urbina). Dentro del grupo fuerte, el promedio de proteína entre variedades fue menos amplio, oscilando entre 11.6% (Tacupeto) y 12.8% (Nana).

Por otro lado, la variedad suave Urbina presentó el valor más alto de proteína (13.5%) y el segundo valor más bajo de peso hectolítrico (70.6 kg/hL, Tabla 5). Peña et al. (2008) consideran que en casos como este, el elevado contenido de proteína puede deberse a un pobre llenado de grano.

En otros estudios (Espitia et al., 2004; Peña et al., 2008; Figueroa et al., 2011a) se reportaron valores de proteína en variedades de trigo mexicano similares a los de esta investigación. Sin embargo, en genotipos europeos Andersen & Harazi (2009) obtuvieron valores ligeramente más elevados en variedades fuertes, pero valores similares a los de la presente investigación en variedades suaves.

Proteína polimérica insoluble. En cuanto al grupo (Tabla 7) y a diferencia del contenido promedio de proteína dónde los valores promedio entre ambos grupos fueron muy semejantes, en el caso de la proteína polimérica la diferencia entre grupos fue mayor. El grupo de trigo fuerte presentó un valor promedio (8.9%) superior al del grupo suave (7.8%). Por otro lado, las variedades correspondientes a cada grupo de trigo presentaron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) entre ellas. Dentro del grupo suave, los valores de tres variedades oscilaron entre (7.5% y 7.8%), siendo la variedad Urbina la que se distinguió por alcanzar el valor medio superior (8.4%) en este grupo. De igual forma, en el grupo fuerte tres variedades mostraron un rango de valores promedio de proteína polimérica estrecho (9.1% a 9.5%), siendo la variedad Tacupeto la que presentó el valor más bajo (7.9%).

La cuantificación de proteína polimérica insoluble (PPI) en trigo es una evaluación que permite estimar de manera más directa (comparado con el contenido de proteína) la calidad panificable del grano. El contenido de PPI se asocia directamente con la funcionalidad y aptitud panificable.

Bekes et al. (2004) discutieron que la caracterización de las proteínas del trigo considerando sólo su contenido, implica a una pérdida importante de información relacionada con su composición. De igual forma, Gianibelli et al. (2001) estimaron que la calidad proteica está determinada por la estructura molecular de las proteínas de almacenamiento, las cuales controlan la interacción entre proteínas durante procesos como el de panificación.

Perfil electroforético. La caracterización de la composición de las subunidades de gluteninas de alto peso molecular (G-APM) de las variedades de estudio, se realizó mediante electroforesis en geles de poliacrilamida con dodecil sulfato de sodio (SDS-PAGE, por sus

siglas en inglés), utilizando como patrones electroforéticos de referencia los genotipos: Cajeme 71, Chinese Spring y TAM 101.

En la Tabla 8 se presentan las variantes alélicas de las G-APM de cada variedad de trigo, mientras que en las Figuras 26 y 27 se muestran los geles correspondientes a los grupos de trigo suave y fuerte, respectivamente. En cada figura se señala con una flecha el número de la variante alélica (banda) correspondiente a cada subunidad proteica.

En todas las variedades del grupo suave (Figura 26) las subunidades proteicas 2+12 tuvieron presencia, mientras que en las variedades del grupo de trigo fuerte (Figura 27) se presentaron las subunidades 5+10. El perfil electroforético realizado permitió verificar la autenticidad de cada una de las variedades de trigo utilizadas en esta investigación. Por otro lado, estos resultados determinaron la distinción de la calidad entre las variedades y grupos de trigo utilizados, estimando que las variedades del grupo fuerte presentarían una mejor calidad de gluten (fuerza) comparado con las variedades del grupo suave. Específicamente, la variedad Tacupeto se caracterizó por incluir en su perfil sólo subunidades proteicas consideradas con efecto positivo en la fuerza del gluten (2*, 17+18, 5+10).

De acuerdo con Espitia et al. (2008), entre las gluteninas de alto peso molecular (G-APM) que tienen influencia sobre la fuerza del gluten se encuentran las subunidades 1, 2*, 7+8, 17+18 y 5+10, con efecto positivo. Las subunidades 7+9 y 2+12, se asocian con un efecto de fuerza intermedio en el gluten.

Las características electroforéticas de las variedades de esta investigación coincidió con el estudio de la diversidad genética de gluteninas en trigos mexicanos realizada por Martínez-Cruz et al. (2010).

Tabla 8. Variantes alélicas de las gluteninas de alto peso molecular (G-APM) en grano de trigo de diferentes grupos y variedades.

Grupo / Variedad	G-APM		
	<i>Glu-A1</i>	<i>Glu-B1</i>	<i>Glu-D1</i>
Suave			
Bárceñas	2*	7+8	2+12
Cortazar	2*	17+18	2+12
Saturno	1	17+18	2+12
Urbina	2*	7+8	2+12
Fuerte			
Kronstad	2*	7+9	5+10
Nana	2*	7+9	5+10
Norteña	1	7+9	5+10
Tacupeto	2*	17+18	5+10

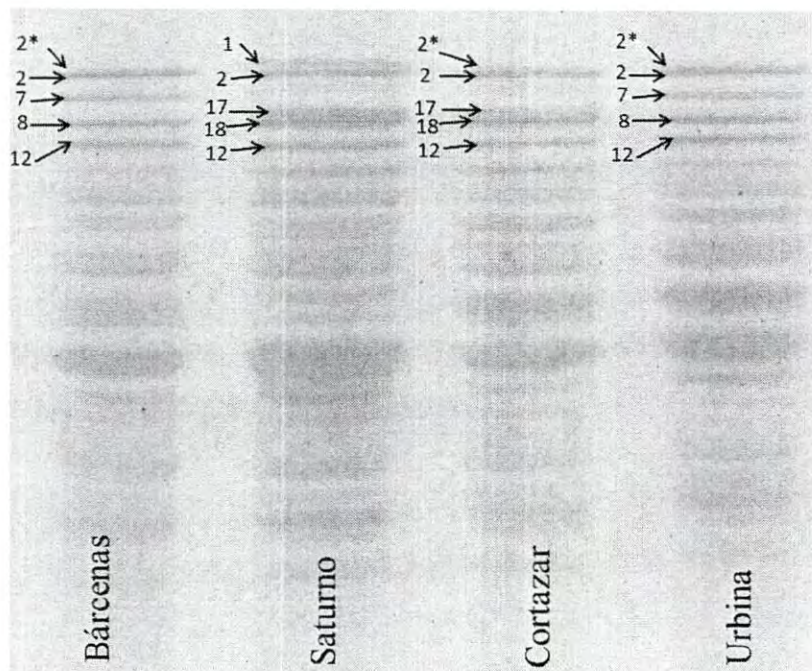


Figura 26. Subunidades proteicas de variedades de trigo suave en gel de poliacrilamida.

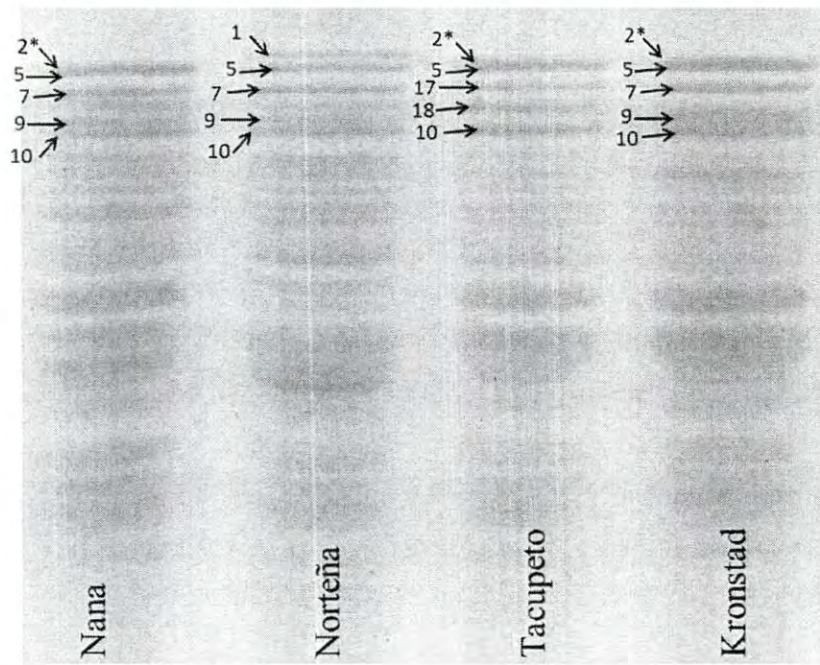


Figura 27. Subunidades proteicas de variedades de trigo fuerte en gel de poliacrilamida.

Características viscoelásticas del grano

En cuanto a la reproducibilidad del método de compresión uniaxial bajo pequeña deformación, cada uno de los parámetros viscoelásticos evaluados en el grano: trabajo total (W_tG), trabajo elástico (W_eG) y trabajo plástico (W_pG) mostraron un coeficiente de variación (CV) de $\approx 30\%$, tanto a humedad original como de acondicionamiento, mientras que en el módulo de elasticidad (E) el CV fue $\approx 22\%$. De acuerdo con estos valores, se concluyó que el método tuvo una buena reproducibilidad para evaluar las propiedades viscoelásticas del grano entero.

En la Tabla 9 se presenta el análisis de varianza del efecto del grupo, variedad (V) y humedad (H) del trigo sobre las propiedades viscoelásticas del grano: W_tG , W_eG , W_pG y E . Se observó que los tres factores, así como la interacción $V \times H$ tuvieron un efecto muy significativo ($P < 0.01$) en las propiedades viscoelásticas del grano. El contenido de humedad fue el factor que presentó mayor efecto sobre las características viscoelásticas del grano, excepto sobre E , en el cual tuvo mayor influencia el grupo.

Los valores medios y el comportamiento de las propiedades viscoelásticas de los diferentes grupos y variedades de trigo a humedad original y de acondicionamiento (15%) se presentan en la Tabla 10.

En los grupos de trigo (Tabla 10), los valores promedio de W_tG de granos del grupo de trigo fuerte, tanto a humedad original como a humedad de 15% fueron mayores que los del grupo suave. A humedad original, el promedio de W_tG del grupo suave fue de $0.211 \text{ N}\cdot\text{mm}$, descendiendo su valor (58.8%) hasta $0.087 \text{ N}\cdot\text{mm}$ al incrementarse el contenido de humedad a 15%. La misma tendencia mostró el grupo de trigo fuerte, al disminuir 58.4% su valor promedio de $0.274 \text{ N}\cdot\text{mm}$ a $0.114 \text{ N}\cdot\text{mm}$.

En cuanto a las variedades, en el grupo de trigo suave la variedad Urbina mostró un comportamiento diferente al resto del grupo, ya que presentó el menor valor de W_tG a humedad original ($0.193 \text{ N}\cdot\text{mm}$), pero el más alto del grupo a humedad de 15% ($0.173 \text{ N}\cdot\text{mm}$). Cabe destacar que a diferencia del resto de las variedades, la variedad suave Urbina presentó el menor descenso (10%) de W_tG al incrementar su contenido de humedad de 9.8 a 15%.

Tabla 9. Análisis de varianza, valor de F , del efecto del grupo, variedad y humedad sobre las propiedades viscoelásticas del grano.

FV ^a	F			
	W _t G	W _e G	W _p G	E
Grupo (G)	58.6** ^b	66.8**	14.7**	178.1**
Variedad (V)	19.3**	18.8**	10.8**	82.9**
Humedad (H)	574.1**	535.2**	328.7**	21.7**
V x H	10.2**	6.4**	17.9**	24.4**

^a FV, fuente de variación; W_tG, trabajo total en grano; W_eG, trabajo elástico en grano; W_pG, trabajo plástico en grano; E , módulo de elasticidad en grano.

^b **Muy significativo (P<0.01).

Tabla 10. Valores medios de las propiedades viscoelásticas de granos de trigo de diferentes grupos y variedades, a humedad original y de acondicionamiento (15%) evaluados bajo pequeña deformación.

Grupo / Variedad	Humedad (%)	W_tG^a	W_eG (N·mm)	W_pG	E (MPa)
Suave					
Bárceñas	9.4	0.217 ±0.06 ^b	0.135 ±0.05	0.082 ±0.01	16.41 ±4.43
	15	0.074 ±0.01	0.030 ±0.00	0.044 ±0.00	9.30 ±2.06
Cortazar	9.7	0.219 ±0.07	0.134 ±0.05	0.085 ±0.02	12.76 ±2.18
	15	0.062 ±0.01	0.027 ±0.00	0.035 ±0.00	12.04 ±3.96
Saturno	10.1	0.217 ±0.05	0.136 ±0.04	0.081 ±0.02	14.18 ±2.36
	15	0.043 ±0.00	0.016 ±0.00	0.027 ±0.00	6.39 ±1.55
Urbina	9.8	0.193 ±0.06	0.125 ±0.05	0.068 ±0.01	16.84 ±3.78
	15	0.173 ±0.04	0.093 ±0.02	0.080 ±0.02	21.33 ±4.28
Promedio HO		0.211	0.132	0.079	15.04
Promedio H15		0.087	0.041	0.046	12.26
Fuerte					
Kronstad	9.4	0.308 ±0.07	0.215 ±0.06	0.093 ±0.01	23.32 ±4.97
	15	0.127 ±0.03	0.072 ±0.02	0.055 ±0.01	25.14 ±6.01
Nana	9.1	0.241 ±0.06	0.160 ±0.04	0.081 ±0.01	15.55 ±2.48
	15	0.081 ±0.02	0.039 ±0.01	0.042 ±0.01	13.54 ±4.07
Norteña	9.7	0.242 ±0.07	0.157 ±0.05	0.085 ±0.02	17.17 ±2.36
	15	0.062 ±0.02	0.024 ±0.00	0.038 ±0.01	8.32 ±1.34
Tacupeto	9.3	0.308 ±0.06	0.220 ±0.05	0.088 ±0.01	21.75 ±3.00
	15	0.191 ±0.05	0.116 ±0.04	0.075 ±0.01	27.03 ±4.29
Promedio HO		0.274	0.188	0.086	19.44
Promedio H15		0.114	0.062	0.052	18.50

^a W_tG , trabajo total de grano; W_eG , trabajo elástico o trabajo recuperable de grano; W_pG , trabajo plástico o trabajo disipado de grano; E , módulo de elasticidad; HO, humedad original de grano; H15, humedad de acondicionamiento en grano (15%).

^b ±Desviación estándar.

En el grupo fuerte, los valores de W_iG a humedad original fueron iguales en las variedades Tacupeto y Kronstad (0.308 N·mm) y muy similares entre las variedades Nana (0.241 N·mm) y Norteña (0.242 N·mm). Sin embargo, los valores de W_iG entre las variedades de este grupo a humedad de 15% tuvieron una mayor variación, al oscilar entre 0.062 N·mm (Norteña) y 0.191 N·mm (Tacupeto).

Los valores medios y la tendencia de comportamiento observada en el parámetro W_iG de esta investigación coincidieron con los reportado en otros estudios (Ponce-García et al., 2008; Figueroa et al., 2011a), en los cuales se evaluaron las propiedades viscoelásticas de granos individuales de trigo.

En lo que respecta al trabajo elástico del grano (W_eG), en los grupos de trigo (Tabla 10) se observa que a humedad original el grupo de trigo fuerte tuvo un promedio de 0.188 N·mm, mientras que el grupo suave presentó un valor de 0.132 N·mm. Al incrementarse el contenido de humedad del grano a 15%, los promedios de W_eG descendieron tanto para el grupo suave (0.041 N·mm) como para el grupo fuerte (0.062 N·mm).

En cuanto a las variedades a humedad original, las del grupo suave mostraron una tendencia de comportamiento similar entre ellas al registrar un rango de valores de W_eG estrecho entre 0.125 N·mm (Urbina) y 0.136 N·mm (Saturno), mientras que las variedades del grupo fuerte presentaron valores entre 0.157 N·mm (Norteña) y 0.220 N·mm (Tacupeto). Los valores de W_eG a 15% de humedad en las variedades del grupo suave variaron de 0.016 N·mm (Saturno) a 0.093 N·mm (Urbina). Dentro del grupo de trigo fuerte, la variedad Norteña tuvo el menor valor (0.024 N·mm), mientras que la variedad Tacupeto presentó el mayor valor del grupo (0.116 N·mm).

En relación al trabajo plástico (W_pG) de los grupos de trigo (Tabla 10), a contenido de humedad original, el grupo fuerte tuvo un promedio de (0.086 N·mm), el cual fue mayor al del grupo suave (0.079 N·mm). A humedad de 15%, los valores promedio de W_pG descendieron a 0.052 N·mm en el grupo fuerte y a 0.046 N·mm en el grupo suave. La tendencia general en ambos grupos de trigo fue que la proporción de W_pG resultó ser mayor en comparación con W_eG al incrementarse el contenido de humedad en el grano, es decir, se presentó un

incremento en el grado de plasticidad (aumento de W_pG). De acuerdo con Bargale et al. (1995), el incremento de humedad en el grano causa plastificación y cambios en las propiedades viscoelásticas.

A contenido de humedad original, las variedades del grupo fuerte presentaron valores de W_pG entre 0.081 N·mm (Nana) y 0.093 N·mm (Kronstad), mientras que en las variedades suaves este parámetro osciló entre 0.068 N·mm (Urbina) y 0.085 N·mm (Cortazar). Los valores de W_pG a 15% de humedad en las variedades del grupo fuerte fueron de 0.038 N·mm (Norteña) a 0.075 N·mm (Tacupeto), mientras que en las variedades del grupo suave a este mismo contenido de humedad se registraron valores de 0.027 N·mm (Saturno) a 0.080 N·mm (Urbina).

En la Figura 28 se presenta una curva típica fuerza-distancia del comportamiento viscoelástico de una variedad de trigo suave (Saturno) y una variedad fuerte (Nana) a contenido de humedad original y 15%. Se observa que en la variedad Saturno (Figura 28, A-B), el valor de W_tG decreció aproximadamente 80% (de 0.217 a 0.044 N·mm) debido al incremento del contenido de humedad en el grano (de 10.1 a 15%). Por otro lado, la variedad fuerte Nana (Figura 28, C-D) mostró un comportamiento similar, ya que su valor de W_tG disminuyó 66% como consecuencia del incremento de su contenido de humedad (de 9.1 a 15%).

El efecto causado por el incremento de la humedad en el grano, no sólo reduce el valor de W_tG , sino al mismo tiempo provoca una reducción proporcional de W_eG e inversamente un incremento proporcional de W_pG . En otras palabras, en las variedades a humedad original del grupo suave y del grupo fuerte, la tendencia de comportamiento viscoelástico de los granos fue claramente $W_eG > W_pG$. Por el contrario, cuando el contenido de humedad se incrementó a 15%, el comportamiento del grupo suave fue $W_eG < W_pG$; sin embargo, en el grupo fuerte permaneció la tendencia $W_eG > W_pG$, pero la proporción de W_pG se incrementó en comparación con la registrada a humedad original. Este comportamiento pudiera atribuirse a que las variedades del grupo fuerte requieren de mayor tiempo de acondicionamiento para absorber el agua de acondicionamiento y alcanzar una plastificación más completa.

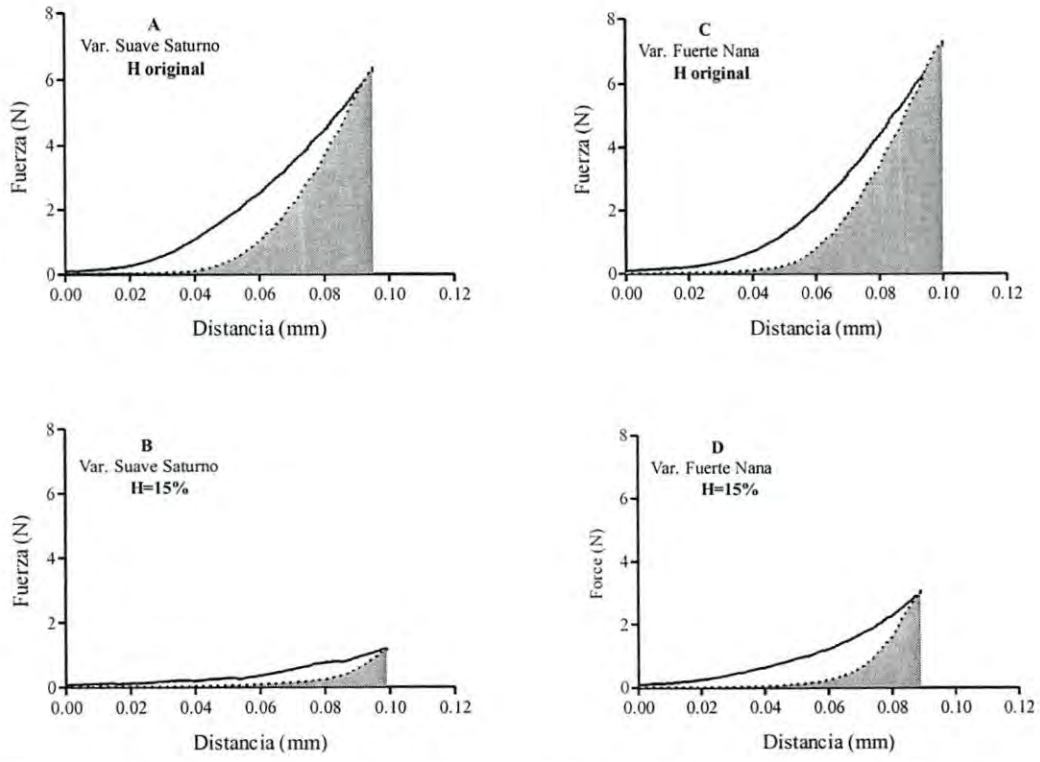


Figura 28. Curvas fuerza-distancia a una deformación de 3% en granos de trigo suave Saturno (A-B); y fuerte Nana (C-D) a humedad original y de acondicionamiento a 15%. Las líneas continuas indican la carga y las líneas punteadas la descarga; el área gris es W_eG ; y el área sin sombrear representa W_pG .

Figueroa et al. (2011a) estudiaron el comportamiento de W_tG , W_eG y W_pG en una variedad de trigo suave con humedad de 13% utilizando pruebas de compresión uniaxial a cuatro niveles diferentes de deformación (6.8, 13.5, 16.9 y 20.3%), encontrando valores generalmente más elevados que los reportados en este estudio. De acuerdo con estos autores, la comparación directa de estas determinaciones a partir de la literatura y de otros estudios suele ser contrastante, debido principalmente a las diferencias entre el nivel de deformación (compresión) y el contenido de humedad de los granos.

En la Tabla 9 se muestra el análisis de varianza del efecto del grupo, variedad (V), contenido de humedad (H) y la interacción $V \times H$ sobre el módulo de elasticidad (E) de los granos de trigo de ambos grupos. Se observó que todos los factores tuvieron un efecto muy significativo ($P < 0.01$) sobre este parámetro, siendo el grupo el factor que más influyó.

En los grupos de trigo (Tabla 10 y Figura 29), se observa que en el grupo de trigo fuerte el promedio de E pasó de 19.44 MPa a 18.50 MPa, de humedad original a humedad de 15%, respectivamente. En el grupo de trigo suave el valor promedio de E a humedad original fue 15.04 MPa y descendió a 12.26 MPa al incrementarse el contenido de humedad a 15%. Este comportamiento indica claramente que la elasticidad del grano descendió al incrementarse el contenido de humedad.

En cuanto a las variedades, en las del grupo suave E osciló de 12.76 MPa (Cortazar) a 16.84 MPa (Urbina) a contenido de humedad original, mientras que a humedad de 15% los valores presentaron un rango amplio de 6.39 MPa a 21.33 MPa. La variedad suave Saturno presentó el descenso más considerable (54.9%) en el valor de E , al pasar de 14.18 a 6.39 MPa, debido al incremento del contenido de humedad de 10.1 a 15%. Dentro del grupo de trigo fuerte a humedad original, la variedad Nana tuvo el menor valor de E (15.55 MPa), mientras que la variedad Kronstad presentó el mayor (23.32 MPa). Entre variedades del grupo de trigo fuerte, los valores de E a 15% de humedad variaron de 8.32 a 27.03 MPa. El valor de E de la variedad Norteña decreció 51.5% (de 17.17 a 8.32 MPa) cuando su contenido de humedad se incrementó de 9.7 a 15%.

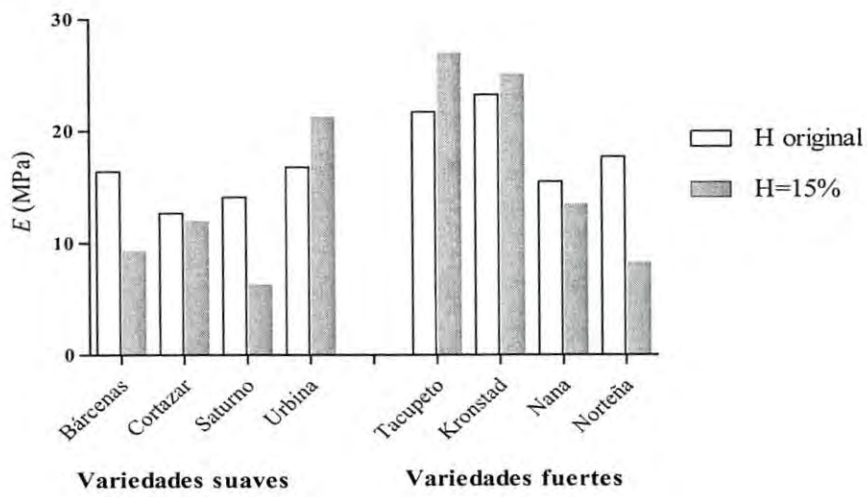


Figura 29. Efecto del contenido de humedad sobre el módulo de elasticidad (E) de granos de trigo a humedad original y de acondicionamiento a 15%.

La Figura 29 muestra cómo en la mayoría de las variedades, E decreció cuando el contenido de humedad se incrementó, efecto que coincidió con la hipótesis de Gorji et al. (2010) que sugería que la capacidad de absorción de energía de los granos acondicionados con respecto a los que tienen menor humedad, es más alta. Sin embargo, el valor de E para la variedad suave Urbina y las variedades fuertes Tacupeto y Kronstad presentó un comportamiento menos común, ya que sus respectivos valores de módulo de elasticidad se incrementaron ligeramente al aumentar su contenido de humedad.

En estudios previos (Shelef & Mohsenin, 1967; Bargale et al., 1995; Ponce-García et al., 2008; Figueroa et al., 2011b; Hernández et al., 2012b) sobre propiedades mecánicas de granos de trigo, se observaron valores más elevados para el módulo de elasticidad que los reportados en este estudio. Las diferencias pueden ser atribuibles al rango de deformación utilizado y al contenido de humedad de los granos. En este contexto, Morris et al. (2008) señalaron que el módulo de elasticidad refleja las diferencias entre las propiedades del material, por lo tanto, diferentes muestras de un mismo lote de granos pueden presentar distintos valores de módulo de elasticidad.

Correlaciones simples

Las relaciones entre las propiedades físicas y viscoelásticas de los granos de trigo se presentan en la Tabla 11. Se observan algunos coeficientes de correlación lineal significativos relacionando las propiedades físicas y viscoelásticas. En general, el peso de 1,000 granos, el largo y el grosor del grano mostraron correlaciones negativas fuertes con las propiedades viscoelásticas. La correlación más relevante fue entre el grosor y W_pG ($r = -0.841$, $P < 0.01$). En general, estas correlaciones muestran una influencia de las características físicas del grano sobre el comportamiento viscoelástico evaluado bajo pequeña deformación, adicionalmente a la influencia del grupo y variedad específica de trigo.

Tabla 11. Coeficientes de correlación simple (r) entre propiedades físicas y viscoelásticas de granos de trigo de diferentes grupos y variedades.

Propiedad viscoelástica	Propiedad física			
	P1000 ^a	Grosor	Ancho	Largo
W _t G	-0.794* ^c	-0.824*	ns ^b	-0.778*
W _e G	-0.783*	-0.784*	ns	-0.767*
W _p G	ns	-0.841** ^d	-0.716*	ns
E	-0.776*	ns	ns	-0.829*

^a W_tG, trabajo total de grano; W_eG, trabajo elástico de grano; W_pG, trabajo plástico de grano; E, módulo de elasticidad; P1000, peso de 1,000 granos.

^b ns, no significativo (P>0.05).

^c *Significativo (P<0.05).

^d **Significativo (P<0.01).

Evaluación de las Propiedades Viscoelásticas de Grano de Trigo y su Relación con Molienda, Masa y Pan

Molienda y extracción de harina

En la Tabla 12 se presenta el análisis de varianza del efecto de la variedad sobre la fuerza máxima de compresión ($F_{\text{máxG}}$) de los trigos del grupo suave y fuerte acondicionados a 16%. Se observa que la variedad tuvo un efecto muy significativo ($P < 0.01$) sobre $F_{\text{máxG}}$ en ambos grupos de trigo.

Los valores medios de $F_{\text{máxG}}$ y RH de las variedades de trigo acondicionado a 16% de cada grupo se presentan en la Tabla 13.

En cuanto al grupo, en el fuerte el promedio de $F_{\text{máxG}}$ fue 4.1 N, mientras que el grupo suave alcanzó un promedio menor (2.7 N) en este parámetro. Se presentaron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) entre variedades del mismo grupo. Dentro del grupo fuerte, los valores medios oscilaron entre 2.9 N (Norteña) y 4.7 N (Tacupeto). En el caso del grupo de trigo suave, la variedad Cortazar tuvo el valor medio más alto (3.6 N) y la variedad Saturno el más bajo (1.8 N).

En cuanto al rendimiento de harina (RH), el valor promedio correspondiente al grupo suave fue ligeramente menor (66.5%) que el del grupo fuerte (68.3%). Las variedades del grupo suave presentaron valores de 64.7% (Bárceñas) a 69.1% (Cortazar). Los valores medios de las variedades del grupo fuerte oscilaron entre 65.5% (Kronstad) y 70.8% (Tacupeto).

Los valores medios de RH obtenidos en esta investigación fueron similares a los reportados por El-Porai et al. (2013), quienes molieron granos acondicionados a 16% con 24 h de reposo, para evaluar el efecto de diferentes tiempos de acondicionamiento e intensidades de molienda sobre las características fisicoquímicas de las harinas producidas. Sin embargo, Véha (2007) y Kaur et al. (2013) reportaron valores ligeramente más altos de RH al moler granos con un contenido de humedad de 14%.

