



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 los Alimentos**

Especialidad en Almacenamiento y Procesamiento de Granos

**IDENTIFICACIÓN DE SUBUNIDADES DE GLUTENINAS EN TRIGOS
PANADEROS (*Triticum aestivum*) DEL ESTADO DE SONORA Y SU
RELACIÓN CON PARÁMETROS REOLÓGICOS Y DE
PANIFICACIÓN.**

TESIS

Como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

Lucinda Durán Vásquez

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



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

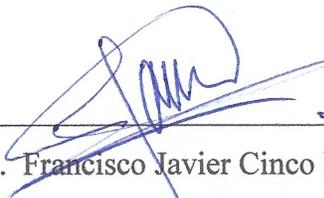


Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

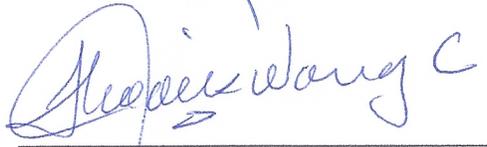
APROBACIÓN

**Identificación de subunidades de gluteninas en trigos panaderos (*Triticum aestivum*)
del Estado de sonora y su relación con parámetros reológicos y de panificación.**

Q.B. Lucinda Durán Vásquez



Dr. Francisco Javier Cinco Moroyoqui
Director de la tesis



Dr. Francisco Javier Wong Corral
Sinodal



Dra. Alma Rosa Islas Rubio
Sinodal



Dra. María Guadalupe Salazar García
Sinodal

Hermosillo, Sonora a 6 de febrero de 2020.

Asunto: Cesión de derechos

**UNIVERSIDAD DE SONORA
P R E S E N T E.**

Por este conducto hago constar que soy autor y titular de la obra denominada Identificación de Subunidades de Gluteninas en Trigos Panaderos (*Triticum aestivum*) del Estado de Sonora y su relación con Parámetros Reológicos y de Panificación, en los sucesivo LA OBRA, realizada como trabajo terminal con el propósito de obtener el Grado de Maestría, en virtud de lo cual autorizo a la Universidad de Sonora (UNISON) para que efectúe la divulgación, publicación, comunicación pública, distribución, distribución pública, distribución electrónica y reproducción, así como la digitalización de la misma, con fines académicos o propios de la institución y se integren a los repositorios de la universidad, estatales, regionales, nacionales e internacionales.

La UNISON se compromete a respetar en todo momento mi autoría y a otorgarme el crédito correspondiente en todas las actividades mencionadas anteriormente.

De la misma manera, manifiesto que el contenido académico, literario, la edición y en general cualquier parte de LA OBRA son de mi entera responsabilidad, por lo que deslindo a la UNISON por cualquier violación a los derechos de autor y/o propiedad intelectual y/o cualquier responsabilidad relacionada con la OBRA que cometa el suscrito frente a terceros.

A T E N T A M E N T E


LIC. GILBERTO LEÓN LEÓN
Abogado General
UNIVERSIDAD DE SONORA



Q.B. Lucinda Durán Vásquez

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por permitirme empezar y terminar una etapa más de mis estudios por proveer cada una de mis necesidades y esforzarme cada día a seguir adelante.

Por mi Director de tesis Dr. Francisco Javier Cinco Moroyoqui por confiarme el tema de tesis, apoyarme en toda la logística para concluir la investigación.

Por la Dra. Yaeel Cornejo, que fue de ayuda y apoyo en el laboratorio de bioquímica.

A los miembros del comité de Tesis: Dr. Francisco J. Wong Corral, Dra. Alma Rosa Islas Rubio, Dra. María G. Salazar García, por su apoyo e instrucción en cada seminario.

Al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACYT) dándome no solo la oportunidad de estudiar, sino también el apoyo económico en estos 2 años.

A la química María del Carmen Granados (Pame) del CIAD, que me instruyó en el área de Panificación.

Al departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos, por sus atenciones, la documentación entregada y recordatorios en cada semestre.

A mis profesores, amigos y a mi alma mater que me abrió nuevamente las puertas para estudiar.

DEDICATORIA

A quién amáis sin haberle visto, en quien, creyendo, aunque ahora no lo veáis, os alegráis con gozo inefable y glorioso.,

Obteniendo el fin de vuestra fe, que es la salvación de vuestras almas. 2 Pedro 1:8-9

Dedico este trabajo de tesis al Creador, sin Él no hubiera sido posible empezar y terminar este proyecto.

A mi esposo que me apoyó desde el principio hasta el término de la maestría, al igual que mis hijos.

También quiero dedicar este trabajo, a mis seres queridos que ya partieron: mi padre y mi hermano mayor; que los tuve presente y me inspiraron a seguir esforzándome a luchar y lograr una meta más en la vida.

A mi madre y hermanos que me han apoyado con sus palabras.