Tabla 12. Análisis de varianza, valor de F , del efecto de la variedad sobre la fuerza máxima de compresión en los grupos de trigo suave y fuerte.

FV ^a	GL	F	
		Grupo suave F _{máx} G	Grupo fuerte F _{máx} G
Variedad	3	31.8** ^b	13.5**
Error	76		
Total	79		

^a FV, fuente de variación; GL, grados de libertad; F_{máx}G, fuerza máxima de compresión de grano.

^b **Muy significativo (P<0.01).

Tabla 13. Valores medios de fuerza de compresión máxima y rendimiento de harina de granos acondicionados de variedades del grupo suave y fuerte.

Grupo suave	F _{máx} G ^a (N)	RH (%)	Grupo fuerte	F _{máx} G (N)	RH (%)
Bárcenas	2.0 ± 0.6b ^b	64.7	Kronstad	4.6 ± 1.2a	65.5
Cortazar	3.6 ± 0.7a	69.1	Nana	4.3 ± 0.9a	69.1
Saturno	1.8 ± 0.4b	66.9	Norteña	2.9 ± 0.7b	67.8
Urbina	3.4 ± 0.9a	65.3	Tacupeto	4.7 ± 1.0a	70.8
Promedio	2.7	66.5	Promedio	4.1	68.3

^a F_{máx}G, fuerza máxima de compresión de grano; RH, rendimiento de harina.

^b ±Desviación estándar. En una misma columna, valores con distinta letra son significativamente diferentes (P<0.05).

De acuerdo con Kaur et al. (2013), la dureza del grano antes del acondicionamiento se asocia con las propiedades de molienda del trigo. Las variedades con mayor índice de dureza presentan menor rendimiento de harina, hecho que consideran se puede atribuir a una baja proporción endospermo-salvado.

Características de la harina

Fisicoquímicas. En las Tablas 14 y 15 se presentan los análisis de varianza del efecto de la variedad de trigo (suave y fuerte, respectivamente) sobre las propiedades fisicoquímicas de la harina. Tanto en el grupo suave como en el grupo fuerte, la variedad tuvo un efecto muy significativo ($P < 0.01$) sobre cada uno de los parámetros fisicoquímicos de la harina: humedad, ceniza, proteína, gluten húmedo y volumen de sedimentación.

En la Tabla 16 se muestran los valores medios de las propiedades fisicoquímicas de harinas obtenidas de los grupos de trigo suave y fuerte.

El promedio de contenido de humedad de las harinas (CHH) del grupo suave (13.8%) resultó muy similar al del grupo fuerte (14.0%). Dentro de cada grupo se presentaron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) entre variedades. El CHH entre las variedades del grupo suave osciló entre 13.6% (Cortazar) a 14.1% (Saturno), mientras que entre las variedades del grupo fuerte los valores medios presentaron una variación ligeramente más amplia. La variedad Kronstad registró el menor valor (13.8%) y la variedad Nana (14.5%) el mayor. El CHH ideal es de 14.0%, por lo que los valores obtenidos en esta investigación pueden considerarse aceptables, debido a que todas las variedades alcanzaron un valor promedio muy cercano al óptimo.

El contenido de ceniza en harina (CCH) promedio del grupo suave fue 0.375% y el del grupo fuerte fue 0.400%. Dentro de cada grupo se presentaron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) entre variedades. Los valores medios de CCH entre las variedades del grupo suave variaron ligeramente, ya que tres de las cuatro variedades presentaron valores muy uniformes, siendo la variedad Urbina la que estadísticamente fue diferente, al presentar el valor más alto (0.426%) en este grupo. Las diferencias de CCH entre variedades del grupo fuerte fueron mayores, al registrarse valores entre 0.362% (Nana) y 0.470% (Kronstad).

Tabla 14. Análisis de varianza, valor de *F*, del efecto de la variedad de trigo del grupo suave sobre las propiedades fisicoquímicas de la harina.

FV ^a	GL	<i>F</i>				
		CHH	CCH	CPH	GH	VS
Variedad	3	73.3** ^b	525.6**	106.5**	28.5**	226.8**
Error	8					
Total	11					

^a FV, fuente de variación; GL, grados de libertad; CHH, contenido de humedad en harina; CCH, contenido de ceniza en harina; CPH, contenido de proteína en harina; GH, gluten húmedo; VS, volumen de sedimentación.

^b**Muy significativo ($P < 0.01$).

Tabla 15. Análisis de varianza, valor de *F*, del efecto de la variedad de trigo del grupo fuerte sobre las propiedades fisicoquímicas de la harina.

FV ^a	GL	<i>F</i>				
		CHH	CCH	CPH	GH	VS
Variedad	3	75.0** ^b	198.4**	103.3**	52.1**	262.0**
Error	8					
Total	11					

^a FV, fuente de variación; GL, grados de libertad; CHH, contenido de humedad en harina; CCH, contenido de ceniza en harina; CPH, contenido de proteína en harina; GH, gluten húmedo; VS, volumen de sedimentación.

^b**Muy significativo ($P < 0.01$).

Tabla 16. Valores medios de las propiedades fisicoquímicas de harinas obtenidas de variedades del grupo suave y fuerte.

Grupo/ Variedad	Humedad	Ceniza ^a	Proteína ^a	GH ^{a, b}	VS ^{a, b}
		(%)			(mL)
Suave					
Bárceñas	13.8 ±0.0b ^c	0.357 ±0.002b	9.0 ±0.0d	23.8 ±0.9b	24.5 ±0.5b
Cortazar	13.6 ±0.0d	0.358 ±0.000b	9.6 ±0.0c	27.5 ±0.7a	20.9 ±0.0d
Saturno	14.1 ±0.0a	0.358 ±0.002b	10.0 ±0.1b	27.9 ±0.7a	27.0 ±0.0a
Urbina	13.7 ±0.0c	0.426 ±0.003a	10.6 ±0.1a	28.6 ±0.0a	23.9 ±0.0c
Promedio	13.8	0.375	9.8	26.9	24.0
Fuerte					
Kronstad	13.8 ±0.0c	0.470 ±0.005a	11.1 ±0.0b	29.1 ±0.2b	32.2 ±0.5c
Nana	14.5 ±0.0a	0.362 ±0.005c	11.7 ±0.1a	31.8 ±0.6a	34.5 ±0.5b
Norteña	14.1 ±0.0b	0.368 ±0.007c	10.4 ±0.0c	27.1 ±0.5c	40.3 ±0.5a
Tacupeto	14.0 ±0.0b	0.401 ±0.005b	9.8 ±0.1d	26.4 ±0.7c	27.3 ±0.5d
Promedio	14.0	0.400	10.8	28.6	33.6

^a Valores en base seca (bs).

^b GH, gluten húmedo; VS, volumen de sedimentación.

^c ±Desviación estándar. Dentro de una columna para un mismo grupo de trigo, letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (P<0.05).

Los valores promedio de CCH de las harinas de esta investigación fueron menores a los reportados en otros estudios (Ponzio et al., 2008; Różyło & Laskowski, 2011) que tuvieron por objetivo relacionar la calidad fisicoquímica y reológica de las harinas con la producción de pan. Un contenido bajo de ceniza indica una alta calidad de las fracciones molidas. De acuerdo con Iuliana et al. (2010), el contenido de ceniza se incrementa cuando el RH también aumenta. Sin embargo, es importante considerar que prevalecen diferencias entre las condiciones de molienda de cada estudio, específicamente en lo que respecta al contenido de humedad, equipo, tiempo y temperatura de reposo durante el acondicionamiento, así como diferencias genotípicas entre las variedades de trigo evaluado.

El contenido promedio de proteína en harina (CPH) del grupo fuerte fue 10.8%, valor mayor en 1% al obtenido por el grupo suave (9.8%) (Tabla 16). Se presentaron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) entre las variedades correspondientes a cada grupo de trigo. En el grupo fuerte, la variedad Tacupeto tuvo el menor CPH (9.8%) y la variedad Nana presentó el más alto (11.7%). Dentro del grupo suave, los valores de CPH variaron entre 9.0% (Bárceñas) y 10.6% (Urbina). Por otro lado, se observó que dentro de cada grupo de trigo (suave o fuerte), las variedades que mostraron el valor máximo de proteína en grano, también lo tuvieron en harina.

En relación con los valores medios de CPH obtenidos en esta investigación, Colombo et al. (2008) y Zhao et al. (2010) reportaron valores similares en variedades de trigo suave. En harinas obtenidas a partir de trigo fuerte, Ponzio et al. (2008) observaron valores ligeramente menores; Ktenioudaki et al. (2010) y Zhao et al. (2010) valores similares, y Różyło & Laskowski (2011) resultados más altos.

Con respecto al contenido de gluten húmedo (GH), el promedio del grupo fuerte (28.6%) fue mayor que el del grupo suave (26.9%) (Tabla 16). Las variedades correspondientes a cada grupo presentaron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) entre sí en este parámetro. Entre las variedades del grupo fuerte el contenido de GH varió entre 26.4% (Tacupeto) y 31.8% (Nana). Las variedades del grupo suave mostraron valores promedio similares, excepto por la variedad Bárceñas, la cual presentó el menor valor (23.8%) del grupo.

Gaines et al. (2006) reportaron valores de GH similares a los de esta investigación en harinas de trigo suave estadounidense, sin embargo, Colombo et al. (2008) obtuvieron valores más altos en harinas de trigo suave argentino. Ambos estudios de referencia se centraron principalmente en la evaluación de la calidad de gluten. Por otro lado, en harinas de trigo fuerte Kihlberg et al. (2006) obtuvieron valores menores de GH a los reportados en esta investigación; Véha (2007) y Kaur et al. (2013) reportaron valores similares y Rózyło & Laskowski (2011) presentaron valores más elevados.

La diferencia entre los valores promedio de volumen de sedimentación (VS) de los dos grupos de trigo fue amplia (Tabla 16). El grupo fuerte tuvo un promedio de 33.6 mL, mientras que el promedio registrado en el grupo suave fue 24.0 mL. Se observó que este parámetro varió considerablemente entre las variedades correspondientes a cada grupo de trigo, presentándose diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$). Dentro del grupo de harinas fuertes, los valores de VS fueron entre 27.3 ml (Tacupeto) y 40.3 mL (Norteña). En el grupo suave, la variedad Cortazar presentó el menor valor de VS con 20.9 mL, mientras la variedad Saturno fue la que alcanzó el valor más alto con 27.0 mL.

Colombo et al. (2008) discutieron que el volumen de sedimentación es un parámetro indicativo de la calidad de la proteína presente en la harina, el cual está directa y proporcionalmente relacionado con la calidad de productos de panificación.

En un estudio que relacionó el VS con las propiedades elásticas del gluten, Zhao et al. (2010) reportaron valores promedio de VS menores a los de esta investigación en harinas de trigo suave estadounidense. Por otro lado, Magaña-Barajas et al. (2009) relacionaron las características fisicoquímicas de harina con las propiedades viscoelásticas de sus masas, reportando valores de VS ligeramente superiores a los de esta investigación en harinas de trigo suave de variedades mexicanas. En general, otros autores (Kihlberg et al., 2006; Rózyło & Laskowski, 2011; Kaur et al., 2013) obtuvieron valores más elevados de VS que los presentados en esta investigación en harinas de trigo fuerte.

Farinográficas. En la Tabla 17 se presenta el análisis de varianza (ANDEVA) del efecto de la variedad de trigo del grupo suave sobre las propiedades farinográficas de la harina. Se observó que la variedad tuvo un efecto muy significativo ($P < 0.01$) sobre todos los parámetros farinográficos evaluados, excepto en el tiempo de llegada (TLL). La mayor influencia de la variedad en el grupo suave fue sobre la absorción de agua (AA).

En la Tabla 18 se presenta el análisis de varianza del efecto de la variedad de trigo del grupo fuerte sobre las propiedades farinográficas de la harina. En este grupo, el efecto de la variedad fue muy significativo ($P < 0.01$) sobre todos los parámetros evaluados, siendo mayor sobre el parámetro estabilidad (EST).

Los valores medios de las características farinográficas: absorción de agua (AA), tiempo de llegada (TLL), tiempo máximo de desarrollo (DM), estabilidad (EST) e índice de tolerancia al mezclado (ITM), de harinas de variedades del grupo suave y fuerte se presentan en la Tabla 19.

El promedio de absorción de agua (AA) del grupo fuerte (58.9%) mostró una diferencia marcada en comparación con el promedio del grupo suave (52.6%). Dentro de cada grupo, las variedades presentaron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) en este parámetro. En el grupo fuerte las diferencias entre variedades fueron mayores, presentándose valores entre 54.8% (Tacupeto) y 61.5% (Norteña). Los valores de AA correspondientes a las variedades del grupo suave variaron entre 52.1% (Urbina) y 53.0% (Cortazar).

Los valores medios de AA obtenidos en esta investigación para ambos grupos de trigo fueron similares a los reportados por otros autores (Osella et al., 2009; Ktenioudaki et al., 2010; El-Porai et al., 2013). Sin embargo, otros estudios (Uhlen et al., 2004; Kaur et al., 2013) reportaron valores superiores en este parámetro, específicamente en comparación con harinas del grupo fuerte. De acuerdo con Gélinas & McKinnon (2013), uno de los principales beneficios del uso del farinógrafo además de conocer algunas propiedades reológicas de la harina, es determinar la absorción de agua, la cual se asocia principalmente con el contenido de proteína de la harina.

Tabla 17. Análisis de varianza, valor de F , del efecto de la variedad de trigo del grupo suave sobre las propiedades farinográficas de la harina.

FV ^a	GL	F				
		AA	TLL	DM	EST	ITM
Variedad	3	15.3** ^c	3.9 ns ^b	25.2**	22.7**	20.7**
Error	4					
Total	7					

^a FV, fuente de variación; GL, grados de libertad; AA, absorción de agua; TLL, tiempo de llegada; DM, tiempo de desarrollo máximo; EST, estabilidad; ITM, índice de tolerancia al mezclado.

^b ns, no significativo ($P > 0.05$).

^c **Muy significativo ($P < 0.01$).

Tabla 18. Análisis de varianza, valor de F , del efecto de la variedad de trigo del grupo fuerte sobre las propiedades farinográficas de la harina.

FV ^a	GL	F				
		AA	TLL	DM	EST	ITM
Variedad	3	2345.3** ^b	118.3**	508.7**	3404.4**	59.3**
Error	4					
Total	7					

^a FV, fuente de variación; GL, grados de libertad; AA, absorción de agua; TLL, tiempo de llegada; DM, tiempo de desarrollo máximo; EST, estabilidad; ITM, índice de tolerancia al mezclado.

^b **Muy significativo ($P < 0.01$).

Tabla 19. Valores medios de las características farinográficas de harinas de variedades del grupo suave y fuerte.

Grupo / Variedad	AA ^a (%)	TLL	DM (min)	EST	ITM (UB)
Suave					
Bárceñas	52.6 ±0.0b ^b	0.5 ±0.0a	1.0 ±0.0b	3.6 ±0.2a	100 ±0.0b
Cortazar	53.0 ±0.0a	0.9 ±0.1a	1.8 ±0.1a	1.9 ±0.1b	145 ±7.0a
Saturno	52.9 ±0.0a	0.3 ±0.0a	0.8 ±0.1b	3.4 ±0.1a	135 ±7.0a
Urbina	52.1 ±0.0c	0.7 ±0.3a	1.8 ±0.1a	3.0 ±0.3a	135 ±7.0a
Promedio	52.6	0.6	1.4	3.0	128.7
Fuerte					
Kronstad	60.5 ±0.1b	4.0 ±0.3a	7.3 ±0.1a	16.4 ±0.1a	30 ±0.0c
Nana	61.5 ±0.0a	2.3 ±0.0b	3.5 ±0.0c	2.9 ±0.1d	70 ±0.0b
Norteña	58.9 ±0.0c	1.8 ±0.0b	5.1 ±0.1b	7.0 ±0.0b	55 ±7.0b
Tacupeto	54.8 ±0.0d	0.8 ±0.0c	1.6 ±0.1d	4.6 ±0.2c	95 ±7.0a
Promedio	58.9	2.2	4.4	7.7	62.5

^a AA, absorción de agua; TLL, tiempo de llegada; DM, tiempo de desarrollo máximo; EST, estabilidad; ITM, índice de tolerancia al mezclado; UB, unidades Brabender.

^b ±Desviación estándar. Dentro de una columna para un mismo grupo de trigo, letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (P<0.05).

El valor promedio del tiempo de llegada (TLL) del grupo suave fue de 0.6 min y el del grupo fuerte 2.2 min (Tabla 19). Entre las variedades del grupo suave los valores oscilaron entre 0.3 min y 0.9 min, no presentándose diferencias estadísticas significativas ($P>0.05$) entre las variedades de este grupo. El rango de valores entre las variedades del grupo fuerte fue amplio (0.8 min a 4.0 min), por lo que se presentaron diferencias estadísticas significativas ($P<0.05$) entre las variedades de este grupo.

El tiempo de desarrollo máximo (DM) tuvo en promedio de 4.4 min en el grupo fuerte y de 1.4 min en el grupo suave (Tabla 19). Dentro de cada grupo se presentaron diferencias estadísticas significativas ($P<0.05$) entre variedades. En el grupo fuerte la diferencia entre variedades fue amplia, presentándose valores que oscilaron entre 1.6 min (Tacupeto) y 7.3 min (Kronstad). El rango de valores correspondiente a las variedades del grupo suave fue entre 0.8 min (Cortazar y Saturno) y 1.8 min (Cortazar).

Magaña-Barajas et al. (2009) reportaron valores ligeramente superiores para este parámetro en harinas obtenidas a partir de variedades de trigo suave mexicanas. Con excepción de la variedad fuerte Tacupeto, el resto de las variedades de harinas fuertes presentaron valores de tiempo de desarrollo máximo similares a los reportados por Ktenioudaki et al. (2010) y Kaur et al. (2013) y ligeramente superiores a los obtenidos por Kihlberg et al. (2006) y El-Porai et al. (2013).

La estabilidad (EST) promedio del grupo fuerte (7.7 min) fue considerablemente mayor al promedio del grupo suave (3.0 min) (Tabla 19). Dentro de cada grupo se presentaron diferencias estadísticas significativas ($P<0.05$) entre variedades. Las variedades del grupo fuerte mostraron un rango de valores amplio que fue de 2.9 min (Nana) a 16.4 min (Kronstad). En el grupo suave, las variedades tuvieron valores muy similares de EST, los cuales oscilaron entre 3.0 min y 3.6 min, excepto por la variedad Cortazar que presentó el menor valor (1.9 min).

En variedades mexicanas de trigo suaves, Magaña-Barajas et al. (2009) reportaron valores de EST ligeramente superiores a los de esta investigación. En general, otros estudios (Osella et al., 2009; Ktenioudaki et al., 2010; El-Porai et al., 2013) determinaron promedios similares de

EST a los de este trabajo, aunque Kihlberg et al. (2006) obtuvieron valores promedio levemente menores.

Viscoamilográficas. En la Tabla 20 se presenta el análisis de varianza del efecto de la variedad por grupo (suave o fuerte) sobre la viscosidad máxima (VM) de la harina. Se observó que tanto en las harinas suaves como en las fuertes, la variedad tuvo un efecto muy significativo ($P < 0.01$) sobre la VM, siendo más evidente sobre el grupo fuerte.

En la Tabla 21 se presentan los valores medios de viscosidad máxima (VM) de harina de variedades del grupo suave y fuerte.

La VM promedio del grupo fuerte fue 3064 cP, mientras que la del grupo suave fue 2871 cP. Dentro de cada grupo se presentaron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) entre variedades. En las variedades del grupo fuerte, la VM varió entre 2629 cP (Nana) y 3615 cP (Norteña). En la Figura 30 se presentan las curvas viscoamilográficas de las variedades del grupo fuerte, a partir de las cuales se observó la similitud de comportamiento entre las variedades Nana y Tacupeto, así como entre las variedades Norteña y Kronstad.

Por otro lado, los valores de VM entre las variedades del grupo suave variaron de 2378 cP (Saturno) a 3679 cP (Urbina). En la Figura 31 se presentan los viscoamilogramas correspondiente a las variedades de este grupo. Se observa que las variedades Bárcenas y Cortazar se comportaron de manera muy similar, mientras que la curva correspondiente a la variedad Urbina sobresale del resto por su elevado valor de VM.

Las harinas obtenidas a partir de variedades de trigo fuerte comúnmente presentan valores de VM más elevados que las de trigo suave. Esta diferencia se atribuye entre otros factores al efecto de la molienda, ya que en general, el almidón de los trigos fuertes no se degrada tanto durante su extracción como el almidón de los trigos suaves. De acuerdo a la composición y morfología del endospermo de estos últimos, pudieran existir mayor cantidad de espacios aéreos y menor cantidad de proteína rodeando a los gránulos de almidón, incrementando la susceptibilidad al daño.

Tabla 20. Análisis de varianza, valor de F , del efecto de las variedades de trigo del grupo suave y fuerte sobre la viscosidad máxima de la harina.

FV ^a	GL	F	
		Grupo suave VM	Grupo fuerte VM
Variedad	3	245.8** ^b	586.4**
Error	4		
Total	7		

^a FV, fuente de variación; GL, grados de libertad; VM, viscosidad máxima.

^b **Muy significativo ($P < 0.01$).

Tabla 21. Valores medios de viscosidad máxima de harina de variedades del grupo suave y fuerte.

Grupo suave	VM ^a (cP)	Grupo fuerte	VM (cP)
Bárceñas	2737 ±40 ^b	Kronstad	3366 ±1b
Cortazar	2689 ±64b	Nana	2629 ±7c
Saturno	2378 ±50c	Norteña	3615 ±13a
Urbina	3679 ±44a	Tacupeto	2648 ±56c
Promedio	2871	Promedio	3064

^a VM, viscosidad máxima. Valores expresados en base seca (bs).

^b ±Desviación estándar. En una misma columna, valores con distinta letra son significativamente diferentes ($P < 0.05$).

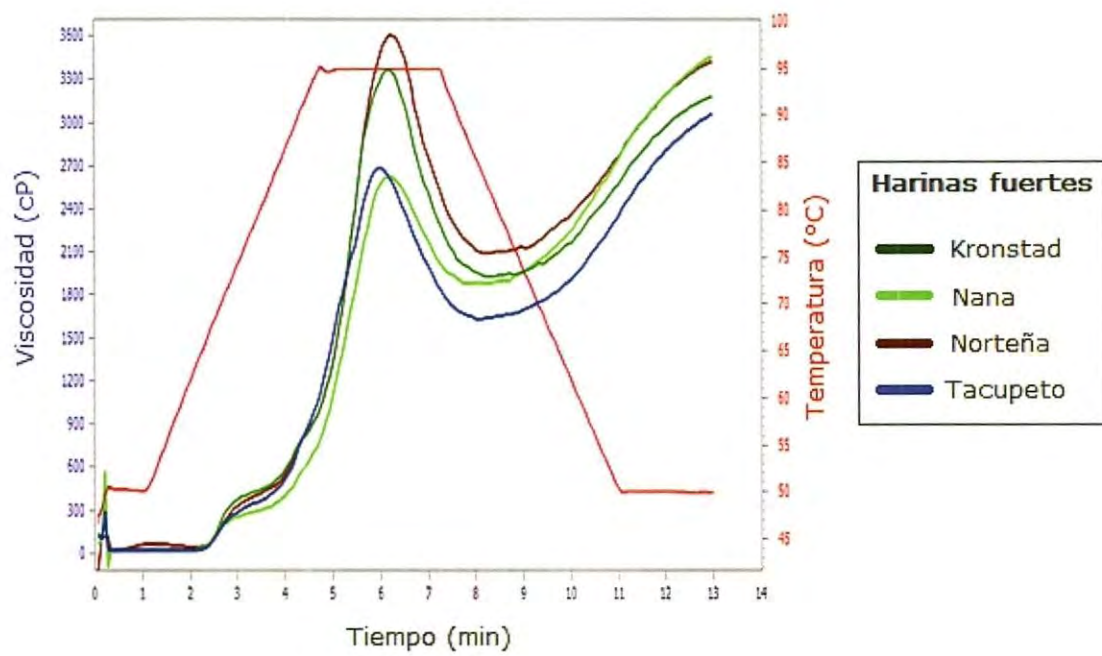


Figura 30. Curvas viscoamilográficas de harinas fuertes.

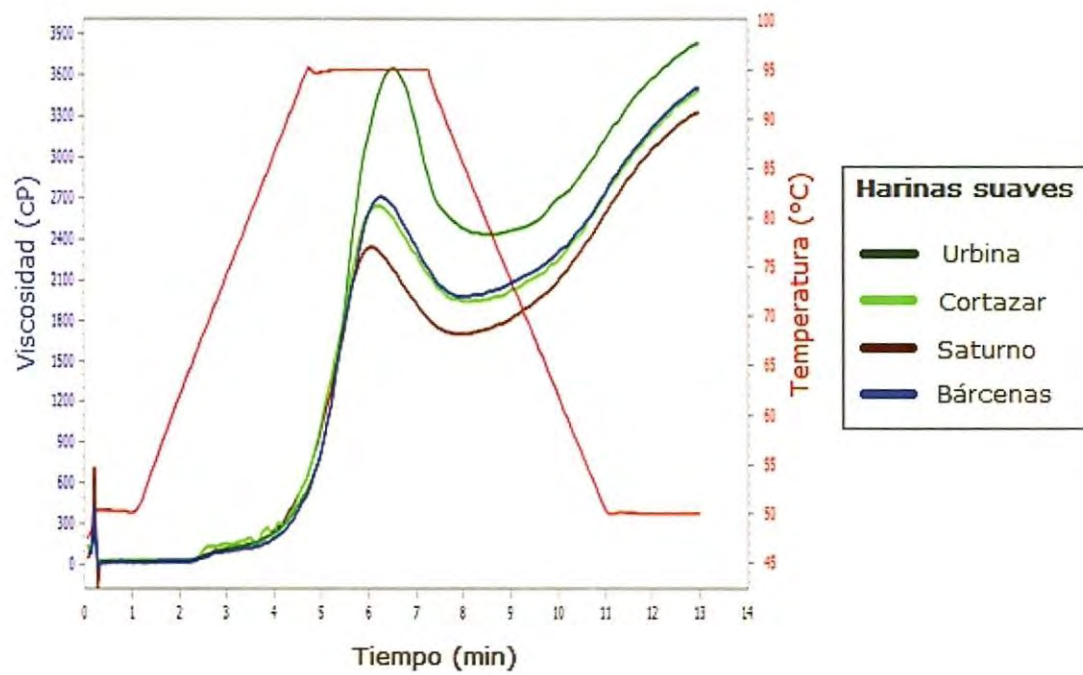


Figura 31. Curvas viscoamilográficas de harinas suaves.

Rakszegi et al. (2010) reportaron que durante la molienda algunos gránulos de almidón son mecánicamente dañados. Esto genera daños en las propiedades elásticas del almidón ocasionadas por fisuras o fracturas y por ruptura del gránulo. La dureza de los granos también afecta el contenido de almidón dañado y en consecuencia la VM, siendo posible modificar este efecto parcialmente si se utilizan humedades y tiempos de acondicionamiento óptimos.

Ocasionalmente valores de VM relativamente bajos (próximos a 2000 cP) llegan a ser deseables porque promueven la hidratación y la actividad fermentativa durante el proceso de panificación. Sin embargo, valores demasiados bajos de VM (altos de almidón dañado) causan masas flojas, debido a que los gránulos hinchados liberan agua cuando la amilosa participa, llegando a ocasionar en el pan una textura pegajosa de la miga.

Características viscoelásticas del grano acondicionado

En las Tablas 22 y 23 se presentan los análisis de varianza del efecto de la variedad de trigo acondicionado (suave y fuerte, respectivamente) sobre las propiedades viscoelásticas del grano. En ambos grupo, la variedad tuvo un efecto muy significativo ($P < 0.01$) sobre las propiedades evaluadas, excepto en el trabajo plástico del grano (W_pG) del grupo fuerte. El grado de elasticidad del grano (GEG) fue la característica sobre la cual la variedad mostró el mayor efecto en ambos grupos.

Los valores medios de las propiedades viscoelásticas trabajo total (W_tG), trabajo elástico (W_eG) y trabajo plástico (W_pG) de granos de trigo acondicionados del grupo suave y fuerte se presentan en la Tabla 24.

El trabajo total de los granos (W_tG) de las variedades del grupo fuerte tuvo un promedio de 0.123 N·mm, valor superior al del grupo suave (0.082 N·mm). Dentro de cada grupo se presentaron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) entre variedades. Las variedades del grupo fuerte registraron valores muy similares de W_tG entre sí, excepto por la variedad Norteña, la cual obtuvo el menor valor (0.088 N·mm). En el grupo suave las variedades presentaron valores similares entre parejas, Bárcenas con Saturno y Cortazar con Urbina. Los valores de W_tG variaron de 0.051 N·mm a 0.106 N·mm.

Tabla 22. Análisis de varianza, valor de F , del efecto de la variedad de trigo suave acondicionado sobre las propiedades viscoelásticas del grano.

FV ^a	GL	F			
		W _t G	W _e G	W _p G	GEG
Variedad	3	21.4** ^b	26.9**	15.9**	39.2**
Error	76				
Total	79				

^a FV; fuente de variación; GL, grados de libertad; W_tG, trabajo total de grano; W_eG, trabajo elástico de grano; W_pG, trabajo plástico de grano; GEG, grado de elasticidad del grano.

^b **Muy significativo (P<0.01).

Tabla 23. Análisis de varianza, valor de F , del efecto de la variedad de trigo fuerte acondicionado sobre las propiedades viscoelásticas del grano.

FV ^a	GL	F			
		W _t G	W _e G	W _p G	GEG
Variedad	3	5.8** ^c	11.4**	1.3ns ^b	48.9**
Error	76				
Total	79				

^a FV; fuente de variación; GL, grados de libertad; F_{máx}G, fuerza máxima de grano; W_tG, trabajo total de grano; W_eG, trabajo elástico de grano; W_pG, trabajo plástico de grano; GEG, grado de elasticidad del grano.

^b ns, no significativo (P>0.05).

^c **Muy significativo (P<0.01).

Tabla 24. Valores medios de las propiedades viscoelásticas de granos de trigo acondicionados del grupo suave y fuerte.

Grupo / Variedad	W_tG^a	W_eG (N·mm)	W_pG	GEG (%)
Suave				
Bárceñas	0.064 ±0.017b ^b	0.024 ±0.007b	0.040 ±0.011b	37.0 ±4.2c
Cortazar	0.106 ±0.025a	0.050 ±0.014a	0.056 ±0.012a	46.9 ±4.0a
Saturno	0.051 ±0.011b	0.022 ±0.005b	0.029 ±0.006b	42.8 ±3.3b
Urbina	0.105 ±0.043a	0.051 ±0.022a	0.054 ±0.021a	48.8 ±3.1a
Promedio	0.082	0.037	0.045	43.9
Fuerte				
Kronstad	0.138 ±0.052a	0.076 ±0.031a	0.062 ±0.021a	54.6 ±3.0a
Nana	0.126 ±0.041a	0.064 ±0.022a	0.062 ±0.020a	50.9 ±4.5b
Norteña	0.088 ±0.021b	0.036 ±0.010b	0.052 ±0.011a	41.2 ±4.0c
Tacupeto	0.138 ±0.052a	0.075 ±0.027a	0.063 ±0.026a	54.4 ±4.2a
Promedio	0.123	0.063	0.059	50.3

^a W_tG , trabajo total de grano; W_eG , trabajo elástico de grano; W_pG , trabajo plástico de grano; GEG, grado de elasticidad de grano.

^b ±Desviación estándar. Dentro de una columna para un mismo grupo de trigo, letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$).

De acuerdo con Gorji et al. (2010), la capacidad de absorción de energía de los granos acondicionados es más alta comparada con granos sin acondicionar o con bajo contenido de humedad. De manera general, un valor más alto de W_tG indicó mayor fuerza ($F_{\max}G$) del grano acondicionado al momento de la compresión.

El valor promedio de trabajo elástico de grano (W_eG) del grupo fuerte fue 0.063 N·mm, mientras que el del grupo suave fue 0.037 N·mm (Tabla 24). Dentro de cada grupo se presentaron diferencias estadísticas significativas ($P<0.05$) entre variedades. En el grupo fuerte, sólo la variedad Norteña no se comportó de forma similar al resto de las variedades. Los valores de W_eG obtenidos en este grupo fueron entre 0.036 N·mm (Norteña) y 0.076 N·mm (Kronstad). Los valores de W_eG entre las variedades del grupo suave oscilaron entre 0.022 N·mm (Saturno) y 0.051 N·mm (Urbina).

Maucher et al. (2009) discutieron que mayores valores de W_e , pueden estar asociados a mayor dureza del endospermo del grano. Esto coincide con la tendencia general del comportamiento de la $F_{\max}G$ y W_eG de esta investigación, al presentar el grupo de trigo fuerte mayores promedios en ambos parámetros.

El promedio de trabajo plástico (W_pG) del grupo fuerte (0.059 N·mm) fue mayor que el correspondiente al grupo suave (0.045 N·mm) (Tabla 24). En el caso del grupo fuerte, las variedades no presentaron diferencias estadísticas significativas ($P>0.05$) en este parámetro. Los valores de W_pG en este grupo oscilaron entre 0.052 N·mm (Norteña) y 0.063 N·mm (Tacupeto). Dentro del grupo suave se presentaron diferencias estadísticas significativas ($P<0.05$) entre variedades. La variedad Saturno mostró el menor valor de W_pG (0.029 N·mm), mientras que la variedad Cortazar obtuvo el mayor valor (0.056 N·mm).

En general y como se ha citado anteriormente, el incremento de humedad en el grano causa plastificación y en consecuencia cambios en las propiedades viscoelásticas del grano (Bargale et al., 1995), principalmente un incremento proporcional del W_pG en comparación con el W_eG .

El comportamiento viscoelástico de los granos acondicionados del grupo suave fue W_eG (0.045 N·mm) < W_pG (0.037 N·mm). Sin embargo, esta relación en el grupo fuerte fue inversa: W_eG (0.063 N·mm) > W_pG (0.059 N·mm), a pesar de que la diferencia entre ambos parámetros fue mínima (Tabla 24).

El grupo suave registró un grado de elasticidad (GEG) promedio de 43.9%, mientras el del grupo fuerte fue 50.3%. En el grupo suave las variedades presentaron valores de GEG en un rango entre 37.0% (Bárceñas) y 48.8% (Urbina). En el grupo fuerte los valores registrados oscilaron entre 41.2% (Norteña) y 54.6% (Kronstad). Dentro de cada grupo se presentaron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) entre variedades.

Figuroa et al. (2011a) reportaron GEG de 41.8% en granos de trigo suave acondicionados a 16.4%, así como GEG de 53.5% en granos de trigo fuerte acondicionados a 16.3%. Ambos valores similares a los reportados en esta investigación.

Características viscoelásticas de la masa

Compresión uniaxial bajo pequeña deformación. En cuanto a la reproducibilidad del método de compresión uniaxial bajo pequeña deformación, cada uno de los parámetros viscoelásticos evaluados en la masa: trabajo total (W_tM), trabajo elástico (W_eM) y trabajo plástico (W_pM) mostraron un coeficiente de variación (CV) de $\approx 25\%$. De acuerdo con estos valores, se concluyó que el método tuvo una buena reproducibilidad para evaluar las propiedades viscoelásticas de la masa.

En las Tablas 25 y 26 se presentan los análisis de varianza del efecto de la variedad de trigo (suave y fuerte, respectivamente) sobre las propiedades viscoelásticas de masa evaluada por compresión uniaxial a pequeña deformación. En la Tabla 25 se observó que la variedad tuvo un efecto significativo ($P < 0.05$) idéntico sobre los parámetros viscoelásticos: W_tM , W_eM y W_pM de la masa. Sin embargo, la variedad no mostró efecto significativo ($P > 0.05$) sobre la fuerza máxima de compresión ($F_{m\acute{a}x}M$) y el grado de elasticidad (GEM) de la masa. En la Tabla 26 se observó que el efecto de la variedad de trigo fuerte fue significativo ($P < 0.05$) sobre $F_{m\acute{a}x}M$, W_eM y GEM.

Tabla 25. Análisis de varianza, valor de F , del efecto de la variedad de trigo suave sobre las propiedades viscoelásticas de masa evaluada por compresión uniaxial a pequeña deformación.

FV ^a	GL	F				
		F _{máx} M	W _t M	W _e M	W _p M	GEM
Variedad	3	1.6ns ^b	3.2* ^c	3.2*	3.2*	1.1ns
Error	16					
Total	19					

^aFV, fuente de variación; GL, grados de libertad; F_{máx}M, fuerza máxima de compresión en masa; W_tM, trabajo total de masa; W_eM, trabajo elástico de masa; W_pM, trabajo plástico de masa; GEM, grado de elasticidad de masa.

^bns, no significativo ($P > 0.05$).

^c*Significativo ($P < 0.05$).

Tabla 26. Análisis de varianza, valor de F , del efecto de la variedad de trigo fuerte sobre las propiedades viscoelásticas de masa evaluada por compresión uniaxial a pequeña deformación.

FV ^a	GL	F				
		F _{máx} M	W _t M	W _e M	W _p M	GEM
Variedad	3	4.1* ^c	2.7ns ^b	4.3*	2.0ns	4.1*
Error	16					
Total	19					

^aFV, fuente de variación; GL, grados de libertad; F_{máx}M, fuerza máxima de compresión en masa; W_tM, trabajo total de masa; W_eM, trabajo elástico de masa; W_pM, trabajo plástico de masa; GEM, grado de elasticidad de masa.

^bns, no significativo ($P > 0.05$).

^c*Significativo ($P < 0.05$).

En la Tabla 27 se presentan los valores medios de las propiedades viscoelásticas: trabajo total (W_tM), trabajo elástico (W_eM), trabajo plástico (W_pM), así como la fuerza máxima de compresión ($F_{m\acute{a}x}M$) y el grado de elasticidad (GEM) de masas de variedades del grupo suave y fuerte obtenidos por compresión uniaxial bajo pequeña deformación.

En cuanto al grupo, el promedio de $F_{m\acute{a}x}M$ del grupo suave (0.459 N) resultó ser ligeramente superior que el del grupo fuerte (0.407 N). En el grupo de trigo suave todas las variedades se comportaron de manera similar, no presentándose diferencias estadísticas significativas ($P>0.05$) entre ellas. Los valores de $F_{m\acute{a}x}M$ en este grupo fueron de 0.391 N (Saturno) a 0.500 N (Cortazar). En el grupo fuerte se presentaron diferencias estadísticas significativas ($P<0.05$) para este parámetro entre variedades. La variedad Nana tuvo el menor valor de $F_{m\acute{a}x}M$ (0.316 N), mientras que la variedad Tacupeto presentó el mayor valor (0.477 N).

El valor promedio de trabajo total de masa (W_tM) de ambos grupos fue muy similar, al registrarse valores de 0.015 N·mm y 0.013 N·mm para el grupo suave y fuerte, respectivamente. Dentro de cada grupo se presentaron diferencias estadísticas significativas ($P<0.05$) entre variedades. Con respecto a las variedades del grupo suave, Cortazar y Urbina tuvieron valores similares, aunque ésta última alcanzó el mayor valor del grupo (0.017 N·mm), mientras que la variedad Saturno presentó el valor más bajo (0.011 N·mm). En el grupo fuerte la fluctuación de valores entre variedades fue menor. La variedad Nana tuvo el menor valor de W_tM (0.010 N·mm), mientras que las variedades Norteña y Tacupeto mostraron el valor más alto (0.014 N·mm).

En cuanto al trabajo elástico de la masa (W_eM), tanto el grupo suave como el grupo fuerte alcanzaron el mismo valor promedio (0.003 N·mm). Dentro de cada grupo se presentaron diferencias estadísticas significativas ($P<0.05$) entre variedades. En el grupo suave, la variedad Saturno presentó el menor valor, mientras que la variedad Cortazar obtuvo el mayor (0.004 N·mm). En el grupo fuerte, las variedades Norteña y Tacupeto tuvieron el valor más alto de W_eM (0.004 N·mm) y la variedad Nana presentó el menor (0.002 N·mm). En general, el comportamiento de W_eM fue muy similar entre grupos y variedades.

Tabla 27. Valores medios de las propiedades viscoelásticas de masas de variedades del grupo suave y fuerte obtenidos por compresión uniaxial bajo pequeña deformación.

Grupo / Variedad	$F_{\max}M^a$ (N)	W_tM	W_eM (N·mm)	W_pM	GEM (%)
Suave					
Bárceñas	0.465 ±0.029a ^b	0.014 ±0.001ab	0.003 ±0.000ab	0.010 ±0.000ab	24.1 ±1.7a
Cortazar	0.500 ±0.100a	0.017 ±0.005a	0.004 ±0.001a	0.013 ±0.003a	24.2 ±1.0a
Saturno	0.391 ±0.108a	0.011 ±0.003b	0.002 ±0.001b	0.008 ±0.002b	22.4 ±2.8a
Urbina	0.479 ±0.064a	0.017 ±0.002a	0.004 ±0.000a	0.013 ±0.001a	24.3 ±1.3a
Promedio	0.459	0.015	0.003	0.011	23.7
Fuerte					
Kronstad	0.397 ±0.098ab	0.012 ±0.002ab	0.003 ±0.001a	0.009 ±0.001a	28.2 ±4.2a
Nana	0.316 ±0.034b	0.010 ±0.002b	0.002 ±0.000b	0.007 ±0.002a	23.2 ±2.3b
Norteña	0.437 ±0.067a	0.014 ±0.002a	0.004 ±0.000a	0.010 ±0.001a	29.0 ±2.3a
Tacupeto	0.477 ±0.087a	0.014 ±0.004a	0.004 ±0.001a	0.010 ±0.003a	27.4 ±1.6a
Promedio	0.407	0.013	0.003	0.009	27.2

^a $F_{\max}M$, Fuerza máxima de compresión en masa; W_tM , trabajo total en masa; W_eM , trabajo elástico en masa; W_pM , trabajo plástico en masa; GEM, grado de elasticidad de masa.

^b ±Desviación estándar. Dentro de una columna para un mismo grupo de trigo, letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$).

El promedio del trabajo plástico de la masa (W_pM) del grupo suave (0.011 N·mm) fue superior al del grupo fuerte (0.009 N·mm). En el grupo suave se presentaron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) entre las variedades. Los valores de W_pM entre las variedades de este grupo oscilaron entre 0.008 N·mm (Saturno) y 0.013 N·mm (Cortazar y Urbina). Por su parte, en el grupo fuerte no se presentaron diferencias estadísticas significativas ($P > 0.05$) entre variedades. Las variedades del grupo fuerte presentaron valores entre 0.007 N·mm (Nana) y 0.010 N·mm (Norteña y Tacupeto).

El promedio de grado de elasticidad de la masa (GEM) del grupo fuerte (27.2%) fue mayor que el del grupo suave (23.7%) (Tabla 27). Las variedades del grupo fuerte mostraron un comportamiento uniforme (27.4% a 29.0%), excepto la variedad Nana, la cual presentó el menor valor (23.2%), siendo estadísticamente diferente al resto del grupo. Las variedades del grupo suave no presentaron diferencias estadísticas significativas entre sí ($P > 0.5$), registrando valores muy parejos que variaron mínimamente entre 22.4% y 24.3%.

En general, se observó que las masas de las variedades del grupo suave alcanzaron valores más altos en los parámetros viscoelásticos evaluados, excepto en el GEM. El valor promedio más alto de W_pM de las masas del grupo suave, indicó que éstas fueron más viscosas que las del grupo fuerte.

En la Figura 32 se muestran las curvas fuerza-distancia promedio correspondientes a los comportamientos viscoelásticos de granos de trigo del grupo suave y fuerte acondicionados a 16% y sus respectivas masas. Se observó cómo la proporción de trabajo elástico (W_e) correspondiente a cada grupo de trigo disminuyó de grano a masa.

Método dinámico oscilatorio. En la Tabla 28 se presenta el análisis de varianza del efecto de las variedades de trigo del grupo suave y fuerte sobre las propiedades viscoelásticas de la masa evaluada por método dinámico oscilatorio. Se observó que en los tres parámetros evaluados: módulo elástico (G'), módulo viscoso (G'') y ángulo de fase ($\tan \delta$) del grupo suave, la variedad no tuvo efecto significativo ($P > 0.05$). En el grupo fuerte, la variedad presentó un efecto significativo ($P < 0.05$) sobre G' y $\tan \delta$, pero no mostró efecto sobre G'' .

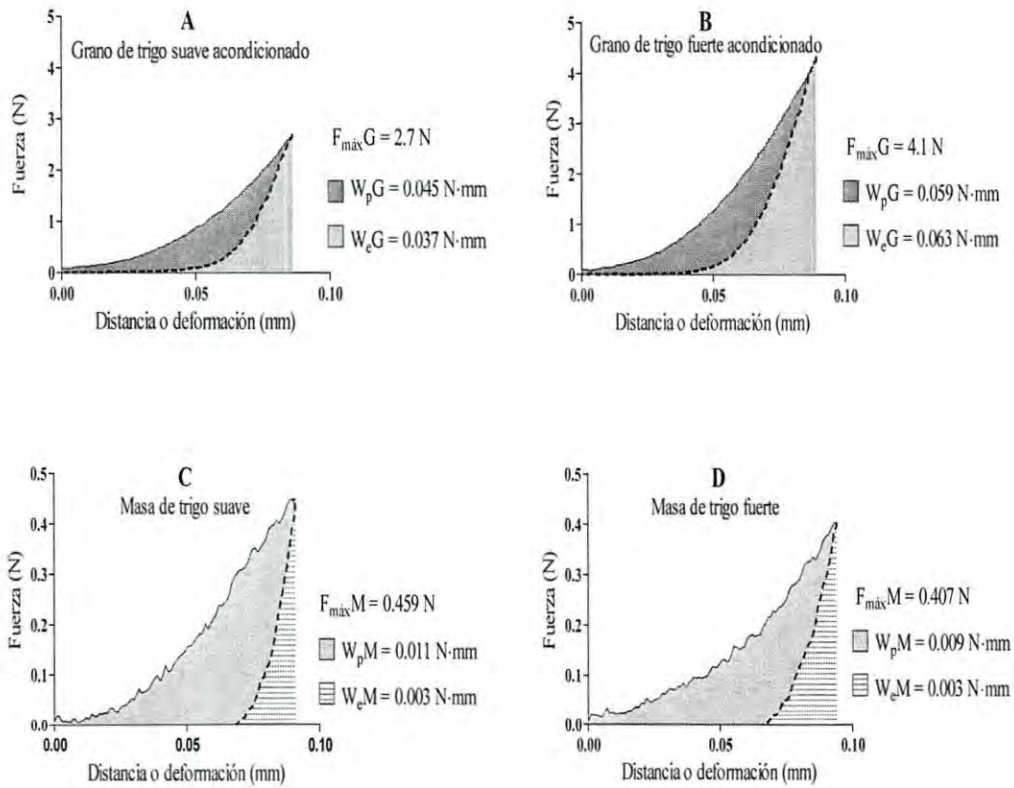


Figura 32. Curvas fuerza-distancia promedio del comportamiento viscoelástico en granos de trigo del grupo suave y fuerte acondicionados a 16% (A-B); y sus respectivas masas (C-D).

Tabla 28. Análisis de varianza, valor de F , del efecto de las variedades de trigo del grupo suave y fuerte sobre las propiedades viscoelásticas de la masa evaluada por método dinámico oscilatorio.

FV ^a	GL	F					
		Grupo suave			Grupo fuerte		
		G' ^b	G'' ^b	Tan δ	G'	G''	Tan δ
Variedad	3	4.7ns ^c	3.1ns	3.3ns	7.8* ^d	4.3ns	9.2*
Error	4						
Total	7						

^a FV, fuente de variación; GL, grados de libertad; G' , módulo elástico; G'' , módulo viscoso;

Tan δ , tangente del ángulo de fase.

^b Valores a frecuencia de 5 rad/s (región lineal).

^c ns, no significativo ($P > 0.05$).

^d *Significativo ($P < 0.05$).

En la Tabla 29 se presentan los valores medios de las propiedades viscoelásticas módulo elástico (G'), módulo viscoso (G'') y ángulo de fase ($\text{Tan } \delta$) de masas de variedades del grupo suave y fuerte obtenidos por método dinámico oscilatorio, a una frecuencia de 5 rad/s.

Los valores promedio a 5 rad/s del ángulo de fase ($\text{Tan } \delta$) fueron 0.61 y 0.56 para el grupo fuerte y suave, respectivamente. Dentro del grupo fuerte se presentaron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) entre variedades. Los valores de $\text{Tan } \delta$ entre las variedades del grupo fuerte oscilaron entre 0.59 (Norteña) y 0.64 (Nana). Dentro del grupo suave no se presentaron diferencias estadísticas significativas ($P > 0.05$) entre variedades. Los valores de $\text{Tan } \delta$ entre las variedades de este grupo se presentaron en un rango estrecho, entre 0.55 y 0.58. De acuerdo con los resultados, en las masas de las variedades de ambos grupos de trigo dominó la contribución viscosa sobre la elástica ($\text{Tan } \delta > 0.5$), manifestándose esta tendencia de manera más evidente en las variedades del grupo fuerte.

En la Figura 33 se presentan las curvas y tendencia de comportamiento del ángulo de fase ($\text{Tan } \delta$) de las masas de variedades del grupo suave y fuerte. Los valores ligeramente altos de $\text{Tan } \delta$ obtenidos en esta investigación, pudieran atribuirse de manera parcial a la forma en cómo se prepararon las masas para su evaluación viscoelástica (utilizando la mezcladora del farinógrafo hasta alcanzar su tiempo de desarrollo máximo). El amasado en este tipo de mezcladoras suele ser más intenso y pronunciado que en otros equipos empleado para el mismo fin.

De acuerdo con Khatkar & Schoefield (2002) el dominio de la contribución viscosa puede ser un indicativo de que en pruebas de barrido de frecuencia a muy baja amplitud, el componente almidón puede presentar una influencia dominante y enmascarar el efecto de la fase proteína.

A frecuencia de 5 rad/s, el promedio del módulo elástico (G') del grupo suave (62885 Pa) fue mayor que el del grupo fuerte (42659 Pa). Las variedades del grupo suave no presentaron diferencias estadísticas significativas ($P > 0.05$) y sus valores oscilaron entre 57606 Pa (Saturno) y 67432 Pa (Urbina). Por otro lado, las variedades del grupo fuerte presentaron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$). En este grupo, la variedad Nana tuvo el valor mínimo (34521 Pa), mientras que el valor más alto fue para la variedad Kronstad (47206 Pa).

Tabla 29. Valores medios de las propiedades viscoelásticas de masas de variedades del grupo suave y fuerte obtenidos por método dinámico oscilatorio.

Grupo / Variedad	G' ^{a,b}	G'' ^b	Tan δ
	(Pa)		
Suave			
Bárceñas	67172 ±1115a ^c	39652 ±2275a	0.58 ±0.021a
Cortazar	59330 ±2185a	33469 ±1121a	0.56 ±0.000a
Saturno	57606 ±3075a	29765 ±5578a	0.55 ±0.014a
Urbina	67432 ±5442a	37260 ±3131a	0.55 ±0.000a
Promedio	62885	35036	0.56
Fuerte			
Kronstad	47206 ±1233a	29796 ±1457a	0.63 ±0.014ab
Nana	34521 ±4450b	22336 ±3066a	0.64 ±0.007a
Norteña	45707 ±3107ab	27480 ±2093a	0.59 ±0.007b
Tacupeto	43204 ±1350ab	26243 ±1442a	0.60 ±0.014ab
Promedio	42659	26464	0.61

^a G' , módulo elástico; G'' , módulo viscoso; Tan δ , tangente del ángulo de fase.

^b Valores a frecuencia de 5 rad/s (región lineal).

^c ±Desviación estándar. Dentro de una columna para un mismo grupo de trigo, letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (P<0.05).

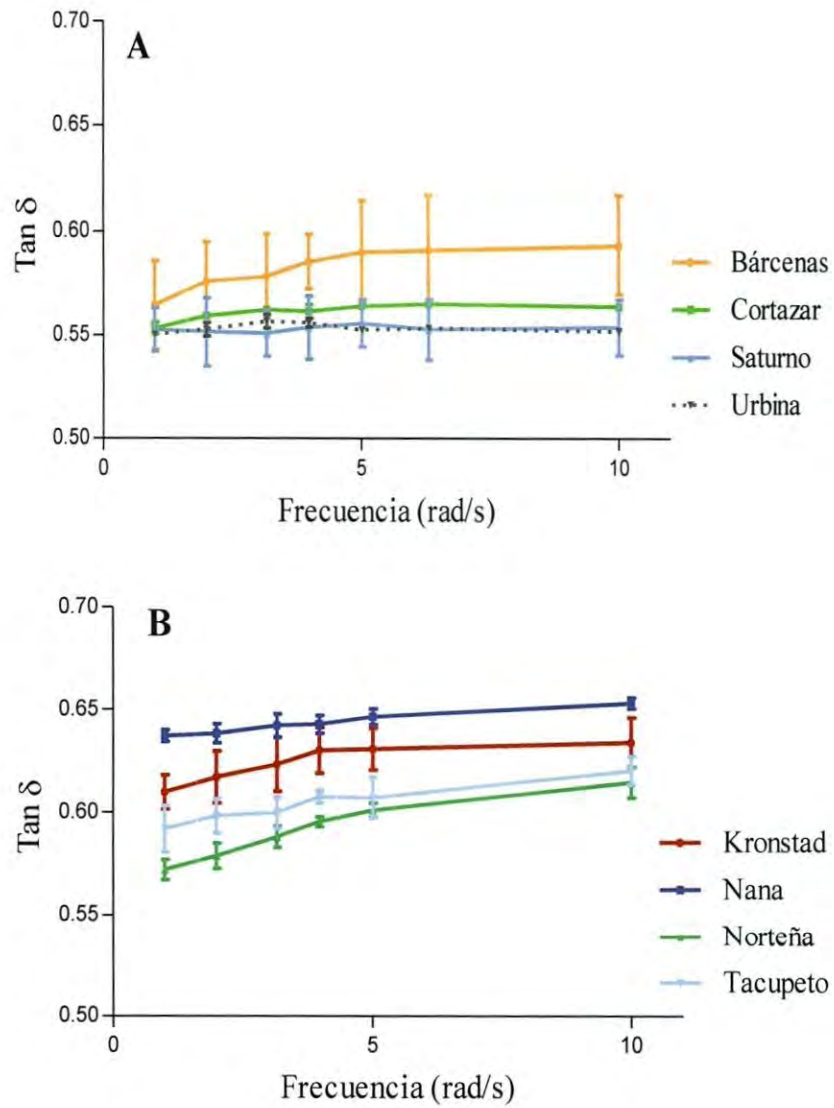


Figura 33. Valores y comportamiento del ángulo de fase ($\text{Tan } \delta$) de masas: A. Variedades del grupo suave; B. Variedades del grupo fuerte. Las barras indican la desviación estándar.

Los valores de G' para las variedades del grupo suave obtenidas en esta investigación fueron más altos que los reportados por Magaña-Barajas et al. (2009), quienes de igual forma consideraron los valores a una frecuencia de 5 rad/s en sus resultados. Khatkar & Schoefield (2002) discutieron que en barridos de frecuencia las masas débiles (provenientes de trigos de baja aptitud panificable) presentaron contribuciones de G' mayores en comparación con las masas de harina fuerte, concluyendo que un valor bajo de G' corresponde a una harina de mayor calidad panadera.

En el grupo suave el promedio de módulo viscoso (G'') fue 35036 Pa, valor superior al promedio del grupo fuerte (26464 Pa) (Tabla 29). En cuanto a las variedades, tanto las del grupo suave como las del grupo fuerte no presentaron diferencias estadísticas significativas ($P > 0.05$) en este parámetro dentro de su respectivo grupo. En el grupo suave los valores de G'' registrados fueron entre 29765 Pa (Saturno) y 39652 Pa (Bárceñas), mientras que en las variedades del grupo fuerte los valores oscilaron entre 22336 Pa (Nana) y 29796 Pa (Kronstad).

Correlaciones simples

En la Tabla 30 se presentan las correlaciones entre parámetros de grano acondicionado, harina y masa correspondientes al grupo suave. Se observó que la fuerza máxima de compresión del grano acondicionado ($F_{\max}G$) correlacionó significativamente ($P < 0.05$) con el TLL, W_tM y W_pM , y muy significativamente (0.99, $P < 0.01$) con el tiempo máximo de desarrollo de la masa (DM). El contenido de humedad de la harina (CHH) presentó correlación significativa negativa ($P < 0.05$) con cada uno de los parámetros viscoelásticos de la masa (W_tM , W_eM y W_pM), además de presentar una correlación negativa muy significativa (-0.98, $P < 0.01$) con $F_{\max}M$. El trabajo total del grano (W_tG) presentó correlaciones significativas ($P < 0.05$) con el TLL y W_eM , y muy significativas ($P < 0.01$) con el DM, W_tM y W_pM . El trabajo elástico del grano (W_eG) tuvo una correlación muy significativa (0.99, $P < 0.01$) con el DM y correlaciones significativas (0.94, $P < 0.05$) con W_tM y W_pM . El trabajo plástico del grano (W_pG) presentó correlación muy significativa (0.99, $P < 0.01$) con cada una de las propiedades viscoelásticas de la masa.

Tabla 30. Correlaciones simples (r) entre parámetros de grano de trigo acondicionado, harina y masa de trigo suave.

	CHH ^a	VS	TLL	DM	F _{máx} G	W _t G	W _e G	W _p G
CHH	1	0.96*	-0.98**	ns ^b	ns	ns	ns	-0.97*
VS	0.96* ^c	1	-0.97*	ns	ns	ns	ns	ns
TLL	-0.98** ^d	ns	1	ns	0.94*	0.94*	ns	0.96*
DM	ns ^b	ns	ns	1	0.99**	0.99**	0.99**	0.97*
F _{máx} M	-0.98**	-0.95*	0.94*	ns	ns	ns	ns	ns
W _t M	-0.95*	ns	ns	0.97*	0.95*	0.98**	0.94*	0.99**
W _e M	-0.96*	ns	0.94*	0.95*	ns	0.96*	ns	0.99**
W _p M	-0.95*	ns	0.94*	0.97*	0.95*	0.98**	0.94*	0.99**

^a CHH, humedad harina; VS, volumen de sedimentación; TLL, tiempo de llegada; DM, desarrollo máximo; F_{máx}G, fuerza máxima de compresión de grano acondicionado; W_tG, trabajo total grano acondicionado; W_eG, trabajo elástico grano acondicionado; W_pG, trabajo plástico grano acondicionado; F_{máx}M, fuerza máxima de compresión masa; W_tM, trabajo total masa; W_eM, trabajo elástico masa; W_pM, trabajo plástico masa.

^b ns, no significativo (P>0.05).

^c *Significativo (P<0.05).

^d **Muy significativo (P<0.01).

De acuerdo con estos resultados en el grupo suave, destaca el número e importancia de las correlaciones que presentó el trabajo plástico de la masa (W_pM), sobresaliendo principalmente las relacionadas con las propiedades viscoelásticas del grano acondicionado. En este grupo de trigo, el componente viscoso mostró una influencia ligeramente mayor sobre el comportamiento viscoelástico general.

En la Tabla 31 se muestran las correlaciones entre parámetros de harina y masa del grupo de trigo fuerte. Se observó que el rendimiento de harina (RH) tuvo correlación negativa muy significativa (-0.99 , $P < 0.01$) con el tiempo de desarrollo de la masa (DM) y correlación muy significativa ($P < 0.01$) con el ITM. El contenido de proteína de la harina (CPH) presentó correlaciones significativas ($P < 0.05$) con el gluten húmedo (GH) y la absorción de agua (AA), así como correlaciones negativas significativas (-0.97 , $P < 0.05$) con $F_{máx}M$ y W_pM . El GH presentó correlación significativa negativa (-0.95 , $P < 0.05$) con W_eM y correlaciones negativas muy significativas (-0.99 , $P < 0.01$) con las propiedades de la masa $F_{máx}M$, W_tM y W_pM . El GH fue el parámetro con mayor número de correlaciones dentro del grupo de trigo fuerte.

Los resultados reflejaron la influencia de las proteínas de almacenamiento (gluten) sobre las propiedades viscoelásticas de la masa evaluadas por compresión uniaxial bajo pequeña deformación. A mayor contenido de GH en las masas de este grupo decrecía el valor de W_tM , propiciándose una menor deformación de la masa durante la compresión. A diferencia del grupo de trigo suave, en el grupo fuerte el componente elástico tuvo mayor influencia sobre el comportamiento viscoelástico de la masa.

Tabla 31. Correlaciones simples (r) entre parámetros de harina y masa de trigo fuerte.

	RH ^a	CPH	GH
DM	-0.99** ^d	ns	ns
ITM	0.99**	ns	ns
GH	ns ^b	0.96* ^c	ns
AA	ns	0.95*	ns
F _{máx} M	ns	-0.97*	-0.99**
W _t M	ns	ns	-0.99**
W _e M	ns	ns	-0.95*
W _p M	ns	-0.97*	-0.99**

^a RH, rendimiento de harina; CPH, contenido de proteína en harina; GH, gluten húmedo; DM, desarrollo máximo; ITM, índice de tolerancia al mezclado; AA, absorción de agua; F_{máx}M, fuerza máxima de compresión de masa; W_tM, trabajo total de masa; W_eM, trabajo elástico de masa; W_pM, trabajo plástico de masa.

^b ns, no significativo (P>0.05).

^c *Significativo (P<0.05).

^d **Muy significativo (P<0.01).

Características fisicoquímicas del pan

Volumen específico. En la Tabla 32 se presenta el análisis de varianza del efecto de las variedades de trigo del grupo suave y fuerte sobre el volumen específico del pan (VEP). Se observa que la variedad tuvo un efecto muy significativo ($P < 0.01$) sobre el VEP, tanto en el grupo suave como en el grupo fuerte.

En la Figura 34 se presentan los valores promedio de volumen específico de pan (VEP) elaborado con harina de variedades de trigo suave y fuerte.

El grupo de pan fuerte tuvo un promedio de VEP ($5.6 \text{ cm}^3/\text{g}$), mayor al del grupo suave ($5.1 \text{ cm}^3/\text{g}$). Tanto las variedades del grupo fuerte como las del grupo suave presentaron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) en este parámetro. En el grupo fuerte, los valores de VE entre variedades estuvieron en un rango entre $5.1 \text{ cm}^3/\text{g}$ (Tacupeto) y $5.8 \text{ cm}^3/\text{g}$ (Kronstad). Las variedades del grupo suave presentaron valores de $4.7 \text{ cm}^3/\text{g}$ (Cortazar) a $5.4 \text{ cm}^3/\text{g}$ (Urbina).

Otras investigaciones (Konopka et al., 2004; Curic et al., 2008) reportaron valores de volumen específico similares (entre 5.3 y $5.9 \text{ cm}^3/\text{g}$) a los de esta investigación, mientras que en otros autores (O'Brien et al., 2003; Osella et al., 2008; Ponzio et al., 2008) refirieron valores medios menores (entre 3.5 y $4.5 \text{ cm}^3/\text{g}$).

Humedad de la miga y la corteza. En la Tabla 33 se presenta el análisis de varianza del efecto de la variedad (V), tiempo de almacenamiento (T) e interacción VxT sobre el contenido de humedad en la miga (HM) y corteza (HC) de pan de trigo del grupo suave y fuerte. La variedad y el tiempo, así como la interacción VxT mostraron un efecto muy significativo ($P < 0.01$) sobre la humedad de la miga y corteza del pan, tanto en el grupo suave como en el grupo fuerte. Se observó que el tiempo de almacenamiento presentó el mayor efecto en los dos parámetros fisicoquímicos evaluados en ambos grupos de pan. La variedad, el tiempo y la interacción VxT presentaron mayor influencia sobre la HC en ambos grupos de pan.

Tabla 32. Análisis de varianza, valor de F , del efecto de las variedades de trigo del grupo suave y fuerte sobre el volumen específico del pan.

FV ^a	GL	F	
		Grupo suave VEP	Grupo fuerte VEP
Variedad	3	44.3** ^b	44.3**
Error	32		
Total	35		

^a FV, fuente de variación; GL, grados de libertad; VEP, volumen específico de pan.

^b **Muy significativo ($P < 0.01$).

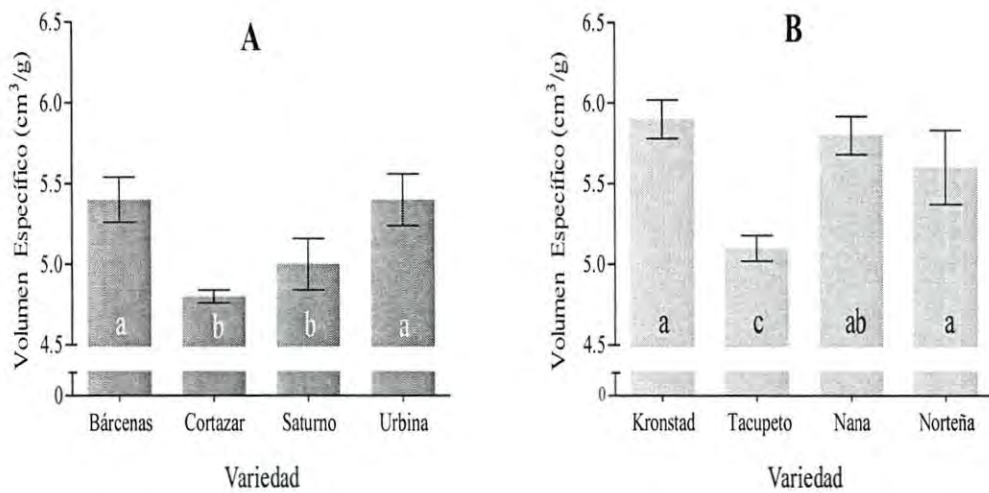


Figura 34. Volumen específico (VEP) de pan elaborado con: A. Harina de variedades de trigo suave; y B. Harina de variedades de trigo fuerte. Las barras indican la desviación estándar. Para un mismo grupo de trigo, letras distintas en las barras indican diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$).

Tabla 33. Análisis de varianza, valor de F , del efecto de la variedad y tiempo de almacenamiento sobre el contenido de humedad en la miga y corteza de pan de trigo del grupo suave y fuerte.

FV ^a	GL	F			
		Grupo suave		Grupo fuerte	
		HM	HC	HM	HC
Variedad (V)	3	76 ^{***b}	217 ^{**}	34 ^{**}	79 ^{**}
Tiempo (T)	2	150 ^{**}	8078 ^{**}	315 ^{**}	1852 ^{**}
VxT	6	14 ^{**}	39 ^{**}	23 ^{**}	18 ^{**}
Error	12				
Total	23				

^a FV, fuente de variación; GL, grados de libertad; HM, humedad de miga; HC, humedad de corteza.

^b ^{***}Muy significativo ($P < 0.01$).

En la Figura 35 se presenta el efecto del tiempo de almacenamiento sobre la humedad de la miga (HM) y corteza (HC) de pan elaborado con harina de variedades de trigo suave.

La tendencia general en el grupo suave fue que la HM disminuyó gradualmente a lo largo del tiempo de almacenamiento, mientras que la HC mostró un comportamiento inverso. Las variedades del grupo suave presentaron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) en la HM y HC durante su almacenamiento. A las 2 horas de almacenamiento el promedio de la HM en las variedades del este grupo fue 37.8% y disminuyó a 36.7% a las 48 h de almacenamiento. Por el contrario, el valor promedio de la HC a las 2 h fue 18.4%, incrementándose hasta 25.3% a las 48 h.

En la Figura 36 se presenta el efecto del tiempo de almacenamiento sobre la humedad de la miga (HM) y corteza (HC) de pan elaborado con harina de variedades de trigo fuerte.

Las tendencias de comportamiento de la HM y la HC del grupo fuerte fueron las mismas que las presentadas por el grupo suave, es decir, la HM disminuyó gradualmente a lo largo del periodo de almacenamiento, mientras que la HC mostró un comportamiento inverso. Respecto a la HM, las variedades de este grupo presentaron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) sólo a las 48 h de almacenamiento, mientras que para la HC presentaron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) durante el almacenamiento. El promedio de HM a las 2 horas de almacenamiento fue 39.7% y finalizó a las 48 h con un valor promedio de 38.3%. En cuanto a HC el valor promedio a las 2 h fue 18.3%, finalizando en 25.9% a las 48 h.

Baik & Chinachoti (2000), señalaron que el contenido de humedad de la miga decrece significativamente durante el almacenamiento, sin embargo, determinaron que la humedad del pan almacenado sin corteza tiende a alcanza un equilibrio a través del tiempo de almacenamiento. Por otro lado, consideraron que en un sistema cerrado, el agua puede equilibrarse entre la miga y la corteza durante el almacenamiento, por lo que el contenido de humedad de la corteza se incrementa, mientras que el centro de la miga decrece gradualmente. Estos autores reportaron valores de humedad de miga entre 37 y 39% de cero a 48 h, valores similares a los reportados en esta investigación.

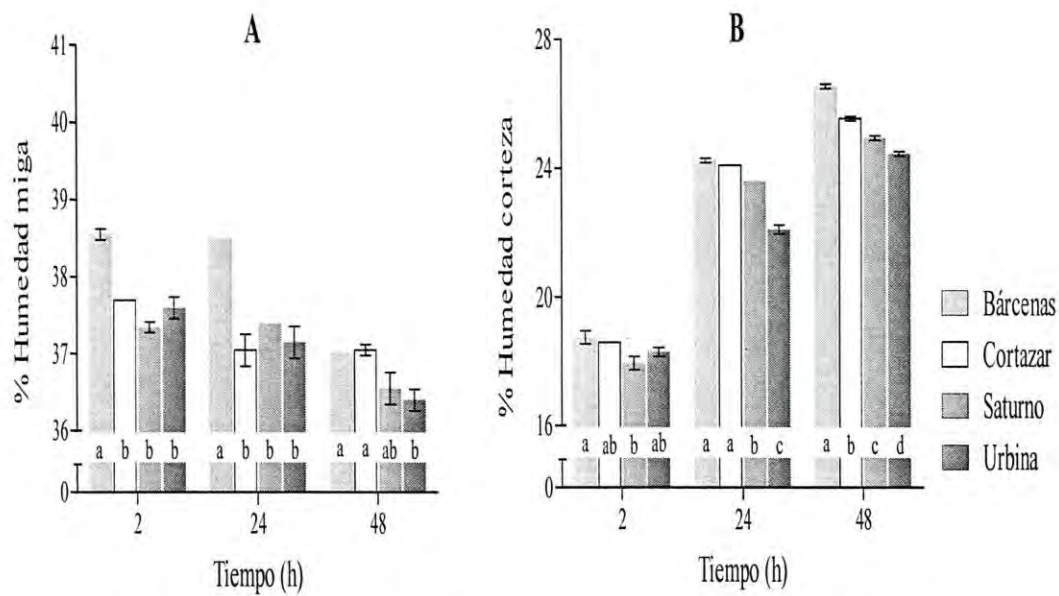


Figura 35. Efecto del tiempo de almacenamiento sobre la humedad: A. Miga; y B. Corteza de pan elaborado con harina de variedades de trigo suave. Las barras indican la desviación estándar. En un mismo periodo de almacenamiento, letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$).

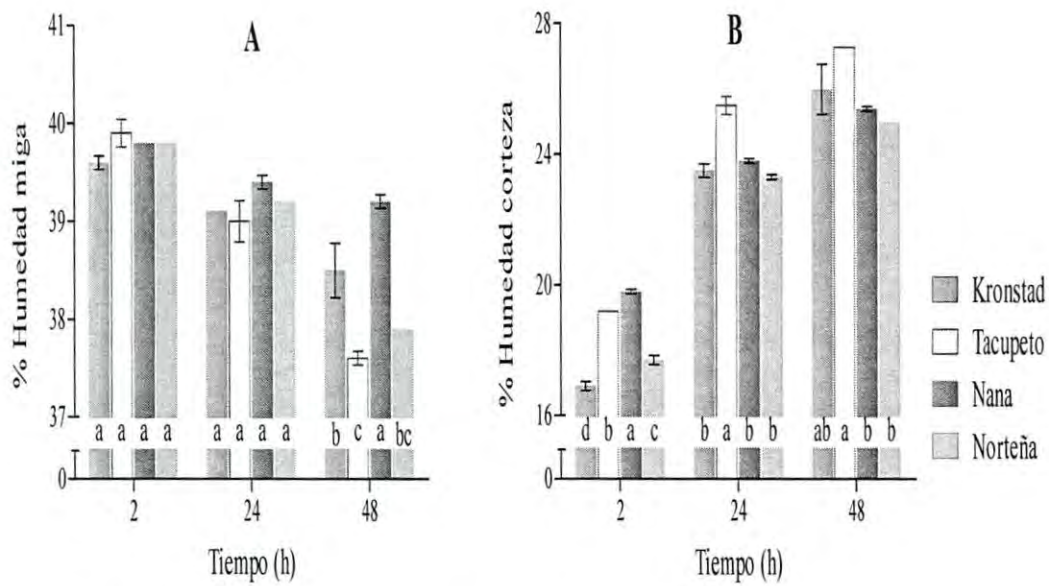


Figura 36. Efecto del tiempo de almacenamiento sobre la humedad: A. Miga; y B. Corteza de pan elaborado con harina de variedades de trigo fuerte. Las barras indican la desviación estándar. En un mismo periodo de almacenamiento, letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$).

Por otro lado, Patel et al. (2005) refieren que durante el almacenamiento del pan ocurren cambios indeseables destacando los cambios en el contenido de humedad, la migración de la humedad dentro del producto, así como posibles interacciones entre el almidón y el gluten. En este sentido, Curic et al. (2008) consideran que el proceso de envejecimiento involucra la disminución de la movilidad del agua debido a la re-asociación de polímeros y la cristalización de la amilopectina.

Características viscoelásticas del pan

En cuanto a la reproducibilidad del método de compresión uniaxial bajo pequeña deformación, cada uno de los parámetros viscoelásticos evaluados en el pan: trabajo total (W_tP), trabajo elástico (W_eP) y trabajo plástico (W_pP) mostraron un coeficiente de variación (CV) entre 15% y 22%, dependiendo del periodo de almacenamiento, siendo en general mayor (22%) a las 2 h de evaluación. De acuerdo con estos valores, se concluyó que el método tuvo una buena reproducibilidad para evaluar las propiedades viscoelásticas del pan.

En la Tabla 34 se presenta el análisis de varianza del efecto de la variedad (V), tiempo de almacenamiento (T) e interacción VxT sobre las propiedades viscoelásticas de pan de trigo del grupo suave y fuerte, evaluadas por compresión uniaxial bajo pequeña deformación. El efecto de V, T y la interacción VxT fue muy significativo ($P < 0.01$) sobre los tres parámetros viscoelásticos evaluados tanto en el grupo de trigo suave como en el grupo fuerte. El tiempo de almacenamiento fue el factor que influyó en mayor medida sobre las características viscoelásticas del pan. En el grupo de variedades suaves se observó que los efectos de V, T y VxT se manifestaron más sobre el trabajo plástico (W_pP), mientras que en el grupo fuerte el trabajo total (W_tP) fue el más afectado.

En la Figuras 37 y 38 se presentan los valores medios de trabajo total (W_tP), trabajo elástico (W_eP), trabajo plástico (W_pP), grado de elasticidad (GEP) y fuerza máxima de compresión ($F_{máx}P$) a diferentes tiempos de almacenamiento en pan elaborado con variedades de trigo suave y fuerte, respectivamente.

Tabla 34. Análisis de varianza, valor de F , del efecto de la variedad y tiempo de almacenamiento sobre las propiedades viscoelásticas de pan de trigo del grupo suave y fuerte, evaluadas por compresión uniaxial bajo pequeña deformación.

FV ^a	GL	F					
		Grupo suave			Grupo fuerte		
		W _t P	W _e P	W _p P	W _t P	W _e P	W _p P
Variedad (V)	3	22** ^b	15**	30**	20**	18**	16**
Tiempo (T)	2	379**	283**	406**	370**	302**	365**
V x T	6	7.0**	5.6**	9.4**	5.8**	5.9**	4.5**
Error	96						
Total	107						

^a FV, fuente de variación; GL, grados de libertad; W_tP, trabajo total en pan; W_eP, trabajo elástico en pan; W_pP, trabajo plástico en pan.

^b **Muy significativo (P<0.01).

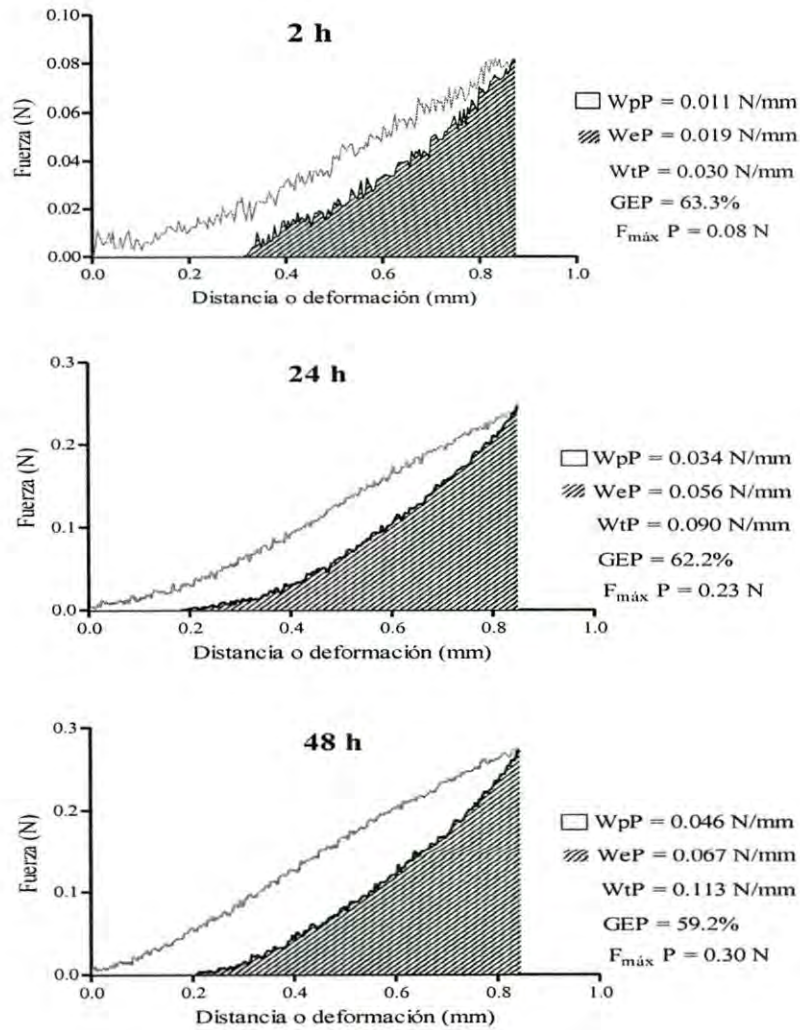


Figura 37. Valores medios del comportamiento viscoelástico a diferentes periodos de almacenamiento en pan elaborado con variedades de trigo suave. La línea gris representa la carga de compresión; la línea negra, la descarga.

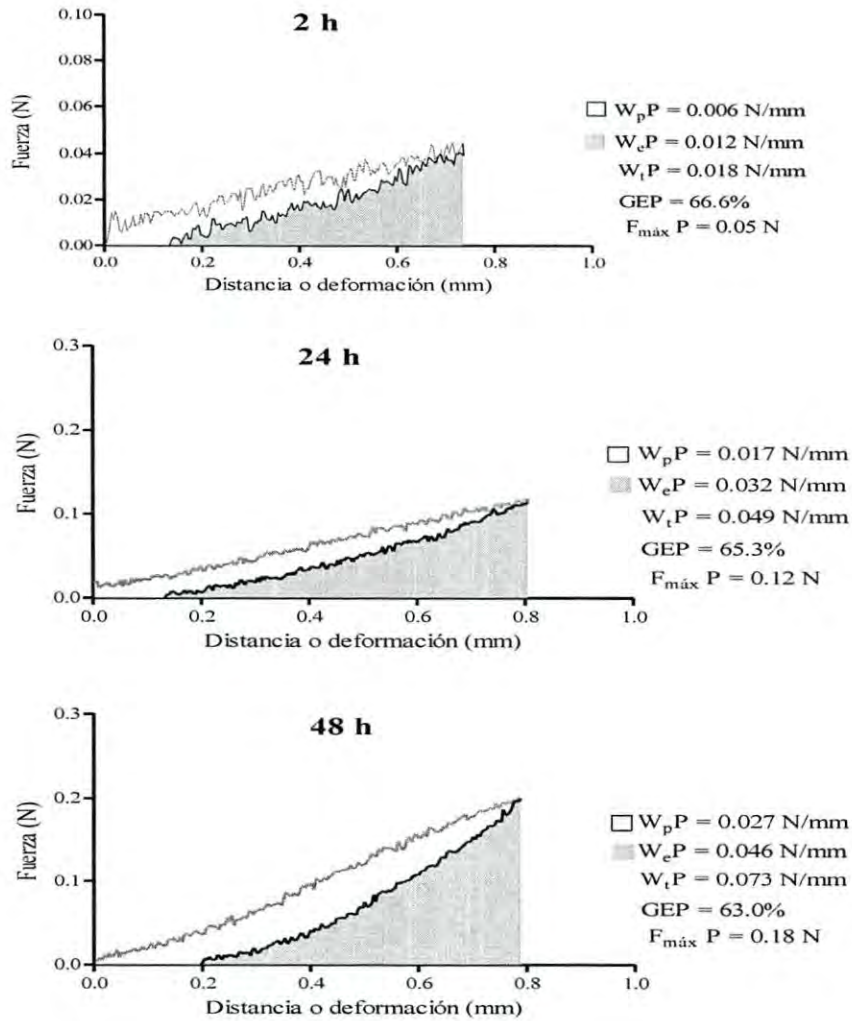


Figura 38. Valores medios del comportamiento viscoelástico a diferentes periodos de almacenamiento en pan del grupo fuerte. La línea gris representa la carga de compresión; la línea negra, la descarga.

Las curvas fuerza-distancia registradas a las 2 h de almacenamiento tanto en el grupo suave como en el grupo fuerte, no fueron completamente uniformes; las líneas de carga y descarga que conformaron el ciclo de compresión (mismo que a su vez permite describir el comportamiento viscoelástico), mostraron ligera asimetría en su linealidad. Sin embargo, esto no influyó en la evaluación del comportamiento viscoelástico en este periodo de almacenamiento (2 h), ya que las gráficas presentaron áreas bien definidas que permitieron el cálculo del W_eP y W_pP en ambos grupos.

El trabajo total del pan (W_tP) se incrementó tanto en el grupo fuerte como en el suave a medida que transcurrió el tiempo de almacenamiento. Los valores promedio de W_tP para el pan del grupo suave (Figura 37) aumentaron de 0.030 N·mm a las 2 h de almacenamiento a 0.113 N·mm a las 48 h. Por otro lado, en el pan del grupo fuerte (Figura 38) este incremento fue de 0.018 N·mm a 0.073 N·mm de 2 a 48 h, respectivamente. En general, se observó que la tendencia del W_tP fue la misma en ambos grupos, sin embargo, de acuerdo a los valores promedio obtenidos en cada grupo y periodo de almacenamiento, se estableció que las variedades del grupo suave mostraron mayor grado de deformación (mayor W_tP).

Por otro lado, el comportamiento de W_eP y W_pP puede explicarse y comprenderse mejor en términos de grado de elasticidad del pan (GEP). El GEP se utilizó como una relación directa para determinar el porcentaje de W_eP correspondiente a cada periodo de almacenamiento. A mayor proporción de W_eP en una curva fuerza-distancia, mayor GEP.

El GEP presentó una tendencia a disminuir a medida que transcurrió el tiempo de almacenamiento, tanto en el grupo suave (Figura 37) como en el grupo fuerte (Figura 38). Los valores promedio de GEP para el grupo suave y fuerte fueron, respectivamente: a las 2 h de almacenamiento 63.3 % y 66.6%; a las 24 h 62.2% y 65.3%, y a las 48 h 59.2% y 63.0%. A partir de estos resultados, se determinó que el GEP del grupo fuerte no sólo presentó valores promedio más altos en cada uno de los periodos de almacenamiento evaluados, sino que además la disminución gradual de esta característica fue menor que en las variedades del grupo suave.

En términos generales, estas diferencias permitieron establecer que las variedades del grupo fuerte mostraron un mejor comportamiento viscoelástico en comparación con las variedades del grupo suave, ya que el GEP se asoció inversamente con la fuerza máxima (dureza) del producto.

Con respecto a la fuerza máxima del pan ($F_{\text{máx}}P$), ésta se incrementó gradualmente conforme transcurrió el tiempo de almacenamiento, tanto en el grupo suave como en el fuerte. En el pan del grupo suave, la $F_{\text{máx}}P$ aumentó de 0.08 N a 0.30 N en un intervalo de 2 a 48 h, mientras que en el grupo fuerte pasó de 0.05 N a 0.18 N, considerando los mismos periodos de almacenamiento. La $F_{\text{máx}}P$ está directamente relacionada con la dureza, por lo que los valores más elevados del grupo suave indicaron una mayor dureza de este grupo en comparación con el grupo fuerte, durante el tiempo de almacenamiento evaluado.

En general y para ambos grupos de pan, W_tP y $F_{\text{máx}}P$ presentaron los cambios más significativos durante el periodo de almacenamiento comprendido entre 2 h y 24 h. Sin embargo, el GEP mostró mayores diferencias entre las 24 y 48 h.

La conformación del pan es muy compleja, debido a que existen diversas estructuras específicas a diferentes niveles y escalas, resultando difícil relacionar los cambios en las propiedades mecánicas de la miga durante el envejecimiento. Keetels et al. (1996) señalaron que el pan tiene una estructura porosa en la cual se distinguen sólidos 'celulares' con células abiertas (como una esponja) y sólidos 'celulares' con células cerradas (como espuma). La estructura de la miga del pan está lejos de ser un material ideal en cualquiera de los dos casos, debido a la amplia variación en el tamaño de las células de gas y las densidades locales; particularmente, se asocia que a mayor frescura del pan las células (espacios) de gas están presentes en mayor número.

A partir de los resultados obtenidos se determinó que el método de compresión uniaxial bajo pequeña deformación utilizado en este estudio, fue una herramienta útil que permitió evaluar y distinguir las propiedades viscoelásticas de las variedades de pan del grupo suave y del grupo fuerte.

Características de textura

En la Tabla 35 se presenta el análisis de varianza del efecto de la variedad (V), tiempo de almacenamiento (T) e interacción VxT sobre las características de textura de pan de trigo del grupo suave. Se observó que la variedad y la interacción VxT tuvieron un efecto muy significativo ($P < 0.01$) sobre las características de textura del pan evaluadas, excepto sobre la elasticidad (ELS), donde no mostraron efecto significativo ($P > 0.05$). El tiempo de almacenamiento presentó un efecto muy significativo ($P < 0.01$) sobre todos los parámetros de textura evaluados, además de ser el factor que mostró mayor influencia.

En la Tabla 36 se presenta el análisis de varianza del efecto de la variedad (V), tiempo de almacenamiento (T) e interacción VxT sobre las características de textura de pan de trigo del grupo fuerte. Los tres factores mostraron un efecto muy significativo ($P < 0.01$) sobre las características de textura del pan. El tiempo de almacenamiento fue el factor que en mayor proporción afectó los parámetros evaluados, destacando su efecto sobre la cohesividad (COH) y firmeza (FIR) del pan.

En las Figuras 39 y 40 se presentan los valores medios y el comportamiento de los parámetros de textura durante el tiempo de almacenamiento del pan del grupo suave y fuerte, respectivamente.

La firmeza (FIR) del pan en ambos grupos de pan mostró la misma tendencia de comportamiento, es decir, aumentó gradualmente con el tiempo de almacenamiento. Tanto las variedades del grupo suave como las del grupo fuerte presentaron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) con el tiempo de almacenamiento. Entre las variedades del grupo suave (Figura 39), el valor promedio de FIR pasó de 2.3 N (2 h) a 7.5 N (48 h), mientras que en el grupo de pan fuerte (Figura 40) la FIR se incrementó de 1.3 N a 4.0 N.

Tabla 35. Análisis de varianza, valor de *F*, del efecto de la variedad y tiempo de almacenamiento sobre las características de textura de pan de trigo del grupo suave.

FV ^a	GL	<i>F</i>				
		FIR	ELS	COH	GOM	RES
Variedad (V)	3	119** ^c	0.4ns ^b	14**	35**	34**
Tiempo (T)	2	1131**	45**	5468**	124**	4347**
VxT	6	162.1**	0.6ns	52.2**	43.1**	24.7**
Error	96					
Total	107					

^a FV, fuente de variación; GL, grados de libertad; FIR, firmeza; ELS, elasticidad; COH, cohesividad; GOM, gomosidad; RES, resiliencia.

^b ns, no significativo (P>0.05).

^c **Muy significativo (P<0.01).

Tabla 36. Análisis de varianza, valor de *F*, del efecto de la variedad y tiempo de almacenamiento sobre las características de textura de pan de trigo del grupo fuerte.

FV ^a	GL	<i>F</i>				
		FIR	ELS	COH	GOM	RES
Variedad (V)	3	168** ^b	50**	79**	82**	27**
Tiempo (T)	2	1109**	112**	1202**	538**	1061**
VxT	6	19.5**	14.0**	14.2**	13.5**	9.6**
Error	96					
Total	107					

^a FV, fuente de variación; GL, grados de libertad; FIR, firmeza; ELS, elasticidad; COH, cohesividad; GOM, gomosidad; RES, resiliencia.

^b **Muy significativo (P<0.01).

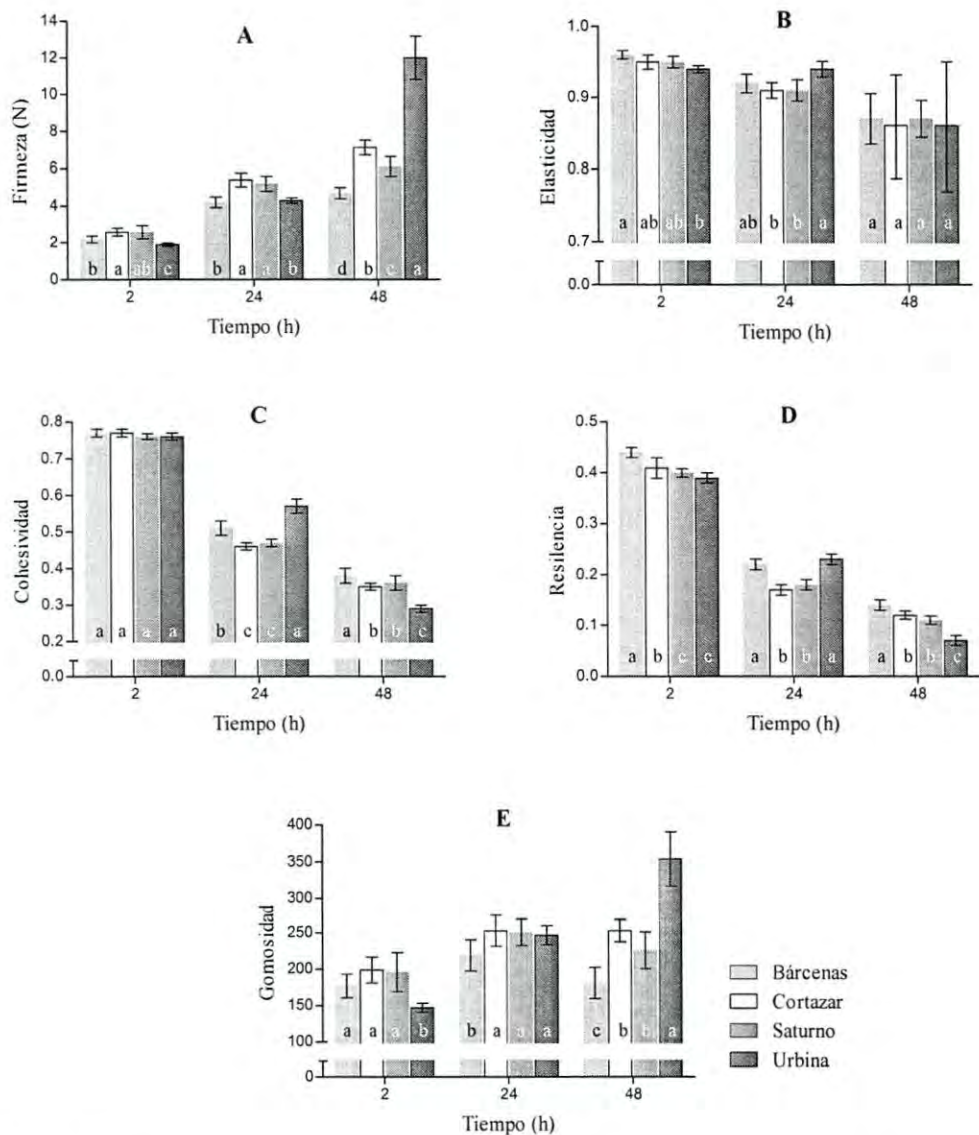


Figura 39. Valores medios y comportamiento de los parámetros de textura con el tiempo de almacenamiento en pan del grupo suave: A. Firmeza (FIR); B. Elasticidad (ELS); C. Cohesividad (COH); D. Resiliencia (RES) y E. Gomosidad (GOM). Las barras indican la desviación estándar. En un mismo periodo de almacenamiento, letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$).

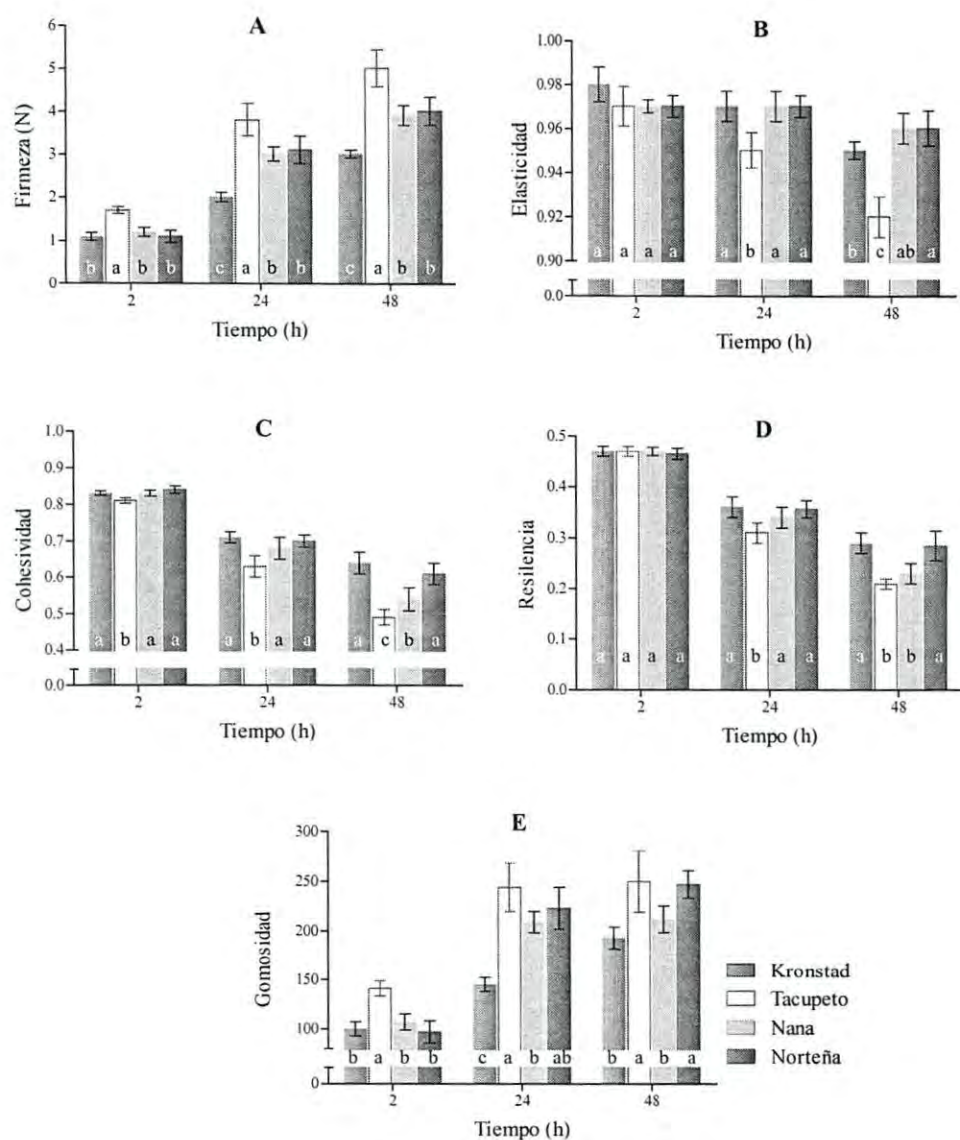


Figura 40. Valores medios y comportamiento de los parámetros de textura con el tiempo de almacenamiento en pan del grupo fuerte: A. Firmeza (FIR); B. Elasticidad (ELS); C. Cohesividad (COH); D. Resiliencia (RES) y E. Gomosidad (GOM). Las barras indican la desviación estándar. En un mismo periodo de almacenamiento, letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$).

La firmeza del pan determinada por compresión mediante el analizador de textura, es el método más común para evaluar los efectos del envejecimiento en el pan. Esta característica está relacionada inversamente con la suavidad y directamente con la dureza del producto. Entre otras razones, el incremento de la FIR se origina como resultado de la pérdida de humedad en la miga y el marcado efecto de la retrogradación del almidón, ya que en general los trigos suaves - y en consecuencia sus harinas – poseen mayor cantidad de almidón y, por lo tanto, menor calidad panificable (Xie et al., 2003).

El incremento de la FIR con el tiempo de almacenamiento, ocasionó el consecuente descenso de la elasticidad (ELS). En ambos grupos, la ELS mostró la misma tendencia de comportamiento, al disminuir con el tiempo de almacenamiento. Las variedades del grupo suave presentaron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) con el tiempo de almacenamiento, excepto a las 48 h. En este grupo (Figura 39) la ELS descendió de 0.95 (2 h) a 0.87 (48 h). Por otro lado, las variedades del grupo fuerte presentaron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) con el tiempo de almacenamiento, excepto a las 2 h. En el grupo fuerte (Figura 40), el valor promedio de ELS pasó de 0.97 a 0.95 de 2 a 48 h, respectivamente.

La cohesividad (COH) mostró la misma tendencia de comportamiento en ambos grupos al disminuir con el tiempo de almacenamiento. Las variedades del grupo suave presentaron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) con el tiempo de almacenamiento, excepto a las 2 h. En este grupo (Figura 39) el valor promedio de COH del pan fresco (2 h) fue 0.77, disminuyendo a 0.35 a las 48 h. Por otro lado, las variedades del grupo fuerte presentaron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) con el tiempo de almacenamiento. En este grupo (Figura 40) el valor promedio de COH a las 2 h fue 0.83 y disminuyó a 0.57 a las 48 h. De acuerdo con los ANDEVA (Tablas 35 y 36), la COH fue el parámetro de textura sobre el cual tanto la variedad como el tiempo de almacenamiento tuvieron mayor efecto.

La cohesividad (COH) es un parámetro directamente proporcional al grado de recuperación del pan después de la compresión (deformación). Keetels et al. (1996) reportaron que un pan fresco llega a presentar una recuperación cercana al 85% (0.85) después de una deformación de 50%. En esta investigación la deformación aplicada durante la evaluación de la textura fue 40%.

La resiliencia (RES) mostró la misma tendencia de comportamiento en ambos grupos al disminuir con el tiempo de almacenamiento, aunque presentó un efecto más notable sobre el pan del grupo suave. Las variedades del grupo suave presentaron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) para este parámetro con el tiempo de almacenamiento. En este grupo, la RES pasó de 0.42 (2 h) a 0.11 (48h). Por otro lado, las variedades del grupo fuerte presentaron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) con el tiempo de almacenamiento, excepto a las 2 h. Dentro de este grupo la RES decreció de 0.47 (2 h) a 0.25 (48 h).

El valor de RES es directamente proporcional al grado de recuperación, e inversamente proporcional al de deformación. Este parámetro que es una medida de cómo la muestra se recupera a una deformación en términos de velocidad y fuerza derivada.

La gomosidad (GOM) del pan en ambos grupos de pan mostró la misma tendencia de comportamiento, es decir, aumentó gradualmente con el tiempo de almacenamiento. Tanto las variedades del grupo suave como las del grupo fuerte presentaron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) con el tiempo de almacenamiento. En el grupo suave los valores promedio de GOM se incrementaron de 180 (2 h) a 254 (48 h), mientras que en el grupo fuerte el valor promedio pasó de 112 (2 h) a 226 (48 h).

La gomosidad (dureza x cohesividad), es un parámetro que evalúa en cierta forma la firmeza del pan, por lo que su valor es directamente proporcional con el de dureza e inversamente proporcional con el de COH. En este sentido, valores menores de GOM son deseables en un pan de buena textura.

Con respecto al análisis del perfil de textura, se puede concluir que las tendencias de comportamiento a lo largo del tiempo de almacenamiento fueron similares para ambos grupos de pan. De acuerdo con los valores promedio registrados en cada parámetro y grupo de pan, se pudo comprobar y concluir que la calidad de la textura del pan del grupo fuerte fue mejor que la del grupo suave.

Sin embargo, es importante considerar que los atributos de textura normalmente se asocian a la combinación del efecto de varios parámetros físicos y químicos que ocurren durante el almacenamiento (Gámbaro et al., 2002).

Discusión General

El trigo es un cereal cuya importancia y valor radican principalmente en su potencial para elaborar diferentes productos, entre los que destacan los de panificación. Las características del grano determinan la conveniencia de su uso final, toda vez que sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y viscoelásticas supeditan la calidad de los productos intermedios y finales que a partir de él se elaboran. El conocimiento de esas propiedades de manera anticipada a la preparación de un producto, resulta sumamente importante y atractivo. Sin embargo, los métodos de evaluación existentes limitan el conocimiento de la calidad integral del grano y/o sus productos, siendo necesario recurrir a diferentes técnicas que se complementen entre sí. En este contexto, la presente investigación tuvo como principal objetivo adaptar el método de compresión uniaxial utilizado en granos de trigo y reportado en otras investigaciones, y ajustar las condiciones de esa metodología en función de las leyes de Hooke y de viscosidad de Newton, a fin de realizar evaluaciones dentro de la región viscoelástica lineal del material, es decir, considerando deformaciones inferiores a 5%. Como resultado, fue posible desarrollar el método de compresión uniaxial bajo pequeña deformación, el cual permitió evaluar las propiedades viscoelásticas de grano de diferentes grupos y variedades, masa y pan siguiendo las mismas condiciones de prueba en los tres productos. La aplicación de este método permitió distinguir entre diferentes grupos y variedades de trigo, además de que en granos de trigo con diferente contenido de humedad se logró establecer que su elasticidad disminuía al incrementarse el contenido de humedad, mientras que la plasticidad se incrementaba por el mismo efecto. Por otro lado, se observó que el grano, la masa y el pan al ser materiales con estructura y conformación diferente, de igual forma mostraron grados de elasticidad (GE) distintos y no comparables entre sí. A pesar de que la miga del pan es un material de estructura compleja -principalmente cuando está fresca- se lograron evaluar las propiedades viscoelásticas utilizando el método de compresión uniaxial bajo pequeña deformación con el tiempo de almacenamiento. Las determinaciones

viscoelásticas en grano, masa y pan se relacionaron entre sí y con otras técnicas y métodos empleados de manera común en la industria. Las propiedades viscoelásticas del grano se relacionaron con características físicas y químicas de grano; las características viscoelásticas determinadas en masa con análisis fisicoquímicos y reológicos de harina; y las propiedades del pan, con análisis de perfil de textura. En conclusión, fue posible desarrollar un método de compresión uniaxial bajo pequeña deformación que permitió evaluar el comportamiento viscoelástico de granos individuales de trigo con diferente contenido de humedad, masa y pan.

CONCLUSIONES

El método fundamental de compresión uniaxial bajo pequeña deformación desarrollado y aplicado en esta investigación, permitió evaluar y correlacionar las propiedades viscoelásticas de granos individuales, masa y pan de diferentes grupos y variedades de trigo. Este método consideró la aplicación de las leyes de Hooke y de viscosidad de Newton en la región de viscoelasticidad lineal de los materiales.

El contenido de humedad fue el factor que más influyó sobre el comportamiento viscoelástico del grano, seguido del grupo. Las tendencias en los resultados indicaron que el incremento de humedad en el grano provocó el descenso de los parámetros viscoelásticos W_tG , W_eG y E y el aumento de W_pG , tanto en las variedades del grupo de trigo suave como en las del grupo de trigo fuerte.

Se presentaron correlaciones negativas significativas entre las propiedades físicas (peso de 1,000 granos, largo y grosor) y viscoelásticas del grano a diferente contenido de humedad. Específicamente se presentó una correlación negativa muy significativa entre el grosor y W_pG .

El grupo de trigo fuerte presentó un promedio de rendimiento harinero (RH) superior al del grupo suave. El RH se relacionó con la dureza del grano, la cual en este estudio se evaluó mediante la determinación de la fuerza a la fractura y la fuerza máxima de compresión del grano. En ambos parámetros, el grupo de trigo fuerte presentó valores promedio más altos que los del grupo suave.

Dentro de cada grupo de trigo, la variedad mostró un efecto importante sobre las características fisicoquímicas y reológicas de la harina. En general, los valores promedio de los parámetros evaluados fueron más altos en el grupo fuerte, sin embargo, dentro del grupo suave las variedades presentaron menores diferencias entre sí, en comparación con las del grupo fuerte.

En los granos acondicionados a 16% se observó que en el grupo suave el valor promedio de trabajo elástico (W_eG) fue menor al trabajo plástico (W_pG), mientras que en el grupo de trigo fuerte el valor promedio de W_eG dominó ligeramente al del W_pG .

A partir de la evaluación de las propiedades viscoelásticas de la masa utilizando el método de compresión uniaxial bajo pequeña deformación, se observó que dentro de cada grupo el valor promedio de trabajo plástico de masa (W_pM) fue superior al trabajo elástico (W_eM).

El grupo de trigo suave presentó mayor número de correlaciones entre los diferentes parámetros evaluados en esta investigación. Se observaron correlaciones muy significativas entre las propiedades viscoelásticas del grano acondicionado a 16% y la masa. El parámetro farinográfico tiempo de desarrollo máximo, presentó correlaciones muy significativas con las propiedades viscoelásticas del grano acondicionado y correlaciones significativas con las propiedades viscoelásticas de la masa.

En el grupo de trigo fuerte el contenido de proteína de la harina presentó correlaciones significativas negativas con la fuerza de compresión de la masa ($F_{m\acute{a}x}M$) y W_pM , mientras que el gluten húmedo presentó correlaciones negativas muy significativas con $F_{m\acute{a}x}M$, W_tM y W_pM .

El pan elaborado con harinas del grupo fuerte mostró mejores propiedades viscoelásticas y de textura en comparación con el de harinas del grupo suave. El tiempo de almacenamiento fue el factor que influyó en mayor medida sobre las propiedades viscoelásticas y de textura del pan. La fuerza de compresión máxima ($F_{m\acute{a}x}P$), el trabajo plástico (W_pP), la firmeza (FIR) y la gomosidad (GOM) del pan se incrementó gradualmente con el tiempo de almacenamiento, mostrando una tendencia inversa con el contenido de humedad de la miga y el grado de elasticidad.

A pesar de que el grano, la masa y el pan son productos con estructura y conformación diferentes, los resultados de los parámetros viscoelásticos de cada material evaluados por el método desarrollado fueron bastante reproducibles (coeficientes de variación entre 15% y 30%). Asimismo, el grado de elasticidad (GE) de cada material fue diferente, no siendo comparables entre sí. El pan mostró el mayor GE, seguido del grano y la masa.

A partir de los resultados globales obtenidos de las evaluaciones en grano, masa y pan de esta investigación, se concluyó que el grupo de trigo fuerte mostró mejores características promedio de calidad, aunque las variedades del grupo suave presentaron menores diferencias entre sí. Las variedades fuerte Kronstad y suave Urbina, fueron las que mostraron las mejores características generales de calidad dentro de su respectivo grupo.

RECOMENDACIONES

Evaluar el comportamiento viscoelástico de granos individuales de trigo de una misma variedad y contenido de humedad, utilizando deformaciones entre 3 y 5%, esto para determinar a qué porcentaje de deformación se logra mayor reproducibilidad en los parámetros evaluados.

Aplicar el método de compresión uniaxial bajo pequeña deformación para evaluar las propiedades viscoelásticas de granos de trigo individuales acondicionados en la industria molinera (*in situ*) y acondicionados de acuerdo al método reportado en este estudio.

Comparar, y en su caso correlacionar las propiedades viscoelásticas de granos de trigo evaluadas por el método de compresión uniaxial bajo pequeña deformación, con las características fisicoquímicas de grano y harina evaluadas por métodos rápidos o indirectos basados en transmisión o reflectancia de infrarrojo cercano.

Realizar la preparación de las masas para su evaluación viscoelástica (por los métodos de compresión uniaxial bajo pequeña deformación y dinámico oscilatorio) de acuerdo a lo sugerido en el presente estudio, excepto por el uso de la mezcladora del farinógrafo, considerando para ello otro tipo de amasadora comercial.

Evaluar las propiedades viscoelásticas del pan de acuerdo a lo reportado en esta investigación, realizando una primera medición considerando al menos 12 h de almacenamiento o reposo del producto. Adicionalmente, se recomienda comparar diferentes formulaciones de pan para evaluar el efecto de uno o más ingredientes sobre el comportamiento viscoelástico.

REFERENCIAS

AACC International. (2000). Approved Methods of the AACC. Methods 08-12.01, 10-10.03, 26-50.01, 44-15.02, 38-12.02, 46-13.01, 55-10.01, 56-60.01, 54-21.02, 74-09.01. The Association, St. Paul, MN.

Abang, Z.D.N., Chin, N.L., & Yusof, Y.A. (2010). A Review on rheological properties and measurements of dough and gluten. *Journal of Applied Sciences*, 10(20), 2478-2490.

Abang, Z.D.N., Chin, N.L., Abdul Rahman, R., & Karim, R. (2008). Rheological characterisation of gluten from extensibility measurement. *Journal of Food Engineering*, 86(4), 549-556.

Afkari, S.A.H., & Minaei, S. (2004). Behavior of wheat kernels under quasi-static loading and its relation to grain hardness. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 6(1-2), 11-19.

Altamirano-Fortoul, R., Hernando, I., & Rosell, C.M. (2013). Texture of bread crust: puncturing setting effect and its relationship to microstructure. *Journal of Texture Studies*, 44(2), 85-94.

Anderssen, R.S., & Haraszi, R. (2009). Characterizing and exploiting the rheology of wheat hardness. *European Food Research & Technology*, 229(1), 159-174.

Arnold, P.C., & Mohsenin, N.N. (1971). Proposed techniques for axial compression tests on intact agricultural products of convex shape. *Transactions of ASAE*, 14(1), 78-84.

Arnold, P.C., & Roberts, A.W. (1966). Stress distributions in loaded wheat grains. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 11(1), 38-43.

ASABE Standards. American Society of Agricultural and Biological Engineers. (2009). Compression test of food materials of convex shape. *ASABE S368.4. DEC2000 (R2008)*, 676-686.

ASAE Standards. (1999). Moisture Measurement—Unground Grain and Seeds. ASAE. S352.2.

Aydin, C. (2007). Some engineering properties of peanut and kernel. *Journal of Food Engineering*, 79(3), 810-816.

Baiano, A., Romaniello, R., Lamacchia, C., & La Notte, E. (2009). Physical and mechanical properties of bread loaves produced by incorporation of two types of toasted durum wheat flour. *Journal of Food Engineering*, 95(1), 199-207.

Baik, M.Y., & Chinachoti, P. (2000). Moisture Redistribution and Phase Transitions During Bread Staling. *Cereal Chemistry*, 74(4), 484-488.

Bargale, P.C., & Irudayaraj, J. (1995). Mechanical strength and rheological behaviour of barley kernels. *International Journal of Food Science and Technology*, 30(5), 609-623.

Bargale, P.C., Irudayaraj, J., & Marquis, B. (1995). Studies on rheological behaviour of canola and wheat. *Journal Agricultural Engineering Research*, 61(4), 267-274.

Barnes, H.A. (2000). *A handbook of elementary rheology*. Wales: The University of Wales Institute of Non-Newtonian Fluids.

Bass, E.J. (1998). Wheat flour milling. En Y. Pomeranz (Ed.), *Wheat: Chemistry and Technology*. Vol. II. (pp. 1-25). St. Paul, Minnesota, USA: American Association of Cereal Chemists, Inc.

Bean, S.R., Lyne, R.K., Tilley, K.A., Chung, O.K., & Lookhart, G.L. (1998). A rapid method for quantitation of insoluble polymeric proteins in flour. *Cereal Chemistry*. 75(3), 374-379.

Bekes, F., Gianibelli, M.C., & Wrigley, C. (2004). Grain proteins and flour quality. En C. Wrigley, H. Corke, & C.E. Walker (Eds.), *Encyclopedia of Grain Science*. (pp. 416-423). Elsevier Academic Press.

Belderok, B., Mesdag, H., & Donner, D.A. (2000). *Bread-making quality of wheat. A Century of breeding in Europe*. Netherlands: Springer.

Bordes, J., Branlard, G., Oury, F.X., Charmet, G., & Balfourier, F. (2008). Agronomic characteristics, grain quality and flour rheology of 372 bread wheats in a worldwide core collection. *Journal of Cereal Science*, 48(3), 569-579.

Bourne, M. (2002). *Food texture and viscosity: Concept and measurement*. UK/USA: Academic Press.

Callejo, G.M.J. (2002). *Industrias de Cereales y Derivados*. España: AMV Ediciones y Mundi-Prensa.

Cenkowski, S., Bielewicz, J., & Britton, M.G. (1991). A single kernel creep and recovery test. *Transactions of the ASAE*, 34(6), 2484-2490.

Chua, H.S., Parkinson, G., Haigh A.D., & Gibson, A.A.P. (2007). A method of determining the moisture content of bulk wheat grain. *Journal of Food Engineering*, 78(4), 1155-1158.

Colombo, A., Pérez, G.T., Ribbota, P.D., & León, A.E. (2008). A comparative study of physicochemical tests for quality prediction of Argentine wheat flours used as corrector flours and for cookie production. *Journal of Cereal Science*, 48(3), 775-780.

Cornford, S.J., Axford, W.E., & Elton G.A.H. (1964). The elastic modulus of bread crumb in linear compression in relation to staling. *Cereal Chemistry*, 41, 221-229.

Curic, D., Novotni, D., Skevin, D., Rosell, C.M., Collar, C., Le Bail, A., Colic-Baric, I., & Gabric, D. (2008). Design of a quality index for the objective evaluation of bread quality: Application to wheat breads using selected bake off technology for bread making. *Food Research International*, 41 (7), 714-719.

Delwiche, S.R., Morris, C.F., Mabilie, F., & Abécassis, J. (2012). Influence of instrument rigidity and specimen geometry on calculations of compressive strength properties of wheat endosperm. *Cereal Chemistry*, 89(1), 24-29.

Delwiche, S.R. (2000). Wheat endosperm compressive strength properties as affected by moisture. *Transaction of ASAE*, 43(2), 365-373.

Dexter, J.E., & Sarkar, A.K. (2004). Dry milling. En C. Wrigley, H. Corke, & C.E. Walker (Eds.), *Encyclopedia of Grain Science*. (pp. 363-371). Elsevier Academic Press.

Dobraszczyk, B.J. (2004a). The physics of baking: rheological and polymer molecular structure-function relationships in breadmaking. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 124(1-3), 61-69.

Dobraszczyk, B.J. (2004b). Dough rheology. En C. Wrigley, H. Corke, & C.E. Walker (Eds.), *Encyclopedia of Grain Science*. (pp. 400-415). Elsevier Academic Press.

Dobraszczyk, B.J., & Morgenstern, M.P. (2003). Rheology and the breadmaking process. Review. *Journal of Cereal Science*, 38(3), 229-245.

Dobraszczyk, B.J., Whitworth, M.B., Vincent, J.F.V., & Khan, A.A. (2002). Single kernel wheat hardness and fracture properties in relation to density and the modelling of fracture in wheat endosperm. *Journal of Cereal Science*, 35(3), 245-263.

Dogan, H., & Kokini, J.L. (2007). Rheological properties of foods. En Heldman, R.D. & Lund, B.D. (Ed.). *Handbook of Food Engineering*. USA: CRC Press.

Dowell, F.E., Maghirang, E.B., Pierce, R.O., Lookhart, G.L., Bean, S.R., Xie, F., Caley, M.S., Wilson, J.D., Seabourn, B.W., Ram, M.S., Park, S.H., & Chung, O.K. (2008). Relationship of bread quality to kernel, flour, and dough properties. *Cereal Chemistry*, 85(1), 82-91.

Dubois, M., & Juhué, B. (2000). The importance of experimental milling for determining rheological parameters as measured by the alveograph. *Cereal Foods World*, 45(8), 385-388.

Dziki, D. (2008). The crushing of wheat kernels and its consequence. *Powder Technology*, 185(2), 181-186.

Dziki, D., & Laskowski, J. (2006). Influence of wheat grain mechanical properties on grinding energy requirements. *TEKA Kom. Mot. Energ. Roln.*, 6A, 45-52.

Eckhoff, S.R., Supak, W.A., & Davis, A.B. (1988). A rapid single-kernel wheat hardness tester. *Cereal Chemistry*, 65(6), 503-508.

Elbatawi, I.E., & Arafa, G.K. (2008). Factors affecting breaking force distribution of wheat kernel before milling. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, 25(3), 1004-1025.

El-Porai, E.S., Salama, A.E., Sharaf, A.M., Hegazy, A.I., & Gadalla, M.G.E. (2013). Effect of different processes on Egyptian wheat flour properties and pan bread quality. *Annals of Agricultural Science*, 58(1), 51-59.

Espitia, R.E., Martínez, C.E., Peña, B.R.J., Villaseñor, M.H.E., & Huerta, E.J. (2008). Polimorfismo de gluteninas de alto peso molecular y su relación con trigos harineros para temporal. *Agricultura Técnica en México*, 34(1), 57-67.

Espitia, R.E., Villaseñor, M.H.E., Peña, B.R.J., Huerta, E.J., & Limón, O.A. (2004). Calidad industrial de trigos harineros mexicanos para temporal. II. Variabilidad genética y criterios de selección. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 27(1), 41-47.

Evers, T., & Millar, S. (2002). Cereal grain structure and development: some implications for quality. *Journal of Cereal Science*, 36(3), 261-284.

FAO. (2013). *FAOSTAT*. <http://faostat.fao.org/>

Faubion, J.M., & Hoseney, R.C. (1990). The viscoelastic properties of wheat flour doughs. En H. Faridi & Jon M. Faubion (Eds.), *Dough rheology and baked product texture*. (pp. 29-30). AVI Book.

Figuroa, J.D.C., Hernández, Z.J.E., Rayas-Duarte, P., & Peña, R.J., (2013). Stress relaxation and creep recovery tests performed on wheat kernels versus doughs: Influence of glutenin on rheological and quality properties. *Cereal Food World*, 58(3), 139-144.

Figuroa, J.D.C., Manuel, C.I., Hernández-Estrada, Z.J., & Ramírez-Wong, B. (2012). Stress relaxation of wheat kernels and their relationship with milling, rheological, and breadmaking quality of wheat. *Cereal Chemistry*, 89(4), 211–216.

Figuroa, J.D.C., Hernández, Z. J. E., Véles, M. J. J., Rayas-Duarte, P., Martínez-Flores, H. E., & Ponce-García, N. (2011a). Evaluation of degree of elasticity and other mechanical properties of wheat kernels. *Cereal Chemistry*, 88(1), 12-18.

Figuroa, J.D.C., Ramírez-Wong, B., Peña, J., Khan, K., & Rayas-Duarte, P. (2011b). Potential use of the elastic properties of intact wheat kernels to estimate millings, rheological and breadmaking quality of wheat. En Ravindra N.C & James D. (Eds.), *Wheat science dynamics: Challenges and opportunities*. (pp. 317-325). Agrobios (International).

Figuroa, J.D.C., Maucher, T., Reule, W., & Peña, R.J. (2009). Influence of high molecular weight glutenins on viscoelastic properties of intact wheat kernel and relation to functional properties of wheat dough. *Cereal Chemistry*, 86(2), 139-144.

Gaines, C.S., Frégeau, R.J., Vander, K.C., & Morris, C.F. (2006). Comparison of methods for gluten strength assessment. *Cereal Chemistry*, 83(3), 284-286.

Gámbaro, A., Varela, P., Giménez, A., Aldrovandi, A., Fiszman, S.M., & Hough, G. (2002). Textural quality of White pan bread by sensory and instrumental measurements. *Journal of Texture Studies*, 33(5), 401-413.

Gazza, L., Taddei, F., Corbellini, M., Cacciatori, P., & Pogna, N.E. (2008). Genetic and environmental factors affecting grain texture in common wheat. *Journal of Cereal Science*, 47(1), 52-58.

Gélinas P., & McKinnon, C. (2013). Experiments on dough rheology to improve screening of bread wheat cultivars. *International Journal of Food Science and Technology*, 48(9), 1956-1961.

Gianibelli, M.C., Larroque, O.R., McRitchie, F., & Wrigley, C.W. (2001). Biochemical, genetic, and molecular characterization of wheat endosperm proteins. *Cereal Chemistry*, 78(6), 635-646.

Glenn, G.M., Younce, F.L., & Pitts, M.J. (1991). Fundamental physical properties characterizing the hardness of wheat endosperm. *Journal of Cereal Science*, 13(2), 179-194.

Gorji, A., Rajabipour, A., & Tavakoli, H. (2010). Fracture resistance of wheat grain as a function of moisture content, loading rate and grain orientation. *Australian Journal of Crop Science*, 4(6) 448-452.

Gras, P.W., Anderssen, R.S., Keentok, M., Békés, F., & Apples, R. G. (2001). Gluten protein functionality in wheat flour processing: A review. *Australian Journal of Agricultural Research*, 52(12), 1311-1323.

Gras, P.W., Carpenter, H.C., & Anderssen, R. S. (2000). Modelling the developmental rheology of wheat-flour dough using extension tests. *Journal of Cereal Science*, 31(1), 1-13.

Grefeuille, V., Mabilbe, F., Rousset, M., Oury, F.X., Abecassis, J., & Lullien-Pellerin, V. (2007). Mechanical properties of outer layers from near-isogenic lines of common wheat differing in hardness. *Journal of Cereal Science*, 45(2), 227-235.

Grefeuille, V., Abecassis, J., Rousset, M., Oury, F.X., Faye, A., Bar, L.C., & Lullien-Pellerin, V. (2006). Grain characterization and milling behaviour of near-isogenic lines differing by hardness. *Theoretical Applied Genetics*, 114(1), 1-12.

Grundas, S.T., & Wrigley, C. (2004). Ultrastructure of the grain, flour and dough. En C. Wrigley, H. Corke, & C.E. Walker (Eds.), *Encyclopedia of Grain Science*, (pp. 391-4009). Elsevier Academic Press.

Gubicza, J., Juhász, A., Tasnádi, P., Arató, P., & Vörös, G. (1996). Determination of the hardness and elastic modulus from continuous Vickers indentation testing. *Journal of Materials Science*, 31(12), 3109-3114.

Haddad, Y., Benet, J.C., Delene, J.Y., Mermet, A., & Abecassis, J. (2001). Rheological behaviour of wheat endosperm—proposal for classification based on the rheological characteristics of endosperm test samples. *Journal of Cereal Science*, 34(1), 105-113.

Haddad, Y., Mabilbe, F., Mermet, A., Abecassis, J., & Benet, J.C. (1999). Rheological properties of wheat endosperm with a view on grinding behavior. *Powder Technology*, 105(1-3), 89-94.

- HadiNezhad, M., & Butler, F. (2009). Association of glutenin subunit composition and dough rheological characteristics with cookie baking properties of soft wheat cultivars. *Cereal Chemistry*, 86(3), 339–349.
- Halverson, J., & Zeleny, L. (1988). Criteria of wheat quality. En Y. Pomeranz (Ed.), *Wheat: Chemistry and Technology*. Vol. I. St. Paul, Minnesota, USA: American Association of Cereal Chemists Inc.
- Hernández, Z.J.E. (2013). Modelos de relajación de esfuerzos y creep en grano y masa de trigo, y su relación con sus propiedades viscoelásticas y funcionales. Tesis de Doctorado. México: Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Politécnico Nacional.
- Hernández, Z.J.E., Figueroa, J.D.C., Rayas-Duarte, P., Martínez-Flores, H.E., Arámbula, G.V., Luna, G.B., & Peña, R.J. (2012a). Influence of high and low molecular weight glutenins on stress relaxation of wheat kernels and the relation to sedimentation and rheological properties. *Journal of Cereal Science*, 55(3), 344-350.
- Hernández-Estrada, Z.J., Figueroa, J.D.C., Rayas-Duarte, P., & Peña, R.J., (2012b). Viscoelastic characterization of glutenins in wheat kernels measured by creep tests. *Journal of Food Engineering*, 113(1), 19-26.
- Hoseney, R.C. (1991). *Principios de ciencia y tecnología de los cereales*. España: Acribia.
- Hrusková, M., & Švec, I. (2009). Wheat hardness in relation with other quality factors. *Czech Journal of Food Sciences*, 27(4), 240-248.
- Iuliana, B., Georgeta, S., Violeta, I., & Iuliana, A. (2010). Physicochemical and rheological analysis of flour mill streams. *Cereal Chemistry*, 87(2), 112-117.
- Islas, R.A., McRitchie, F., Gandikota, S., & Hou, G. (2005). Relaciones de la composición proteínica y mediciones reológicas en masa con la calidad panadera de harinas de trigo. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 28(3), 243-251.
- Janssen, A.M., van Vliet, T., & Vereijken, J.M. (1996). Fundamental and empirical rheological behaviour of wheat flour doughs and comparison with bread making performance. *Journal of Cereal Science*, 23 (1), 43–54.
- Jekle, M., & Becker, T. (2013). Wheat dough microstructure: The relation between visual structure and mechanical behavior. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, DOI: 10.1080/10408398.2012.656476

- Kalkan, F., & Kara, M. (2011). Handling, frictional and technological properties of wheat as affected by moisture content and cultivar. *Powder Technology*, 213(1-3), 116-122.
- Kamil, M.M., Ragab, G.H., Hussein, A.M.S., & Ali, H.S. (2011). Chemical, physical and microstructure of some Egyptian wheat varieties. *Journal of Academic Research*, 3(3), 575-581.
- Kang, Y.S., Spillman, C.K., Steele, J.L., & Chung, D. S. (1995). Mechanical properties of wheat. *Transactions of ASAE*, 38(2), 573-578.
- Kaur, A., Singh, N., Ahlawat, A.K., Kaur, S., Singh, A.M., Chauhan, H., & Singh, G.P. (2013). Diversity in grain, flour, dough and gluten properties amongst Indian wheat cultivars varying in high molecular weight subunits (HMW-GS). *Food Research International*, 53(1), 63-72.
- Keetels, C.J.A.M., Visser, K.A., van Vliet, T., Jurgens, A., & Walstra, P. (1996). Structure and mechanics of starch bread. *Journal of Cereal Science*, 24(1), 15-26.
- Khatkar B.S, & Schofield, J.D. (2002). Dynamic rheology of wheat flour dough. II. Assessment of dough strength and bread-making quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 82(8), 823-826.
- Khazaei, J., & Mann, D.D. (2005). Effects of moisture content and number of loadings on force relaxation behaviour of chickpea kernels. *International Agrophysics*, 19, 305-313.
- Khodabakhshian, R., & Emadi, B. (2011). Determination of modulus of elasticity in agricultural seeds on the basis of elasticity theory. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 7(3), 367-373.
- Kihlberg, I., Öström, Å., Johansson, L., & Risvik, E. (2006). Sensory qualities of plain white pan bread: Influence of farming system, year of harvest and baking technique. *Journal of Cereal Science*, 43(1), 15-30.
- Kim, Y.S. & Flores R.A. (1999). Determination of bran contamination in wheat flours using ash content, color, and bran speck counts. *Cereal Chemistry*, 76(6), 957-961.
- Konopka, I., Fornal, L., Abramczyk, D., Rothkaehl, J., & Rotkiewicz, D. (2004). Statistical evaluation of different technological and rheological tests of Polish wheat varieties for bread volume prediction. *International Journal of Food Science and Technology*, 39(1), 11-20.

Ktenioudaki, A., Butler, F., & Gallagher, E. (2010). The effect of different mixing processes on dough extensional rheology and baked attributes. *Journal of the Sciences of Food and Agriculture*, 90(12), 2098-2104.

Lacko-Bartošová, M., & Korczyk-Szabó, J. (2013). Texture analysis of spelt wheat bread. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 2, 2249-2255.

Lillemo, M., Chen, F., Xia, X., William, M., Peña, R.J., Trethowan, R., & He, Z. (2006). Puroindoline grain hardness alleles in CIMMYT bread wheat germplasm. *Journal of Cereal Science*, 44(1), 86-92.

Lookhart, G.L. (1991). Cereal proteins: Composition of their major fractions and methods for identification. En K.J. Lorenz & K. Kulp (Eds.), *Handbook of cereal science and technology*. (pp. 441-468). USA: Marcel Dekker.

Mabille, F., & Abecassis, J. (2003). Parametric modelling of wheat grain morphology: A new perspective. *Journal of Cereal Science*, 37(1), 43-53.

MacRitchie, F. (2014). Requirements for a test to evaluate bread-making performance. *Journal of Cereal Science*, 59(1), 1-2.

Magaña, B.E., Ramírez, W.B., Torres, C.P.I., Sánchez, M.D.I., & López, C.J. (2011). Efecto del contenido de proteína, grasa y levadura en las propiedades viscoelásticas de la masa y calidad de pan tipo francés. *Interciencia*, 36(4), 248-255.

Magaña-Barajas, E., Ramírez, W.B., Platt-Lucero, L.C., López-Ahumada, G.A., Torres, P.I., & Sánchez-Machado, D.I. (2009). Caracterización viscoelástica de masas de variedades de trigos suaves. *Revista Tecnología Ciencia y Educación (IMIQ)*, 24(1), 12-22.

Mailhot, W.C., & Patton, J.C. (1998). Criteria of flour quality. En Y. Pomeranz (Ed.), *Wheat: Chemistry and Technology*. Vol. II. (pp. 69-72). St. Paul, Minnesota, USA: American Association of Cereal Chemists Inc.

Maldo, P.A., & Conti-Silva, A.C. (2014). Texture profile and correlation between sensory and instrumental analyses on extruded snacks. *Journal of Food Engineering*, 121(1), 9-14.

Mallick, S.A., Azas, K., Gupta, M., Sharma, V., & Sinha, B.K. (2013). Characterization of grain nutritional quality in wheat. *Indian Journal of Plant Physiology*, 18(2), 183-186.

Martínez-Cruz, E., Espitia-Rangel, E., Villaseñor-Mir, H.E., Molina-Galán, J.D., Benítez-Riquelme, I., Santacruz-Varela, A., & Peña-Bautista, R.J. (2010). Diversidad genética de gluteninas y gliadinas en trigos harineros (*Triticum aestivum* L.) mexicanos. *Agrociencia*, 44(2), 187-195.

Marzec, A., Cacak-Pietrzak, G., & Gondek, E. (2011). Mechanical and acoustic properties of spring wheat versus its technological quality factors. *Journal of Texture Studies*, 42(4), 319-329.

Maucher, T., Figueroa, J.D.C., Reule, W., & Peña, R.J. (2009). Influence of low molecular weight glutenins on viscoelastic properties of intact wheat kernels and their relation to functional properties of wheat dough. *Cereal Chemistry*, 86(4), 372-375.

McIntosh, R.A. (2004). Wheat. Genetics. En C. Wrigley, H. Corke, & C.E. Walker (Eds.), *Encyclopedia of Grain Science*. (pp. 323-329). Elsevier Academic Press.

Menjivar, J.A. (1990). Fundamental aspects of dough rheology. En H. Faridi & Jon M. Faubion (Eds.), *Dough rheology and baked product texture*. (pp. 1-9). AVI Book.

Migliori, M., & Corraera, S. (2013). Modelling of dough formation process and structure evolution during farinograph test. *International Journal of Food Science and Technology*, 48(1), 121-127.

Mohsenin, N.N. (1986). *Physical Properties of Plant and Animal Materials. Structure, Physical Characteristics and Mechanical Properties*. USA: Science Publishers, Inc.

Molenda, M., & Horabik, J. (2005). Characterization of mechanical properties of particulate solids for storage and handling. En Józef Horabik & Janusz Laskowski (Eds.), *Mechanical properties of granular agro-materials and food powders for industrial practice*. (pp. 43-55). Institute of Agrophysics PAS.

Mondal, A., & Datta, A.K. (2008). Bread baking – A review. *Journal of Food Engineering*, 86(4), 465-474.

Morris, C.F., Delwiche, S.R., Bettge, A.D., Mabilie, F., Abécassis, J., Pitts, M.J., Dowell, F.E., Deroo, C., & Pearson, T. (2011). Collaborative analysis of wheat endosperm compressive material properties. *Cereal Chemistry*, 88(4), 391-396.

Morris, C.F., Pitts, M.J., Bettge, A.D., Pecka, K., King, G.E., & McCluskey, P.J. (2008). Compressive strength of wheat endosperm: Analysis of endosperm bricks. *Cereal Chemistry*, 85(3), 351-358.

Morris C.F. (2002). Puroindolines: the molecular genetic basis of wheat grain hardness. *Plant Molecular Biology*, 48(5-6), 633-647.

Nielsen, J.P., Pedersen, D.K., & Munck, L. (2003). Development of nondestructive screening methods for single kernel characterization of wheat. *Cereal Chemistry*, 80(3), 274-280.

NMX-FF-036-1996. PRODUCTOS ALIMENTICIOS NO INDUSTRIALIZADOS. CEREALES. TRIGO. (*TRITICUM AESTIVUM* L Y *TRITICUM DURUM* DESF.). ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE PRUEBA. NON INDUSTRIALIZED FOOD PRODUCTS. CEREAL. WHEAT. (*TRITICUM AESTIVUM* L. Y *TRITICUM DURUM* DESF.). SPECIFICATIONS AND TEST METHODS. NORMAS MEXICANAS. DIRECCIÓN GENERAL DE NORMAS.

NORMA Oficial Mexicana NOM-147-SSA-1996, Bienes y Servicios. Cereales y sus productos. Harinas de cereales, sémolas o semolinas. Alimentos a base de cereales, de semillas comestibles, harinas, sémolas o semolinas y sus mezclas. Productos de panificación. Disposiciones y especificaciones sanitarias y nutrimentales.

Núñez, S.M.C., Méndez, M.M.C., & Solorza, F.J. (2001). *Principios de Reología*. México: IPN.

O'Brien, C.M., Mueller, A., Scannell A.G.M., & Arendt, E.K. (2003). Evaluation of the effects of fat replacers on the quality of wheat bread. *Journal of Food Engineering*, 56 (2-3), 265-267.

Ohm, J.B., Chung, O.K., & Deyoe, C.W. (1998). Single-Kernel characteristics of hard winter wheats in relation to milling and baking quality. *Cereal Chemistry*, 75(1), 156-161.

Orth, R.A. & Shellenberger, J.A. (1988). Origin, production, and utilization of wheat. En Y. Pomeranz (Ed.), *Wheat: Chemistry and Technology*. Vol. I. (pp. 3-4). St. Paul, Minnesota, USA: American Association of Cereal Chemists, Inc.

Osborne, B.G., Henry, R.J., & Southan, M.D. (2007). Assessment of commercial milling potential of hard wheat by measurement of the rheological properties of whole grain. *Journal of Cereal Science*, 45(2), 122-127.

Osella, C.A., Robutti, J., Sánchez, H.D., Borrás, F., & de la Torre, M.A. (2008). Dough properties related to baking quality using principal component analysis. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 6(2), 95-100.

- Patel, B.K., Waniska, R.D., & Seetharaman, K. (2005). Impact of different baking processes on bread firmness and starch properties in breadcrumb. *Journal of Cereal Science*, 42 (2) 173–184.
- Paulsen, G.M. & Shroyer, J.P. (2004). Agronomy. En C. Wrigley, H. Corke, & C.E. Walker (Eds.), *Encyclopedia of Grain Science*. (pp. 337-347). Elsevier Academic Press.
- Pauly, A., Pareyt, B., Fierens, E., & Delcour, J.A. (2013). Wheat (*Triticum aestivum* L. and *T. turgidum* L. ssp. *durum*) kernel hardness: II. Implications for end-product quality and role of puroindolines therein. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 12(4), 427-438.
- Peña, B.R.J., Pérez, H.P., Villaseñor, M.E., Gómez, V.M.M., & Mendoza, L.M.A. (2008). *Calidad de la cosecha de trigo en México. Ciclo primavera-verano 2006*. Publicación Especial del CONASIST-CONATRIGO:Mexico.
- Peyron, S., Chaury, M., Rouau, X., & Abecassis, J. (2002). Relationship between bran mechanical properties and milling behavior of durum wheat. Influence of tissue thickness and cell wall structure. *Journal of Cereal Science*, 36(3), 377-386.
- Ponce-García, N., Figueroa, J.D.C., López-Huape, G.A., Martínez, H.E., & Martínez-Peniche, R. (2008). Study of viscoelastic properties of wheat kernels using compression load method. *Cereal Chemistry*, 85(5), 667-672.
- Ponzio, N.R., Puppo, M.C., & Ferrero, C. (2008). Mixtures of two Argentinean wheat cultivars of different quality: A study on breadmaking performance. *Cereal Chemistry*, 85(5), 579-585.
- Posner, E.S., & Hibbs, A.N. (1999). *Wheat Flour Milling*. (2a. Ed.). St. Paul Minnesota, USA: American Association of Cereal Chemists, Inc.
- Prabhasankar, P., Sudha, M.L., & Haridas, R. P. (2000). Quality characteristics of wheat flour milled streams. *Food Research International*, 33(5), 381-386.
- Primo-Martín, C., van Nieuwenhuijzen, N.H., Hamer, R.J., & van Vliet T. (2007). Crystallinity changes in wheat starch during the bread-making process: Starch crystallinity in the bread crust. *Journal of Cereal Science*, 45(2), 219-226.
- Primo-Martín, C., van de Pijpekamp, A., van Vliet T., de Jongh, H.H.J., Plijter, J.J., & Hamer, R.J. (2006). The role of the gluten network in the crispness of bread crust. *Journal of Cereal Science*, 43(3), 342-352.

Raji, A.O., & Favier, J.F. (2004). Model for the deformation in agricultural and food particulate materials under bulk compressive loading using discrete element method. I: Theory, model development and validation. *Journal of Food Engineering*, 64(3), 359-371.

Rakszegi, M., Bognár, Z., Li, Z., Békés, F., Láng, L., & Bedó, Z. (2010). Effect of milling on the starch properties of winter wheat genotypes. *Starch/Stärke*, 62 (2), 115–122.

Rao, M.V.N., Quintero, X., (2005). Rheological properties of solid foods. En M.A. Rao, S.S.H. Rizvi, A.K. Datta. (Eds.), *Engineering properties of foods*. Taylor & Francis, Boca Ratón, FL, USA.

Różyło, R., & Laskowski, J. (2011). Predicting bread quality (bread loaf volume and crumb texture). *Polish Journal of Food and Nutrition Science*, 61(1), 61-67.

SAGARPA. CIMMYT. Subsecretaría de Agricultura. Dirección General de Fomento a la Agricultura. Dirección de Granos Básicos y Oleaginosas (2013). *Diagnóstico Trigo 2012. 8º Simposium Internacional de Trigo*. <http://www.slideshare.net/CIMMYT/diagnostico-trigo-2013>

SAGARPA. SIAP. (2012). *Cierre de la producción agrícola por cultivo 2012*. <http://www.siap.gob.mx>

Samson, M.F., Mabilie, F., Chéret, R., Abécassis, J., & Morel, M.H. (2005). Mechanical and physicochemical characterization of vitreous and mealy durum wheat endosperm. *Cereal Chemistry*, 82(1), 81-87.

Satorre, H.E., Benech, A.R.L., Slafer, G.A., de la Fuente, E.B., Miralles, D.J., Otegui, M.E., & Savin, R. (2004). *Producción de Granos. Bases funcionales para su manejo*. Argentina: Editorial Facultad de Agronomía.

Serna, S.S.R.O. (2009). *Química, Almacenamiento e Industrialización de los Cereales*. México: AGT Editor, S.A.

Serna, S.S.R.O. (2003). *Manufactura y Control de Calidad de Productos Basados en Cereales*. México: AGT Editor, S.A.

Shelef, L., & Mohsenin, N.N. (1967). Evaluation of the modulus of elasticity of wheat grain. *Cereal Chemistry*, 44, 392-402.

Shewry, P.R., Hawkesford, M.J., Piironen, V., Lampi, A., Gebruers, K., Boros, D., Andersson, M.A.A., Åman, P., Rakszegi, M., Bedo, Z., & Ward, J.L. (2013). Natural variation in grain composition of wheat and related cereals. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(35), 8295–8303.

Shewry, P.R. (2009). Wheat. *Journal of Experimental Botany*, 60(6), 1537-1553.

Shewry, P.R., & Halford, N.G. (2002). Cereal seed storage proteins: structures, properties and role in grain utilization. *Journal of Experimental Botany*, 53(370), 947-958.

Singh, S.S., Finner, M.F., Rohatgi, P.K., Buelow, F.H., & Schaller, M. (1991). Structural and mechanical properties of corn kernels: a hybrid composite material. *Journal of Materials Science*, 26, 274-284.

Sommier, A., Chiron, H., Colonna, P., Della Valle, G., & Rouillé, J. (2005). An instrumented pilot scale oven for the study of French bread baking. *Journal of Food Engineering*, 69 (1), 97–106.

Southan, M., & MacRitchie, F. (1999). Molecular weight distribution of wheat proteins. Review. *Cereal Chemistry*, 76(6), 827-836.

Šramková, Z., Gregová, E., & Šturdík, E. (2009). Chemical composition and nutritional quality of wheat grain. *Acta Chimica Slovaca*, 2(1), 115–138.

Steffe, F.J. (1996). *Rheological Methods in Food Process Engineering*. USA: Freeman Press.

Stojceska, V., Butler, F., Gallagher, E., & Keehan, D. (2007). A comparison of the ability of several small and large deformation rheological measurements of wheat dough to predict baking behavior. *Journal of Food Engineering*, 83(4), 475–482.

Tester, R.F., Karkalas, J., & Qi, X. (2004). Starch—composition, fine structure and architecture. Review. *Journal of Cereal Science*, 39(2), 151–165.

Topin, V., Radjai, F., Delene, J.Y., & Mabilbe, F. (2009). Mechanical modeling of wheat hardness and fragmentation. *Powder Technology*, 190(1-2), 215-220.

Uhlen, A-K., Sahlström, S., Magnus, E.M., Færgestad, E.M., Dieseth, J.A., & Ringlund, K. (2004). Influence of genotype and protein content on the baking quality of hearth bread. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84(8), 887-894.

Van Der Borgh, A., Goesaert, H., Veraverbeke, W.S., & Delcour, J.A. (2005). Fractionation of wheat and wheat flour into starch and gluten: overview of the main processes and the factors involved. Review. *Journal of Cereal Science*, 41(3), 221–237.

Véha, A. (2007). Correlation between the kernel structure and the quality parameters on some hungarian winter wheat varieties. *Cereal Research Communications*, 35(2), 1289-1292.

Veraverbeke, W.S. & Delcour, J.A. (2002). Wheat protein composition and properties of wheat glutenin in relation to breadmaking functionality. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 42(3), 179–208.

Vergnes, B., Della, V.G., & Colonna, P. (2003). Rheological properties of biopolymers and applications to cereal processing. En K. Gönül & K.J. Breslauer (Eds.). *Characterization of cereals and flours*. Part II. Mechanical Properties. Chapter 7. (pp. 209-266).

Voicu, G., Constantin, G., Stefan, E.M., & Ipate, G. (2012). Variation of farinographic parameters of doughs obtained from wheat and rye flour mixtures during kneading. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, 74(2), 307-320.

Waananen, K.M., & Okos, M.R. (1992). Stress-relaxation properties of yellow-dent corn kernels under uniaxial loading. *Transactions of the ASAE*, 35(5), 1249-1258.

Wang, L., & Jeronimidis, G. (2008). Investigation of the fracture mode for hard and soft wheat endosperm using the loading–unloading bending test. *Journal of Cereal Science*, 48(1), 193-202.

Wrigley, C., Asenstorfer, R., Batey, I., Cornish, G., Day, L., Mares, D., & Mrva, K. (2009). The biochemical molecular basis of wheat quality. En B.F. Carver (Ed.). *Wheat Science and Trade*. Section IV. Making of a wheat industry, Chapter 21. (pp. 495-520). Wiley-Blackwell.

Xie, F., Dowell, F.E., & Sun, X.S. (2003). Comparison of Near-Infrared Reflectance Spectroscopy and texture analyzer for measuring wheat bread changes in storage. *Cereal Chemistry*, 80(1), 25-29.

Zghal, M.C., Scanlon, M.G., & Sapirstein, H.D. (2002). Structure of bread crumb and its influence on mechanical properties. *Journal of Cereal Science*, 36(2), 167-176.

Zhao, D., Mulvaney, S., Chinnaswamy, R., Rayas-Duarte, P., Allvin, B., & Wang, M. (2010). Elastic properties of gluten representing different wheat classes. *Journal of Cereal Science*, 52(3), 432-437.

ANEXO 1

Artículo Publicado

Effect of Moisture Content on the Viscoelastic Properties of Individual Wheat Kernels Evaluated by the Uniaxial Compression Test Under Small Strain

Néstor Ponce-García,¹ Benjamín Ramírez-Wong,^{1,2} Patricia Isabel Torres-Chávez,¹ Juan de Dios Figueroa-Cárdenas,³
Sergio Othón Serna-Saldívar,⁴ and Mario Onofre Cortez-Rocha¹

ABSTRACT

Cereal Chem. 90(6):558–563

Wheat product quality is related to its physicochemical properties and to the viscoelastic properties of the kernel. The aim of this work was to evaluate the viscoelastic properties of individual wheat kernels using the uniaxial compression test under small strain (3%) to create experimental conditions that allow the use of the elasticity theory to explain the wheat kernel viscoelasticity and its relationships to physicochemical characteristics, such as weight tests, size, and ash and protein contents. The following viscoelastic properties of the kernels of hard and soft wheat cultivars at two different moisture contents (original and tempered at 15%) were evaluated: total work (W_t), elastic work (W_e), plastic work (W_p), and modulus of elasticity (E). There was a significant decrease in W_t as the mois-

ture content increased. In the soft wheat Saturno, W_t decreased 80% (from 0.217 to 0.044 N-mm) as the moisture content increased. Individual wheat kernels at their original moisture content showed higher W_t than under the tempered condition. W_p increased as the moisture content increased. E decreased as the moisture content increased. The soft wheat Saturno showed the highest decline (54.9%) in E (from 14.18 to 6.39 MPa) as the moisture content increased. There were significant negative relationships between the viscoelastic properties and the 1,000-kernel weight and kernel thickness. The uniaxial compression test under small strain can be applied to evaluate the viscoelastic properties of individual wheat kernels from different classes and cultivars.

The viscoelastic properties of individual wheat kernels should be considered relevant because of the important technological implications; however, they have not been investigated extensively. In individual wheat kernels, the viscoelastic properties have been studied in two ways: in the cut or shaped form and in the whole kernel. Both geometries have advantages and disadvantages.

In the cut or shaped forms, the geometry is uniform compared with that of the whole kernel. However, the characteristics of the individual kernels within the sample are lost. Several studies have used this focus, with the authors reporting interesting findings about the texture and rheological properties of cylindrical, cubic, parallelepiped, and brick endosperm specimens in compression tests (Glenn et al 1991; Kang et al 1995; Haddad et al 1999, 2001; Delwiche 2000; Dobraszczyk et al 2002; Samson et al 2005; Wang and Jeronimidis 2008; Morris et al 2011; Delwiche et al 2012).

The advantage of evaluating the whole wheat kernel is that the properties are not modified, and a disadvantage is that its geometry is irregular. Some studies (Arnold and Roberts 1966; Arnold and Mohsenin 1971; Bargale et al 1995) have been performed with different techniques to evaluate the mechanical properties of individual wheat kernels. Ponce-García et al (2008) reported a method to evaluate the viscoelastic properties of individual wheat kernels that may increase the efficiency of grain selection for processing, marketing and end use. This method consists of the compression of 0.5 mm (approximately 15% strain) on individual kernels. This methodology opens an alternative in the study of viscoelastic properties and could be a promising tool for the indirect measurement of wheat properties. Other studies that used compression tests (Shelef and Mohsenin 1967; Afkari and Minaei

2004; Figueroa et al 2009; Hernández et al 2012) have determined the rheological properties of individual wheat kernels, emphasizing among other parameters the modulus of elasticity (E).

In the study of the mechanical properties of whole biological materials, the compression test provides an objective method for determining those properties, and they are significant in quality evaluations. Compression tests may vary in their conditions, such as the crosshead speed and strain. Most biological materials exhibit nonlinear viscoelasticity behavior at larger (e.g., 5% strain or greater) deformations (ASABE Standards 2009). To work in the linear viscoelasticity region, the strain applied to the biological material should be as low as possible.

The rheological behavior of individual wheat kernels can be understood with elasticity theory when the applied strain is sufficiently small and the speed rate is at its minimum in order to consider elastic or recoverable deformation before the load curve deviates from the initial straight-line portion (Mohsenin 1978). Under these conditions, Hooke's law and Newton's viscosity law can be applied.

However, the moisture content, which has been studied by some researchers, is the most important factor affecting the rheological behavior of wheat kernels. Bargale et al (1995) reported that an increase in moisture content resulted in a decrease in the stress relaxation time. Edwards et al (2007) demonstrated that conditioning hard and soft wheat cultivars resulted in a reduction in the shell stiffness and strength as well as the endosperm strength. Figueroa et al (2011) found that the kernel strength properties decreased with increasing moisture content. Some authors emphasized the effect of the moisture content on the rheological properties of wheat endosperm (Delwiche 2000). However, few studies have reported the rheological properties of individual wheat kernels with different moisture contents evaluated under small strain (<5%).

There are important physical and chemical properties of wheat kernels that allow their quality and end uses to be determined. Properties such as shape, density, size, 1,000-kernel weight, and apparent density or hectoliter weight are considered relevant for wheat quality. Cereal scientists generally agree that protein content, protein quality (to form gluten and determine the viscoelastic properties of dough), and kernel hardness are three key parameters highly relevant to wheat quality (Afkari and Minaei 2004).

The aim of this work was to evaluate the kernel viscoelastic behavior of individual wheat kernels at two different moisture contents through the uniaxial compression test under small strain

¹ Programa de Doctorado en Ciencias de los Alimentos, Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Donaldo Colosio esq. Reforma, Edif. 5P, Col. Centro, C.P. 83000, Hermosillo, Sonora, México.

² Corresponding author. Phone/Fax: +52 (662) 259 22 07. E-mail: bramirez@guaymas.uson.mx

³ Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV-IPN), Laboratorio Norponiente 2000, Fracc. Real de Juriquilla, Querétaro, C.P. 76230, Qro., México.

⁴ Departamento de Biotecnología e Ingeniería de Alimentos, Centro de Biotecnología, Tecnológico de Monterrey, Av. Eugenio Garza Sada 2501 Sur, C.P. 64849, Monterrey, N.L., México.

http://dx.doi.org/10.1094/CHEM-12-12-0168-R
© 2013 AACC International, Inc.

0.05 and $P < 0.01$, respectively. The statistical analysis was performed with Statistical Analytical Software, version 9.1.3 (SAS Institute, Cary, NC, U.S.A.).

RESULTS AND DISCUSSION

Wheat Kernel Physical Properties

The ANOVA showed that class (soft or hard) and wheat cultivar differed highly significantly ($P < 0.01$) with respect to their grain physical properties. The mean values for the physical properties are presented in Table I. The size and shape of individual grains and the uniformity of their morphology are important during processing (Evers and Millar 2002). There were no significant differences ($P > 0.05$) in the kernel width among all cultivars, except for the hard or bread wheat Kronstad, which was slightly lower (3.24 mm). The kernel length ranged between 6.45 and 7.45 mm among the different cultivars.

Kalkan and Kara (2011) published similar values for the length but lower values for the width and thickness. These values ranged from 3.02 to 3.37 mm. According to Elbatawi and Arafa (2008), the softness or hardness of wheat grain is greatly associated with the thickness, and these values can change because of differences in the moisture content.

The ANOVA showed that the class and wheat cultivar highly significantly affected ($P < 0.01$) the test weight (kg/hL) and 1,000-kernel weight. The hectoliter weight ranged from 70.48 to 75.01 kg/hL (Table I). Hard wheat cultivars had values higher

than the soft wheat cultivars. For Mexican wheat cultivars, Peña et al (2008) reported results similar to the values reported herein. Regarding the 1,000-kernel weight, the highest values were for soft wheat cultivars (49.45–52.48 g/1,000 kernels). The results were similar to those reported by Hrušková and Švec (2009), Kalkan and Kara (2011), and Marzec et al (2011). Mabile and Abecassis (2003) suggested that the grain morphology is essential for calculating the milling yield. The test weight is influenced by the kernel morphology.

Wheat Kernel Chemical Properties

The ANOVA showed that the initial moisture content varied highly significantly ($P < 0.01$) between wheat cultivar and class. The mean values of the chemical properties are presented in Table II. The moisture content for all cultivars ranged from 9.1 to 10.1%, values that are considered acceptable for wheat kernels.

The average protein content (12.46% db) in the hard wheat cultivars was slightly higher than the soft wheat counterparts (12.32% db). The protein contents of these materials were similar to those reported by Peña et al (2008) for Mexican wheat cultivars.

TABLE II
Mean Values of the Chemical Properties of the Wheat Kernel^a

Wheat Class/Cultivar	Content (%)		
	Moisture	Ash ^b	Protein ^b
Soft			
Bárcenas	9.4 ± 0.20cde	1.76 ± 0.02b	10.65 ± 0.07d
Cortazar	9.7 ± 0.15abc	1.78 ± 0.01b	12.75 ± 0.07b
Saturno	10.1 ± 0.15a	1.64 ± 0.01c	12.40 ± 0.00b
Urbina	9.8 ± 0.17ab	1.96 ± 0.02a	13.50 ± 0.14a
Hard			
Tacupeto	9.3 ± 0.05de	1.57 ± 0.01d	11.65 ± 0.07c
Kronstad	9.4 ± 0.05cde	1.61 ± 0.01cd	12.70 ± 0.14b
Nana	9.1 ± 0.05e	1.38 ± 0.01e	12.85 ± 0.07b
Norteña	9.7 ± 0.10cd	1.36 ± 0.01e	12.65 ± 0.21b

^a Values ± standard deviation. Within a column, values with different letters are significantly different ($P < 0.05$).

^b Measured as dry basis (%db).

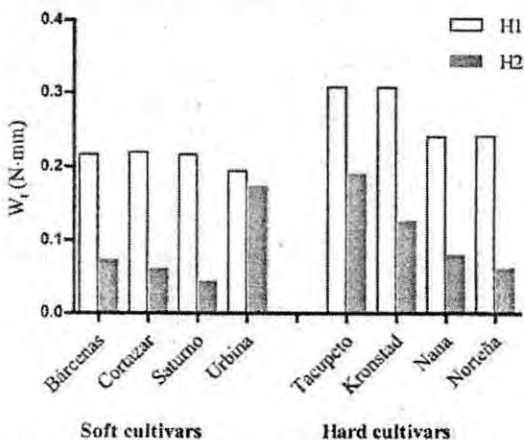


Fig. 1. Effect of the moisture content on the total work (W_t) of soft and hard wheat kernels. H1 and H2 are the original and 15% moisture contents, respectively.

TABLE III
Mean Values of the Viscoelastic Properties of the Wheat Kernel at the Original and Tempering Moisture Contents^a

Wheat Class/Cultivar	Moisture Content (%)	W_t (N·mm)	W_e (N·mm)	W_p (N·mm)	E (MPa)
Soft					
Bárcenas	9.4	0.217 ± 0.06	0.135 ± 0.05	0.082 ± 0.01	16.41 ± 4.43
	15	0.074 ± 0.01	0.030 ± 0.00	0.044 ± 0.00	9.30 ± 2.06
Cortazar	9.7	0.220 ± 0.07	0.134 ± 0.05	0.085 ± 0.02	12.76 ± 2.18
	15	0.062 ± 0.01	0.027 ± 0.00	0.035 ± 0.00	12.04 ± 3.96
Saturno	10.1	0.217 ± 0.05	0.136 ± 0.04	0.081 ± 0.02	14.18 ± 2.36
	15	0.044 ± 0.00	0.016 ± 0.00	0.027 ± 0.00	6.39 ± 1.55
Urbina	9.8	0.194 ± 0.06	0.125 ± 0.05	0.068 ± 0.01	16.84 ± 3.78
	15	0.174 ± 0.04	0.093 ± 0.02	0.080 ± 0.02	21.33 ± 4.28
Hard					
Tacupeto	9.3	0.308 ± 0.06	0.220 ± 0.05	0.088 ± 0.01	21.75 ± 3.00
	15	0.191 ± 0.05	0.116 ± 0.04	0.075 ± 0.01	27.03 ± 4.29
Kronstad	9.4	0.308 ± 0.07	0.215 ± 0.06	0.093 ± 0.01	23.32 ± 4.97
	15	0.127 ± 0.03	0.072 ± 0.02	0.055 ± 0.01	25.14 ± 6.01
Nana	9.1	0.241 ± 0.06	0.160 ± 0.04	0.081 ± 0.01	15.55 ± 2.48
	15	0.081 ± 0.02	0.039 ± 0.01	0.042 ± 0.01	13.54 ± 4.07
Norteña	9.7	0.242 ± 0.07	0.157 ± 0.05	0.085 ± 0.02	17.17 ± 2.36
	15	0.063 ± 0.02	0.024 ± 0.00	0.038 ± 0.01	8.32 ± 1.34

^a Values ± standard deviation. W_t = total work; W_e = elastic work or recoverable work; W_p = plastic work or dissipated work; and E = modulus of elasticity.

The ash content in this study (Table II) agreed with those reported by other authors (Anderssen and Haraszi 2009; Hrušková and Švec 2009; Marzec et al 2011) for both wheat classes.

Wheat Kernel Viscoelastic Properties

The effect of the moisture content on the viscoelastic properties of the wheat kernel was evaluated through the uniaxial compression test performed at small deformation. The properties evaluated were W_e , W_p , W_t , and E .

According to the ANOVA performed for W_t , wheat class, cultivar, moisture content, and cultivar \times moisture interaction had highly significant effects ($P < 0.01$). The mean values of W_t (Table III, Fig. 1) showed a significant decrease as the wheat kernel moisture content increased.

Figure 2 presents a typical curve of the force offset in the soft and hard wheat kernel cultivars at two different moisture contents. Interestingly, the Saturno soft wheat W_t value decreased approximately 80% (from 0.217 to 0.044 N-mm) because of the increase of 4.9% in the moisture content (from 10.1 to 15%).

The Nana hard wheat showed a similar trend. This particular genotype decreased its W_t value by 66% because of an increase of 5.9% moisture. This behavior is in agreement with the study of Figueroa et al (2011), who also found a significant reduction in the W_t values. However, the Urbina soft wheat showed a minimum decrease of W_t (10%), even though the tempered sample contained 5.2% more moisture. The effect caused by the increase in the kernel moisture content (Fig. 2) not only reduced W_t but also increased W_p . Conversely, kernels with lower or original moisture contents had higher W_e values.

The ANOVA showed that the wheat class, wheat cultivar, moisture content, and cultivar \times moisture interaction affected W_e and W_p highly significantly ($P < 0.01$). The greatest effect was owing to the moisture content. Table III shows that at the original moisture content, the prevailing relationship was $W_e > W_p$, but that the relationship was reversed when the moisture content was increased to 15%. For example, the Saturno soft wheat, with an original moisture content of 10.1%, presented a relationship of $W_e > W_p$ (0.136 > 0.081 N-mm). However, the same wheat tempered to 15% moisture had significantly lower W_t values, and the

relationship reversed to $W_e < W_p$ (0.016 < 0.027 N-mm). A similar behavior occurred for the soft wheats Bárcenas and Cortazar and for the hard wheats Norteña and Nana. The lower W_t values were attributed to the higher levels of grain moisture; thus, elasticity decreased and viscosity increased. Moreover, the higher levels of moisture caused plasticization and changed the viscoelastic properties (Bargale et al 1995). However, W_t remained higher than W_p for the tempered soft wheat Urbina and the hard wheats Tacupeto and Kronstad, which was likely because of the grain physical properties of these genotypes (Fig. 3).

Figueroa et al (2011) studied the behavior of W_e , W_p , and W_t in soft wheat with a 13% moisture content through uniaxial compression tests at four different strains (6.8, 13.5, 16.9, and 20.3%). The authors reported values of those parameters higher than those reported in this study. W_e , W_p , and W_t differed from our results because of differences in the strain and grain moisture content.

The ANOVA performed on the elasticity modulus (E) showed that wheat class, cultivar, moisture content, and the interaction of cultivar \times moisture content highly significantly ($P < 0.01$) affected this rheological parameter. Wheat class affected most E values. Table III and Figure 4 show that for most cultivars, E decreased as the grain moisture content increased, which agrees with the hypothesis that the energy absorption capacity of the tempered kernels is higher than their counterparts with a lower moisture content (Gorji et al 2010).

The Saturno soft wheat presented the most significant decrease in E (54.9%), from 14.18 to 6.39 MPa, because of the grain moisture change from 10.1 to 15%. Similarly, the E value for the Norteña hard wheat decreased 51.5% (from 17.17 to 8.32 MPa) when the moisture content increased from 9.7 to 15%. The Urbina soft wheat and the Kronstad and Tacupeto hard wheats showed the opposite of the expected behavior, as their respective modulus values increased slightly because of the higher grain moisture content. In previous studies, some authors (Shelef and Mohsenin 1967; Bargale et al 1995; Figueroa et al 2011; Hernández et al 2012) reported higher values for the modulus of elasticity than those in our study. The difference is attributable to the strain range and kernel moisture contents. Morris et al (2008) concluded that the elastic modulus reflected the differences in material prop-

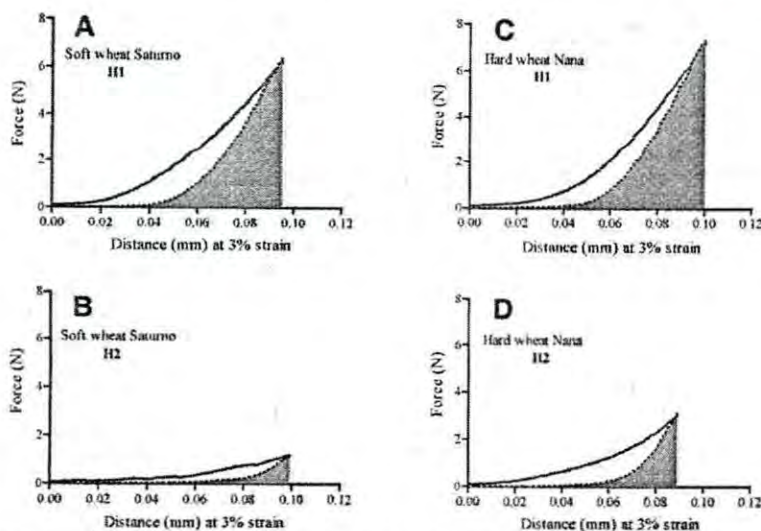


Fig. 2. Force curve shift in Saturno soft wheat kernels (A–B) and Nana hard wheat kernels (C–D) at the original (H1) and 15% (H2) moisture contents. Solid lines indicate the load; dotted lines represent the discharge; gray areas are the elastic work; and white areas represent the plastic work.

erties; therefore, diverse wheat plants had different values for the modulus of elasticity.

Simple Correlations

The relationships between the physical and viscoelastic properties of wheat kernels are presented in Table IV. There were some

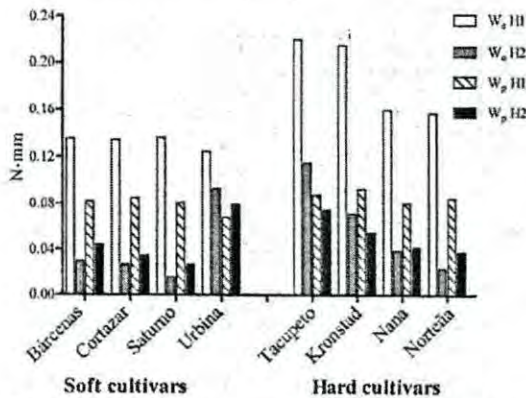


Fig. 3. Effect of the moisture content on the elastic work (W_e) and plastic work (W_p) in the wheat kernels at the original (H1) and 15% (H2) moisture contents.

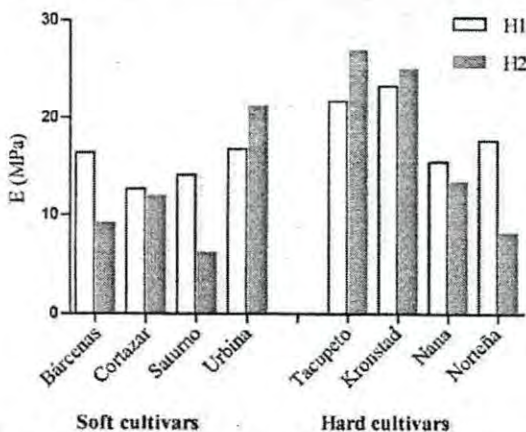


Fig. 4. Effect of the moisture content on the modulus of elasticity (E) of the wheat kernels. H1 and H2 represent the original and 15% moisture contents, respectively.

TABLE IV
Simple Correlation Coefficients (r) Among the Viscoelastic and Physical Properties of the Wheat Kernel

Viscoelastic Property*	Physical Property [†]			
	Kernel Weight	Thickness	Width	Length
W_t	-0.794*	-0.824*	ns	-0.778*
W_e	-0.783*	-0.784*	ns	-0.767*
W_p	ns	-0.841**	-0.716*	ns
E	-0.776*	ns	ns	-0.829*

* and ** = significant at $P < 0.05$ and 0.01 , respectively; ns = nonsignificant.
[†] W_t = total work; W_e = elastic work or recoverable work; W_p = plastic work or dissipated work; and E = modulus of elasticity.

significant linear correlation coefficients relating the physical and viscoelastic properties. In general, the 1,000-kernel weight, length, and thickness gave very high negative correlations with the viscoelastic properties. The most relevant correlation was between the kernel thickness and W_p ($r = -0.841$, $P < 0.01$). These correlations showed an influence of the physical characteristics of the kernels on its viscoelastic behavior evaluated under small strain in addition to influences of the specific wheat classes and cultivars.

CONCLUSIONS

The methodology of the uniaxial compression test under small strain proposed and discussed in this study allows the measurement of the viscoelastic wheat properties of individual kernels by applying the theory of elasticity. It could be a tool for indirect distinctions among wheat classes, cultivars, and different moisture contents in the kernel.

The moisture content of the wheat kernel was the studied factor that most affected its viscoelastic properties. An increase in the kernel moisture content decreased W_e and W_p but increased W_t . The modulus of elasticity was affected mainly by the wheat class and decreased as the moisture content increased.

There was a significant negative relationship among the kernel weight (1,000 kernels), thickness, and viscoelastic properties.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors wish to acknowledge the Ph.D. scholarship from CONACYT to Néstor Ponce García. We also thank CONACYT for the financial support of the project no. 154090: "Study of Water Re-distribution in Gluten from Frozen Dough, and Its Effect on Protein and Viscoelasticity Changes."

LITERATURE CITED

- AACC International. Approved Methods of Analysis, 11th Ed. Method 08-12.01. Ash in farina and semolina. Approved April 13, 1961; reapproved November 3, 1999. Method 44-15.02. Moisture—Air-oven methods. Approved October 30, 1975; reapproved November 3, 1999. Method 46-13.01. Crude protein—Micro-Kjeldahl method. Approved October 8, 1976; reapproved November 3, 1999. Method 55-10.01. Test weight per bushel. Approved April 13, 1961; reapproved November 3, 1999. Available online only. AACCI: St. Paul, MN.
- Afkari, S. A. H., and Minaei, S. 2004. Behavior of wheat kernels under quasi-static loading and its relation to grain hardness. *J. Agric. Sci. Technol.* 6:11-19.
- American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). 2009. Compression test of food materials of convex shape. ASABE S368.4. DEC2000 (R2008) 676-686.
- Anderssen, R. S., and Haraszi, R. 2009. Characterizing and exploiting the rheology of wheat hardness. *Eur. Food Res. Technol.* 229:159-174.
- Arnold, P. C., and Mohsenin, N. N. 1971. Proposed techniques for axial compression tests on intact agricultural products of convex shape. *Trans. ASAE* 14:78-84.
- Arnold, P. C., and Roberts, A. W. 1966. Stress distributions in loaded wheat grains. *J. Agric. Eng. Res.* 11:38-43.
- Bargale, P. C., Irudayaraj, J., and Marquis, B. 1995. Studies on rheological behaviour of canola and wheat. *J. Agric. Eng. Res.* 61:267-274.
- Delwiche, S. R. 2000. Wheat endosperm compressive strength properties as affected by moisture. *Trans. ASAE* 43:365-373.
- Delwiche, S. R., Morris, C. F., Mabilie, F., and Abécassis, J. 2012. Influence of instrument rigidity and specimen geometry on calculations of compressive strength properties of wheat endosperm. *Cereal Chem.* 89:24-29.
- Dobraszczyk, B. J., Whitworth, M. B., Vincent, J. F. V., and Khan, A. A. 2002. Single kernel wheat hardness and fracture properties in relation to density and the modelling of fracture in wheat endosperm. *J. Cereal Sci.* 35:245-263.
- Edwards, M. A., Osborne, B. G., and Henry, R. J. 2007. Investigation of the effect of conditioning on the fracture of hard and soft wheat grain by the single-kernel characterization system: A comparison with roller milling. *J. Cereal Sci.* 46:64-74.

- Elbatawi, I. E., and Arafa, G. K. 2008. Factors affecting breaking force distribution of wheat kernel before milling. *Misr J. Agric. Eng.* 25:1004-1025.
- Evers, T., and Millar, S. 2002. Cereal grain structure and development: Some implications for quality. *J. Cereal Sci.* 36:261-284.
- Figueroa, J. D. C., Maucher, T., Reule, W., and Peña, R. J. 2009. Influence of high molecular weight glutenins on viscoelastic properties of intact wheat kernel and relation to functional properties of wheat dough. *Cereal Chem.* 86:139-144.
- Figueroa, J. D. C., Hernández, Z. J. E., Véles, M. J. J., Rayas-Duarte, P., Martínez-Flores, H. E., and Ponce-García, N. 2011. Evaluation of degree of elasticity and other mechanical properties of wheat kernels. *Cereal Chem.* 88:12-18.
- Glenn, G. M., Younce, F. L., and Pitts, M. J. 1991. Fundamental physical properties characterizing the hardness of wheat endosperm. *J. Cereal Sci.* 13:179-194.
- Gorji, A., Rajabipour, A., and Tavakoli, H. 2010. Fracture resistance of wheat grain as a function of moisture content, loading rate and grain orientation. *AJCS* 4:448-452.
- Gubicza, J., Juhász, A., Tasnádi, P., Arató, P., and Vörös, G. 1996. Determination of the hardness and elastic modulus from continuous Vickers indentation testing. *J. Mater. Sci.* 31:3109-3114.
- Haddad, Y., Mabilie, F., Mermet, A., Abecassis, J., and Benet, J. C. 1999. Rheological properties of wheat endosperm with a view on grinding behavior. *Powder Technol.* 105:89-94.
- Haddad, Y., Benet, J. C., Delene, J. Y., Mermet, A., and Abecassis, J. 2001. Rheological behaviour of wheat endosperm—Proposal for classification based on the rheological characteristics of endosperm test samples. *J. Cereal Sci.* 34:105-113.
- Hernández, Z. J. E., Figueroa, J. D. C., Rayas-Duarte, P., and Peña, R. J. 2012. Viscoelastic characterization of glutenins in wheat kernels measured by creep tests. *J. Food Eng.* 113:19-26.
- Hrušková, M., and Švec, I. 2009. Wheat hardness in relation with other quality factors. *Czech J. Food Sci.* 27:240-248.
- Kalkan, F., and Kara, M. 2011. Handling, frictional and technological properties of wheat as affected by moisture content and cultivar. *Powder Technol.* 213:116-122.
- Kang, Y. S., Spillman, C. K., Steele, J. L., and Chung, D. S. 1995. Mechanical properties of wheat. *Trans. ASAE* 38:573-578.
- Mabilie, F., and Abecassis, J. 2003. Parametric modelling of wheat grain morphology: A new perspective. *J. Cereal Sci.* 37:43-53.
- Marzec, A., Cacak-Pietrzak, G., and Gondek, E. 2011. Mechanical and acoustic properties of spring wheat versus its technological quality factors. *J. Texture Stud.* 42:319-329.
- Mohsenin, N. N. 1978. *Physical Properties of Plant and Animal Materials: Structure, Physical Characteristics, and Mechanical Properties.* Gordon and Breach Science Publishers: New York, NY.
- Morris, C. F., Pitts, M. J., Bettge, A. D., Poeka, K., King, G. E., and McCluskey, P. J. 2008. Compressive strength of wheat endosperm: Analysis of endosperm bricks. *Cereal Chem.* 85:351-358.
- Morris, C. F., Delwiche, S. R., Bettge, A. D., Mabilie, F., Abecassis, J., Pitts, M. J., Dowell, F. E., Deroo, C., and Pearson, T. 2011. Collaborative analysis of wheat endosperm compressive material properties. *Cereal Chem.* 88:391-396.
- Peña, B. R. J., Pérez, H. P., Villaseñor, M. E., Gómez, V. M. M., and Mendoza, L. M. A. 2008. Calidad de la cosecha de trigo en México. Ciclo primavera-verano 2006. *Publicación Especial del CONASIST-CONATRIGO: Mexico.*
- Ponce-García, N., Figueroa, J. D. C., López-Huape, G. A., Martínez, H. E., and Martínez-Peniche, R. 2008. Study of viscoelastic properties of wheat kernels using compression load method. *Cereal Chem.* 85:667-672.
- Samson, M.-F., Mabilie, F., Chéret, R., Abecassis, J., and Morel, M.-H. 2005. Mechanical and physicochemical characterization of vitreous and mealy durum wheat endosperm. *Cereal Chem.* 82:81-87.
- Shelef, L., and Mohsenin, N. N. 1967. Evaluation of the modulus of elasticity of wheat grain. *Cereal Chem.* 44:392-402.
- Wang, L., and Jeronimidis, G. 2008. Investigation of the fracture mode for hard and soft wheat endosperm using the loading-unloading bending test. *J. Cereal Sci.* 48:193-202.

[Received December 18, 2012. Accepted June 3, 2013.]

ANEXO 2
Artículo Enviado

De: ees.yjcrs.0.2944fe.968e4e2b@eesmail.elsevier.com <ees.yjcrs.0.2944fe.968e4e2b@eesmail.elsevier.com> en nombre de Journal of Cereal Science <ejcs@elsevier.com>

Enviado: viernes, 16 de mayo de 2014 11:03 a. m.

Para: bramirez@guaymas.uson.mx; ramirez_wong_benjamin@hotmail.com

Asunto: Submission Confirmation JCS

Journal of Cereal Science

Title: Evaluation of the Viscoelastic Properties of Tempered Wheat Kernels and their Doughs Using Uniaxial Compression Test Under Small Strain

Authors: Nestor Ponce-García, Master of Science; Benjamin Ramirez-wong, Ph.D.; Patricia I Torres-Chávez, Ph. D.; Juan de D Figueroa-Cárdenas, Ph. D.; Sergio O Serna-Saldivar, Ph. D.; Mario O Cortez-Rocha, Ph. D.; Anayansi Escalante-Aurto, Master of Science

Article Type: Research Article

Your submission entitled "Evaluation of the Viscoelastic Properties of Tempered Wheat Kernels and their Doughs Using Uniaxial Compression Test Under Small Strain" has been received by Journal of Cereal Science.

You may check on the progress of your paper by logging on to the Elsevier Editorial System as an author. The URL is <http://ees.elsevier.com/yjcrs/>.

Your manuscript will be given a reference number once an Editor has been assigned.

Thank you for submitting your work to this journal. Please do not hesitate to contact me if you have any queries.

Kind regards,

Journal of Cereal Science

Manuscript Number: JCS14-177

Title: Evaluation of the Viscoelastic Properties of Tempered Wheat Kernels and their Doughs Using Uniaxial Compression Test Under Small Strain

Article Type: Research Article

Keywords: wheat kernel; flour dough; viscoelastic properties; uniaxial compression test

Corresponding Author: Dr. Benjamin Ramirez-wong, Ph.D.

Corresponding Author's Institution: Universidad de Sonora

First Author: Nestor Ponce-García, Master of Science

Order of Authors: Nestor Ponce-García, Master of Science; Benjamin Ramirez-wong, Ph.D.; Patricia I Torres-Chávez, Ph. D.; Juan de D Figueroa-Cárdenas, Ph. D.; Sergio O Serna-Saldivar, Ph. D.; Mario O Cortez-Rocha, Ph. D.; Anayansi Escalante-Aburto, Master of Science

Abstract: The total work, elastic work and plastic work of two tempered (16%) wheat kernels soft and hard classes as well as their doughs, were evaluated using uniaxial compression test under small strain. In soft wheat kernels, the elastic work (We_K) was lower than the plastic work (Wp_K), while in the hard wheat kernels We_K was higher than Wp_K . Regarding to the dough viscoelasticity, both wheat classes showed higher plastic work (Wp_D) than elastic work (We_D). The data suggested that the degree of elasticity that was transferred from the conditioned kernel to the dough was $\approx 54\%$ in both wheat classes. The soft wheat cultivars presented greater correlation among the wheat tempered kernel, flour and dough. The total, elastic and plastic work from both, the soft wheat kernel and dough were very significantly ($p < 0.01$) correlated. In the hard wheat cultivars, the wet gluten presented very significant ($p < 0.01$) negative correlations with the maximum compression force (F_{maxD}), the total work and the plastic work of the dough. The proposed procedure of using uniaxial compression test under small strain allows measurement of the viscoelastic properties of tempered individual wheat kernels and their respective doughs with good reproducibility.

1 **Evaluation of the Viscoelastic Properties of Tempered Wheat Kernels and**
 2 **their Doughs Using Uniaxial Compression Test Under Small Strain**

3 N. Ponce-García^{a,b}, B. Ramírez-Wong^{a*}, P.L. Torres-Chávez^a, J.D. Figueroa-Cárdenas^c, S.O.
 4 Serna-Saldivar^d, M.O. Cortez-Rocha^a, A. Escalante-Aburto^a

5

6 ^a *Programa de Doctorado en Ciencias de los Alimentos. Departamento de Investigación y*
 7 *Posgrado en Alimentos, Universidad de Sonora. Blvd. Luis Donaldo Colosio esq. Reforma. Edif.*
 8 *5P. Col. Centro. C.P.83000. Hermosillo, Sonora, México.*

9 ^b *UAEM Campus Universitario "El Cerrillo", El Cerrillo Piedras Blancas, C.P. 50200. Toluca,*
 10 *Estado de México.*

11 ^c *Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV-IPN), Libramiento Norponiente*
 12 *2000, Fracc. Real de Juriquilla, Querétaro, C.P. 76230. Qro., México.*

13 ^d *Departamento de Biotecnología e Ingeniería de Alimentos, Centro de Biotecnología,*
 14 *Tecnológico de Monterrey, Av. Eugenio Garza Sada 2501 Sur, C.P. 64849. Monterrey, N.L.,*
 15 *México.*

16

24 *Abbreviations: W_t , Total work; W_e , Elastic work; W_p , Plastic work; DE, Degree of elasticity;*
 25 *W_tK , Total work of tempered wheat kernel; W_eK , Elastic work of tempered wheat kernel; W_pK ,*
 26 *Plastic work of tempered wheat kernel; F_{maxK} , Maximum compression force of tempered wheat*
 27 *kernel; DEK, Degree of elasticity of tempered wheat kernel; W_tD , Total work of dough; W_eD ,*
 28 *Elastic work of dough; W_pD , Plastic work of dough; F_{maxD} , Maximum compression force of*
 29 *dough; DED, Degree of elasticity of dough.*

30

47 **1. Introduction**

48 The rheological behavior of individual wheat kernels includes parameters such as
 49 viscoelasticity (total, elastic and plastic work) and stress relaxation (Ponce-García et al., 2008;
 50 Figueroa et al., 2011; Hernández et al., 2012). Furthermore, the industrial quality of wheat is
 51 related to the viscoelastic properties of the kernel, which influence the milling and baking
 52 quality. In addition, the moisture content in the wheat kernel has a significant effect on its
 53 rheological properties. According to Posner and Hibbs (2009), the wheat kernel texture is a
 54 major determinant of its milling behavior and one of the key properties that must be understood
 55 by the miller when maximizing flour yield.

56 Ponce-García et al. (2013) evaluated the viscoelastic properties of individual wheat kernels
 57 using uniaxial compression tests under small strain (3%). This strain was the minimum allowed
 58 by the equipment and was in the range in which the elasticity theory can be used to explain the
 59 wheat kernel viscoelasticity.

60 In addition, because bread quality is affected by the dough viscoelasticity, knowing the
 61 viscoelastic properties of individual wheat kernels is necessary to determine the extent to which
 62 those properties are transferred to the dough. Understanding the viscoelastic properties of wheat
 63 kernels can also facilitate the selection of wheat cultivars and classes according to their
 64 processing and end-use. Hence, the development of fast prediction methods for end-use wheat
 65 quality continues to be a major concern among breeders, producers, millers, and bakers for
 66 evaluating the milling process and flour and baking quality of wheat cultivars (Figueroa et al.,
 67 2012).

68 The end products made from wheat flour depend principally on the viscoelasticity and
 69 mechanical behavior of the kernel, the flour physicochemical properties, the protein fraction in

70 the flour, and the dough viscoelasticity (Anderssen and Haraszi, 2009). There are two parameters
 71 affecting laboratory-milled flour: the wheat conditions before milling and the wheat
 72 homogeneity. The level of tempering required depends both on the initial moisture content of the
 73 wheat class and the hardness of the grain and both qualities are related to the structure of the
 74 wheat kernel (Dubois and Juhué, 2000).

75 Dough rheological characterization is an important parameter in flour quality evaluation.
 76 Traditionally, the bread-making industry uses empirical methods for the evaluation of mixing
 77 properties. Empirical dough rheological instruments, such as the farinograph, mixograph, and
 78 alveograph, are commonly used to measure dough stress and strain properties and to quantify its
 79 elastic and viscous properties (Puppo et al., 2005; Ren et al., 2008). Dough rheological
 80 techniques are commonly used for the analysis of wheat flour baking value. Dobraszczyk and
 81 Morgenstern (2003) suggested that empirical methods do not fulfill the requirements of
 82 fundamental rheological tests because they are purely descriptive and dependent on the type of
 83 instrument, which supplies data in arbitrary units and usually involves labor intensive and time-
 84 consuming protocols. There is a need to develop more fundamental methods to evaluate dough
 85 viscoelastic properties in a rapid, low-cost manner.

86 Little attention has been given to the viscoelastic properties of individual wheat kernels and
 87 their relationship with the viscoelastic properties of the dough. However, considering the
 88 interesting results obtained by Ponce-García et al. (2013) in the evaluation of the viscoelastic
 89 properties of wheat kernels using uniaxial compression tests under small strain, the aim of this
 90 study was to evaluate the viscoelastic parameters and behaviors of individual tempered wheat
 91 kernels and their flour doughs using the same method. Likewise, this study aimed to evaluate the

92 viscoelastic trends of tempered wheat kernels, the transfer of these properties to flour dough, and
 93 their relationship with the physicochemical and rheological properties of flour.

94

95 2. Materials and methods

96 2.1 Wheat samples

97 Wheat cultivar samples from two classes from the crop of 2011 grown in the states of Sonora
 98 and Guanajuato, México were tested: hard wheat cultivars (Kronstad, Nana, Norsteña and
 99 Tacupeto) and soft wheat cultivars (Bárceñas, Cortazar, Saturno and Urbina).

100

101 2.2 Tempering and milling

102 The initial moisture content of the wheat kernel samples was determined using the ASAE
 103 standard S352.2.567 (1999) method. Next, 10 kg of each wheat cultivar were tempered to 16%
 104 moisture content by adding distilled water according to the procedure reported by Gojji et al.
 105 (2010), with some modifications. In this study, the homogenization process for each sample was
 106 carried out in a rotary mixer (MR 10 L, CHOPIN Technologies, Villeneuve-la-Garenne Cedex,
 107 France) over 1 hour for each batch of grain. The tempered wheat samples were used to produce
 108 flour, and their viscoelasticity was evaluated.

109 The tempered wheat kernels at 16% moisture content from different cultivars and classes were
 110 milled using a Brabender Quadrumat Jr. Mill (Quadruplex; Brabender Instruments, South
 111 Hackensack, NJ, USA) following the Approved Method 26-50.01 (AACC Int 2000) to obtain
 112 flour. A total of 10 kg from each wheat cultivar was milled. The flour extraction rate (ER%) was
 113 calculated according to Dubois and Juhné (2000)

$$114 \quad ER\% = \frac{[(100-HF) \times (MF) \times (100)]}{(100-HB) \times (MB)} \quad (1)$$

115 where HF=moisture content of the produced flour, HB=moisture content of the wheat before
 116 tempering, MF=weight of the produced flour, and MB=weight of the milled wheat before
 117 tempering.

118

119 2.3 Viscoelastic wheat kernel evaluation

120 The tempered wheat kernels from each cultivar were evaluated by the uniaxial compression
 121 test under small strain using a texture analyzer (TA.XT2 Plus, Texture Technologies, Scarsdale,
 122 NY/Stable Micro Systems, Surrey, England) following the method reported by Ponce-García et
 123 al. (2013). Each data point was an average of 20 readings for each repetition from different
 124 wheat kernels of the same sample. Briefly, individual kernels were placed between two parallel
 125 plates with the crease side down. The work of compression was determined from the
 126 loading/unloading curve. The area under the loading curve gives the total work (W_1K) performed
 127 by the loading device during compression of the kernel. The reversible elastic contribution or
 128 elastic work of the kernel (W_eK) relative to the total work of the kernel can be deduced from the
 129 area under the unloading curve, and the energy absorbed by the plastic deformation or the plastic
 130 work of the kernel (W_pK) alone is the difference between W_1 and W_e ($W_p = W_1 - W_e$) (Gubicza et
 131 al., 1996). In addition, during loading of the tempered wheat kernels, the maximum compression
 132 force (F_{maxK}) at 3% strain was simultaneously measured.

133

134 2.4 Wheat flour quality analysis

135 2.4.1 Physicochemical characterization

136 The moisture and ash content were determined by the Approved Methods 44-15.02 and 08-
 137 12.01, respectively (AACC Int 2000). The protein content (N×5.7) was measured according to

138 Approved Method 46-13.01 (AACC Int 2000) and using a nitrogen determiner (Leco FP-528
 139 nitrogen equipment, Leco, St. Joseph, MI USA). The wet gluten (Glutomatic Perten instruments
 140 AB type 2200, Huddinge, Sweden) and sedimentation volumes of the flours were determined
 141 according to AACC Int (2000) Approved Methods 38-12.02 and 56-60.01, respectively.

142

143 2.4.2 *Farinographic characterization*

144 The farinographic properties of the flour were evaluated using a 50 g-farinograph (type
 145 810107, Brabender OHG, Duisburg, Germany) following the method 54-21.02 (AACC Int 2000).
 146 The parameters evaluated included the water absorption (WA), the arrival time (AT), the
 147 maximum development time (MDT), the dough stability (DS), and the mixing tolerance index
 148 (MTI).

149

150 2.5 *Dough preparation and viscoelasticity evaluation*

151 Dough was prepared in the bowl of a farinograph by mixing 50 g of flour (14% mb) with
 152 distilled water at 30°C. The amount of water added was equivalent to the farinograph water
 153 absorption value. The mixing time was set to the farinograph development time. After mixing,
 154 the dough was incubated in a proofing chamber (National MFG.Co Lincoln, Nebr.) at 30°C and
 155 85% relative humidity for 20 minutes. Later, the dough was placed in an airtight plastic container
 156 until use. This dough was used to evaluate the viscoelasticity by the uniaxial compression test
 157 under small strain.

158 The dough viscoelasticity was determined using the uniaxial compression test under small
 159 strain. This method was developed by Ponce-Garcia et al. (2013) for individual wheat kernels.
 160 Our aim was to evaluate the viscoelastic properties of tempered wheat kernels and their doughs

161 using uniaxial compression test under small strain at the same conditions. This method was
 162 modified in how the dough sample was placed between the two parallel plates of the
 163 texturometer. The procedure was applied to the dough as follows. First, an aluminum cylinder
 164 was constructed with a cavity 13 mm in diameter and 3 mm in height. These dimensions
 165 correspond to the diameter of the aluminum probe [model SMS P/1KS] and the average height of
 166 the wheat kernel. Second, to evaluate the viscoelastic properties, 0.5 g of dough (previously
 167 prepared) was weighed and placed carefully in the cavity of the aluminum cylinder. Pieces of
 168 wax paper with dimensions of 20 mm × 20 mm were taped onto the loading face of the top
 169 cylinder containing the dough. A 1 kg weight was placed on the aluminum cylinder and allowed
 170 to stand for 3 minutes. The weight was then removed, and prior to the start of the test, the wax
 171 paper was removed from the cylinder. The viscoelastic analysis of the dough under small strain
 172 was carried out using the same parameters and conditions as in the characterization of the
 173 viscoelastic properties of tempered wheat kernels (Ponce-Garcia et al., 2013). The viscoelastic
 174 properties of the dough evaluated were the following: total work (W_tD), elastic work (W_eD) and
 175 plastic work (W_pD). Each data point was an average of 5 readings for each repetition from
 176 different doughs of the same sample. Furthermore, the flour dough maximum compression force
 177 (F_{maxD}) was measured.

178

179 2.6 *Experimental design and statistical analyses*

180 To evaluate the viscoelastic properties of the tempered wheat kernels and dough, a completely
 181 randomized experimental design with two factors was used. The factors evaluated were the
 182 wheat class (soft or hard cultivars) and the cultivar (four cultivars for each class). An analysis of
 183 variance (ANOVA) was performed on the data gathered from the different evaluations, with a

184 95% level of significance. Duncan's test was used to compare the means of the specific
 185 treatments. Simple Pearson's correlations were performed and were significant or very
 186 significant if $P < 0.05$ or $P < 0.01$, respectively. The statistical analysis was performed using
 187 Statistical Analytical Software, version 9.1.3 (SAS Institute, Cary, NC, USA 2002).

188

189 3. Results and discussion

190 3.1 Milled and flour extraction rate

191 The ANOVA carried out for the maximum compression force of the tempered wheat kernels
 192 (F_{maxK}) showed that the two wheat classes had very significant differences ($P < 0.01$) between
 193 them. The tempered wheat kernels from hard class presented higher averages values of F_{maxK}
 194 (4.1 N) and ER% (68.3%) than tempered wheat kernels from soft class (2.7 N and 66.5%,
 195 respectively). According to Kaur et al. (2013), the wheat kernel hardness prior to tempering is
 196 associated with the milling properties of the wheat. Wheat cultivars with greater hardness
 197 indexes showed lower flour recoveries. This may be attributed to a lower endosperm-bran ratio.

198 The flour extraction rates (ER%) obtained in this study were slightly lower than those
 199 reported by Věha (2007) and Kaur et al. (2013), who milled the grain at an approximately 14%
 200 moisture content, but were very similar to those reported by El-Porai et al. (2013) for wheat
 201 kernels tempered to 16% moisture content for 24 h. Standard milling tests showed remarkable
 202 differences in the ER% among the different wheat cultivars and classes.

203

204 3.2 Flour characterization

205 3.2.1 Physicochemical evaluations

206 The moisture content was in a narrow range (13.6-14.5%). In this study, the moisture contents
 207 of the flours were acceptable because they were very close to 14%, the optimum moisture
 208 content. The flour ash content varied over a wide range (0.357-0.470%) and was more uniform
 209 for the soft cultivars. The ash content was low, which indicates the high quality of the milled
 210 fractions. According to Iuliana et al. (2010), the ash content increases when the ER% increases.
 211 The flour protein content ranged from 9.0% (soft flour Bárcenas) to 11.7% (hard flour Nana).
 212 The average value of the protein content for the soft flour class was 9.8%, while that for the hard
 213 flour class was 10.8%. Significant differences among the cultivars corresponding to each class of
 214 flour were presented. The wet gluten of the soft wheat cultivars was 26.9%, and that of the hard
 215 wheat cultivars was 28.6%. The flour sedimentation volume was found to range from 20.9 mL
 216 (Cortazar soft wheat) to 40.3 mL (Norteña hard wheat), with the values being typical for both
 217 wheat market classes. Zhao et al. (2010) reported higher average values for U.S. hard wheat
 218 cultivars and slightly lower values for U.S. soft red winter cultivars compared to the values in
 219 this study.

220

221 3.2.2 Farinographic evaluation

222 According to the ANOVA performed for the farinographic parameters, all of them differed
 223 very significantly ($P < 0.01$), except for arrival time (AT) parameter of the soft flour, in which no
 224 significant differences were found ($P > 0.05$). The AT ranged from 0.30 minutes (Saturno soft
 225 flour) to 4.05 minutes (Kronstad hard flour). The water absorption of the hard wheat flours was
 226 higher (58.95%) than that of the soft wheat flours (52.67%). The average maximum development
 227 time of the hard wheat flours was 4.42 minutes, while that of the soft wheat flours was 1.42
 228 minutes. The dough stability was found to range from 1.87 minutes (Cortazar soft flour) to 16.37

229 minutes (Kronstad hard flour). The dough stabilities indicated a predominance of strong flours.
 230 The maximum tolerance index ranged from 100 to 145 UB for the soft flours and from 30 to 95
 231 UB for the hard flours. The hard flours were different from each other in all of the farinographic
 232 parameters evaluated. The complete averages values from farinographic characteristics of both
 233 wheat classes, are presented in Table 1.

234

235 3.3 Viscoelastic behavior

236 3.3.1 Tempered wheat kernels

237 Higher levels of moisture content in the kernel cause plasticization and change its viscoelastic
 238 properties (Bargale et al., 1995). In general, kernel strength properties decrease with increasing
 239 moisture content. In this study, the ANOVA showed that the viscoelastic properties of the soft
 240 wheat kernel class were significantly different ($P < 0.01$) than those of the hard wheat kernel
 241 class, except for the W_pK . The mean values for the viscoelastic properties and the degree of
 242 elasticity (DEK) for the soft and hard wheat kernels tempered to 16% moisture content are
 243 shown in Table 2. The soft wheat kernels presented higher average values of W_pK compared
 244 with the average values of W_sK . However, in the hard wheat kernels, the average value of W_sK
 245 was slightly higher. Maucher et al. (2009) described a general trend of higher W_s associated with
 246 the hard endosperm texture of wheat kernels compared to that of soft wheat kernels.

247 Additionally, the ANOVA revealed that the DEKs in both tempered wheat kernel classes
 248 were very significantly ($P < 0.01$) different among the cultivars. The tempered hard wheat kernels
 249 showed a higher average value of DEK (50.3%) than the conditioned soft wheat kernels (43.9%).
 250 This is in agreement with Figueroa et al. (2011), who reported values for the degree of elasticity

251 (DE) of 41.8% and 53.5% for soft and hard wheat kernels tempered to 16.4% and 16.3%
 252 moisture content, respectively.

253 According to Gorji et al. (2010), the energy absorption capacity of tempered kernels (high
 254 moisture content) is higher compared to kernels with lower moisture content. Furthermore, a
 255 higher average value of W_sK in the hard cultivars indicates greater hardness.

256

257 3.3.2 Dough

258 The ANOVA performed for the soft flour dough showed that the W_sD , W_pD and W_rD varied
 259 significantly ($P < 0.05$) among the flour dough cultivars, while for the hard flour dough cultivars,
 260 there were significant differences ($P < 0.05$) in the F_{maxD} , W_sD and degree of elasticity of the
 261 dough (DED). Table 3 presents the mean values of the viscoelastic properties of the dough found
 262 using uniaxial compression tests under small strain (3%).

263 It can be observed that the doughs from the soft wheat cultivars had higher values for all of the
 264 viscoelastic parameters, except the degree of elasticity. The highest value of W_pD indicates that
 265 the soft dough is more viscous than the hard dough; hence, its degree of elasticity is lower. The
 266 uniaxial compression under small strain method allows the viscoelastic behaviors of soft and
 267 hard doughs and of their respective cultivars to be distinguished.

268 Fig. 1 show the average force curves of the viscoelastic behaviors from the soft and hard
 269 tempered wheat kernels and their respective doughs obtained with the uniaxial compression test
 270 under small strain. According to Fig. 1A, the viscoelastic behavior of the soft tempered wheat
 271 kernels was $W_pK < W_sK$, whereas the hard tempered wheat kernels (Fig. 1B) showed inverse
 272 viscoelastic behavior ($W_sK > W_pK$).

273 As shown in Fig. 1C and 1D, the W_a , W_p and maximum compression force average values
 274 decreased significantly from the tempered wheat kernel to the dough. The dough behaviors were
 275 similar for the two dough types, although in the soft dough the W_pD and W_dD values were
 276 greater than those in the hard dough. Considering the degree of elasticity of the soft and hard
 277 tempered wheat kernels, it can be observed that in both cases, the DE that was transmitted from
 278 the tempered wheat kernel to the dough was $\approx 54\%$. Therefore, the greater DEKs of the hard
 279 tempered wheat kernels indicate the higher degree of elasticity of its doughs (Table 3).

280

281 3.4 Simple correlations

282 Correlations were investigated separately either in the soft wheat kernels or in the hard wheat
 283 kernels.

284 3.4.1 Soft wheat class

285 The relationships among the wheat kernel, flour and dough parameters are presented in Table 4.
 286 $F_{max}K$ was significantly correlated ($P<0.05$) with the arrival time, W_dD , and W_pD and very
 287 significantly correlated (0.99, $P<0.01$) with the maximum development time (MDT). The
 288 moisture content of the flour (MC) presented significant negative correlations with the three
 289 viscoelastic parameters of the dough ($P<0.05$) and very significant negative correlation with
 290 $F_{max}D$ (-0.98, $P<0.01$). W_aK presented significant correlations ($P<0.05$) with W_aD as well as very
 291 significant positive correlations (0.98, $P<0.01$) with W_dD and W_pD . The correlation between
 292 W_pK and MDT was very significant (0.99, $P<0.01$). W_pK presented a significant correlation
 293 ($P<0.05$) with W_dD and W_pD (0.94, $P<0.05$). The parameter W_pK presented very interesting
 294 correlations with other characteristics of the flour and dough, including very significant
 295 correlations (0.99, $P<0.01$) with the three viscoelastic properties of the dough. W_pD was the

296 parameter that had the highest number of correlations. Therefore, it can be concluded that the
 297 viscous component of the soft wheat cultivars has a greater influence on the viscoelastic and
 298 rheological properties of the corresponding dough.

299

300 3.4.2 Hard wheat class

301 Table 5 shows the simple correlations between the flour and dough parameters of the hard
 302 wheat cultivars. The ER% was highly correlated ($P<0.01$) with the maximum development time
 303 and with the mixing tolerance index. The protein content of the flour (PC) presented significant
 304 positive correlations ($P<0.05$) with wet gluten (WG) and with water absorption and significant
 305 negative correlations (-0.97, $P<0.05$) with $F_{max}D$ and with W_pD . Wet gluten exhibited the
 306 greatest number of correlations in this wheat class. WG presented a significant negative
 307 correlation (-0.95, $P<0.05$) with W_aD and very significant negative correlations (-0.99, $P<0.01$)
 308 with $F_{max}D$, W_dD and W_pD . In the hard wheat class, this result highlights the influence of storage
 309 proteins (gluten) on the viscoelastic properties of the dough, with a higher gluten content in the
 310 dough decreasing the W_pD , indicating less deformation (less W_dD) of the dough during uniaxial
 311 compression. Unlike the soft wheat class, in the hard wheat class the elastic component had the
 312 greatest influence on the viscoelastic behavior of the dough.

313

314 4. Conclusions

315 Wide variations in the milling, physicochemical flour characteristics, farinographic
 316 parameters and viscoelastic properties of tempered wheat kernels and doughs were observed
 317 between soft and hard Mexican wheat cultivars. Importantly, the proposed procedure for uniaxial
 318 compression test under small strain allows the measurement of the viscoelastic tempered

- 365 Hernández, Z.J.E., Figueroa, J.D.C., Rayas-Duarte, P., Martínez-Flores, H.E., Arámbula, G.V.,
 366 Luna, G.B., Peña, R.J., 2012. Influence of high and low molecular weight glutenins on stress
 367 relaxation of wheat kernels and the relation to sedimentation and rheological properties.
 368 Journal of Cereal Science 55, 344-350.
- 369 Iuliana, B., Georgeta, S., Violeta, I., Iuliana, A., 2010. Physicochemical and rheological analysis
 370 of flour mill streams. Cereal Chemistry 87, 112-117.
- 371 Kaur, A., Singh, N., Ahlawat, A.K., Kaur, S., Singh, A.M., Chauhan, H., Singh, G.P., 2013.
 372 Diversity in grain, flour, dough and gluten properties amongst Indian wheat cultivars varying
 373 in high molecular weight subunits (HMW-GS). Food Research International 53, 63-72.
- 374 Maucher, T., Figueroa, J. D. C., Relue, W., Peña, J., 2009. Influence of low molecular weight on
 375 viscoelastic properties of intact wheat kernels and their relation to functional properties of
 376 wheat dough. Cereal Chemistry 86, 372-375.
- 377 Ponce-García, N., Figueroa, J.D.C., López-Huape, G.A., Martínez, H.E., Martínez-Peniche, R.,
 378 2008. Study of viscoelastic properties of wheat kernels using compression load method.
 379 Cereal Chemistry 85, 667-672.
- 380 Ponce-García, N., Ramírez-Wong, B., Torres-Chávez, P.L., Figueroa-Cárdenas, J.D., Serna-
 381 Saldivar, S.O., Cortez-Rocha, M.O., 2013. Effect of Moisture Content on the Viscoelastic
 382 Properties of Individual Wheat Kernels Evaluated by the Uniaxial Compression Test Under
 383 Small Strain. Cereal Chemistry 90, 558-563.
- 384 Posner, E.S., Hibbs, A.N., 2009. Wheat flour milling, second ed. St. Paul, MN, USA.
- 385 Puppo, M.C., Calvelo, A., Añón, M.C., 2005. Physicochemical and rheological characterization
 386 of wheat flour dough. Cereal Chemistry 82, 173-181.
- 387 Ren, D., Walker, E.C., Faubion, J.M., 2008. Review. Correlating dough elastic recovery during

Table 1
Mean values of the farinographic characteristics of flours from different wheat classes and cultivars.^{a,b}

Wheat Class/ Cultivar	WA (%)	AT (mm)	MDT (mm)	DS (mm)	MTI (UB)
Soft					
Bárceñas	52.65 ± 0.07b	0.50 ± 0.00ab	1.00 ± 0.00b	3.62 ± 0.17a	100 ± 0.0b
Cortazar	53.00 ± 0.00a	0.90 ± 0.14a	1.90 ± 0.14a	1.87 ± 0.17b	145 ± 7.0a
Saturno	52.90 ± 0.00a	0.30 ± 0.00b	0.90 ± 0.14b	3.37 ± 0.17a	135 ± 7.0a
Urbina	52.15 ± 0.07c	0.75 ± 0.35ab	1.90 ± 0.14a	3.00 ± 0.35a	135 ± 7.0a
Mean	52.67	0.61	1.42	2.96	128.7
Hard					
Kronstad	60.50 ± 0.14b	4.05 ± 0.35a	7.40 ± 0.14a	16.37 ± 0.17a	30 ± 0.0d
Nana	61.55 ± 0.07a	2.30 ± 0.00b	3.50 ± 0.00c	2.87 ± 0.17d	70 ± 0.0b
Norteña	58.95 ± 0.07c	1.80 ± 0.00c	5.15 ± 0.21b	7.00 ± 0.00b	55 ± 7.0c
Tacupeto	54.80 ± 0.00d	0.80 ± 0.00d	1.65 ± 0.21d	4.62 ± 0.17c	95 ± 7.0a
Mean	58.95	2.23	4.42	7.71	62.5

^aStandard deviation. Different letters within a column for the same wheat class/cultivar are significantly different ($P < 0.05$).

^bWA = Water absorption; AT = Arrival time; MDT = Maximum development time; DS = Dough stability; MTI = Mixing tolerance index.

Table 2
Mean values of the viscoelastic properties of wheat kernels from different classes and cultivars tempered to a moisture content of 16%.^{a,b}

Wheat Class/Cultivar	W ₁ K (N-mm)	W ₂ K (N-mm)	W ₃ K (N-mm)	DEK (%)
Soft				
Bárceñas	0.064 ± 0.017b	0.024 ± 0.007b	0.040 ± 0.011b	37.0 ± 4.2c
Cortazar	0.106 ± 0.025a	0.050 ± 0.014a	0.056 ± 0.012a	46.9 ± 4.0a
Saturno	0.051 ± 0.011b	0.022 ± 0.005b	0.029 ± 0.006c	42.8 ± 3.3b
Urbina	0.105 ± 0.043a	0.051 ± 0.022a	0.054 ± 0.021a	48.8 ± 3.1a
Mean	0.082	0.037	0.045	43.9
Hard				
Kronstad	0.138 ± 0.052a	0.076 ± 0.031a	0.062 ± 0.021a	54.6 ± 3.0a
Nana	0.126 ± 0.041a	0.064 ± 0.022a	0.062 ± 0.020a	50.9 ± 4.5b
Norteña	0.088 ± 0.021b	0.036 ± 0.010b	0.052 ± 0.011a	41.2 ± 4.0c
Tacupeto	0.138 ± 0.052a	0.075 ± 0.027a	0.063 ± 0.026a	54.4 ± 4.2a
Mean	0.123	0.063	0.059	50.3

^aStandard deviation. Different letters within a column for the same wheat class/cultivar are significantly different ($P < 0.05$).

^bW₁K = Total work of tempered wheat kernel; W₂K = Elastic work or recoverable work of tempered wheat kernel; W₃K = Plastic work or dissipated work of tempered wheat kernel; DEK = Degree of elasticity of tempered wheat kernel.

Table 3

Mean values of the viscoelastic properties of doughs from different wheat classes and cultivars using uniaxial compression test under small strain.^{a,b}

Wheat Class/ Cultivar	F _{max} D (N)	W _T D (N mm)	W _E D (N mm)	W _P D (N mm)	DED (%)
Soft					
Bárcenas	0.465 ± 0.029a	0.0141 ± 0.0011ab	0.0034 ± 0.0004ab	0.0107 ± 0.0008ab	24.1 ± 1.7a
Corrazar	0.500 ± 0.100a	0.0173 ± 0.0052a	0.0042 ± 0.0013a	0.0131 ± 0.0039a	24.2 ± 1.0a
Saturno	0.391 ± 0.103a	0.0116 ± 0.0035b	0.0027 ± 0.0010b	0.0089 ± 0.0025b	22.4 ± 2.8a
Urbina	0.479 ± 0.064a	0.0175 ± 0.0025a	0.0043 ± 0.0007a	0.0132 ± 0.0018a	24.3 ± 1.3a
Mean	0.459	0.0151	0.0038	0.0115	23.7
Hard					
Kronstad	0.397 ± 0.098ab	0.0127 ± 0.0026ab	0.0037 ± 0.0012a	0.0090 ± 0.0015a	28.2 ± 4.2a
Nana	0.316 ± 0.034b	0.0100 ± 0.0024b	0.0023 ± 0.0004b	0.0077 ± 0.0020a	23.2 ± 2.3b
Norreda	0.437 ± 0.067a	0.0149 ± 0.0024a	0.0044 ± 0.0009a	0.0105 ± 0.0015a	29.0 ± 3.3a
Tacupeto	0.477 ± 0.087a	0.0149 ± 0.0045a	0.0041 ± 0.0011a	0.0108 ± 0.0034a	27.4 ± 1.6a
Mean	0.407	0.0131	0.0035	0.0095	27.0

^aStandard deviation. Different letters within a column for the same wheat class/cultivar are significantly different (P < 0.05).
^bF_{max}D = Maximum compression force of the flour dough; W_TD = Total work of the dough; W_ED = Elastic work or recoverable work of the dough; W_PD = Plastic work or dissipated work of the dough; DED = Degree of elasticity of the dough.

Table 4

Simple correlations (r) among tempered wheat kernel, flour and dough parameters of the soft wheat class.^{a,b}

	MC	SV	AT	MDT	F _{max} K	W _T K	W _E K	W _P K
MC	1	0.96*	-0.98**	ns	ns	ns	ns	-0.97*
SV	0.96*	1	-0.97*	ns	ns	ns	ns	ns
AT	-0.98**	ns	1	ns	0.94*	0.94*	ns	0.96*
MDT	ns	ns	ns	1	0.99**	0.99**	0.99**	0.97*
F _{max} D	-0.98**	-0.95*	0.94*	ns	ns	ns	ns	ns
W _T D	-0.95*	ns	ns	0.97*	0.95*	0.98**	0.94*	0.99**
W _E D	-0.96*	ns	0.94*	0.95*	ns	0.96*	ns	0.99**
W _P D	-0.95*	ns	0.94*	0.97*	0.95*	0.98**	0.94*	0.99**

^ans = Non significant; * = Significant (P < 0.05) and ** = Very significant (P < 0.01).
^bMC = Flour moisture content; SV = Sedimentation volume; AT = Arrival time; MDT = Maximum development time; F_{max}K = Maximum compression force of tempered wheat kernel; W_TK = Total work of tempered wheat kernel; W_EK = Elastic work of tempered wheat kernel; W_PK = Plastic work of tempered wheat kernel; F_{max}D = Maximum compression force of the flour dough; W_TD = Total work of the dough; W_ED = Elastic work of the dough; W_PD = Plastic work of the dough.

Table 5

Simple correlations (r) between flour and dough parameters of the hard wheat class.^{a,b}

	ER	PC	WG
MDT	-0.99**	ns	ns
MTI	0.99**	ns	ns
WG	ns	0.96*	ns
WA	ns	0.95*	ns
F _{max} D	ns	-0.97*	-0.99**
W _T D	ns	ns	-0.99**
W _E D	ns	ns	-0.95*
W _P D	ns	-0.97*	-0.99**

^ans = Non significant; * = Significant (P < 0.05) and ** = Very significant (P < 0.01).
^bER = Extraction rate of flour; PC = Flour protein content; WG = Wet gluten; MDT = Maximum development time; MTI = Mixing tolerance index; WA = Water absorption; F_{max}D = Maximum compression force of the flour dough; W_TD = Total work of the dough; W_ED = Elastic work of the dough; W_PD = Plastic work of the dough.

Figure
Click here to download high resolution image