CONTENIDO

	Página
APROBACIÓN	ii
DERECHOS DE AUTOR	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
DEDICATORIA	v
CONTENIDO	vi
INDICE DE FIGURAS	x
INDICE DE TABLAS	xii
RESUMEN	xiii
INTRODUCCIÓN	1
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
Generalidades del Trigo.....	3
Estructura del Grano.....	3
Glumas.....	5
Pericarpio.....	5
Testa.....	5
Endospermo.....	5
Capa de aleurona.....	5
Endospermo periférico.....	6
Endospermo vítreo.....	7
Endospermo almidonoso.....	7
Germen.....	7
Composición Química.....	8
Gluten.....	11
Dureza del Trigo.....	14
Producción de Cereales a Nivel Mundial.....	14
Producción de Trigo en México.....	18

Clasificación de Trigo en México.....	20
La Producción en el Estado de Sonora.....	23
Problemas en la Agricultura del Trigo en Sonora.....	23
Proteínas del Trigo.....	28
Clasificación en Base a su Solubilidad.....	30
Clasificación en Base a su Tamaño Molecular.....	30
Clasificación en Base a su Funcionalidad.....	30
Proteínas de Almacenamiento.....	31
Proteínas Monoméricas.....	32
Albúminas y globulinas.....	32
Gliadinas.....	32
Proteínas Poliméricas.....	33
Gluteninas de alto peso molecular.....	33
Gluteninas de bajo peso molecular.....	38
Importancia de las Gluteninas en la Panificación.....	38
Métodos utilizados para el Análisis de las Proteínas de Trigo.....	40
Determinación de la Proteína Polimérica.....	40
Electroforesis en gel de poliacrilamida.....	40
Determinación de Proteína Monomérica, Fracción Albúmina.....	40
Método de Lowry-Hartree.....	40
Pruebas Funcionales.....	43
El Alveógrafo.....	43
El Farinógrafo.....	44
El Mixógrafo.....	44
Pruebas Reológicas.....	49
HIPÓTESIS.....	51

OBJETIVOS.....	52
Objetivo General.....	52
Objetivos Específicos.....	52
MATERIALES Y MÉTODOS.....	53
Materia Prima.....	53
Obtención de la Harina.....	53
Análisis Químico y Reológico de las Harinas de Trigo.....	53
Contenido de Humedad.....	54
Contenido de Proteína.....	54
Mixogramas.....	54
Prueba de Panificación.....	54
Volumen de Pan.....	55
Análisis de las Proteínas del Trigo.....	55
Extracción de la Proteína Polimérica.....	55
Electroforesis Disociante en Proteína de Trigo	55
Calificación según la Calidad de las SGAPM (Glu-1 score)	56
Extracción de Proteína Monomérica.....	56
Cuantificación de la Proteína Monomérica.....	56
Análisis Estadístico.....	57
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	58
Caracterización Química y Reológicas de las Harinas de Trigo.....	58
Contenido de humedad.....	58
Contenido de proteína.....	58
Análisis de los mixogramas de las harinas de trigo.....	60
Análisis e identificación de las SGAPM por SDS-PAGE.....	62
Cuantificación de la Proteína Monomérica Fracción (Albúmina).....	64
TDM en Harinas con Alto Volumen de Pan (HAVP).....	67

TDM en Harinas con Bajo Volumen de Pan (HBVP).....	69
Identificación de las SGAPM por SDS-PAGE.....	71
Correlaciones entre las Pruebas de Panificación.....	77
Relación de Volumen Específico de Pan con el TDM en las 8 Variedades de Harina de Trigo.....	77
Relación de Volumen Específico con el TDM en HAVP y HBVP.....	77
Resultados de la variación alélica.....	81
CONCLUSIONES	84
RECOMENDACIONES	85
REFERENCIAS	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1 Estructura del grano de trigo.....	4
2 Producción mundial de diferentes cereales.....	16
3 Subunidades de glutenina D1, 5+10 cuya síntesis se expresa por el gen 5x y el gen 10 y.....	34
4 Localización cromosómica en los principales grupos de proteína en trigos hexaploides.....	36
5 Estructura de las proteínas monoméricas.....	37
6 Alveógrafo de Chopín y Alveogramas típicos.....	46
7 Farinograma típico de una masa fuerte que indica dónde se miden los parámetros.....	47
8 Mixograma típico de una masa de harina de trigo fuerte que muestra el tiempo pico (T), la altura máxima (H), la pendiente de desarrollo (D) y la pendiente de debilitamiento (W).....	48
9 Factores que gobiernan la calidad del pan y las propiedades reológicas del trigo.....	50
10 Mixogramas de las harinas con sus TDM: a) Navojoa (2.21 min), b) Norman (2.07 min), c) Roelfs (3.11 min), d) Villa Juárez (4.75min), e) Kronstad (4.40 min), f) Tacupeto (3.10 min), g) Onavas (5.10 min), h) Bourlag (5.40 min), i) Control (3.45 min).....	61
11 Concentración de albúmina vs TDM en 8 variedades de harina de trigo.....	65
12 Concentración de albúmina vs TDM en 5 variedades de harina de trigo.....	66
13 SDS-PAGE, Patrones de SGAPM de algunos cultivos de trigo panadero y algunas especies relacionadas.....	73
14 Perfil electroforético de las proteínas poliméricas de las harinas: Control 1/2* ,_ 5+10; línea 1, Navojoa 1/2* ,_ 5+10; línea 2, Roelfs 2, 17+18; línea 3, Norman 1/2* ,_ 5+10; línea 4, Villa Juárez 2, _ 5+10; línea 5, Bourlag 1/2* ,_ 5+10; línea 6, Tacupeto 2,17+18, 12; línea 7, Onavas 2, 17+18, 12; línea 8, Kronstad 1/2* , 5+10. Ordenados de menor a mayor volumen específico de pan.....	75
15 Volumen Específico vs TDM en ocho variedades de trigo.....	78

16	Volumen específico y TDM en HAVP en cuatro variedades de trigo.....	79
17	Volumen específico y TDM en HBVP en cuatro variedades.....	80
18	Pan cortado y alineado de mayor a menor volumen, orden: Control, Tacupeto, Norman, Roelfs y Navojoa.....	83
19a	Pan cortado y alineado de mayor a menor volumen, orden: Control, Tacupeto, Norman, Roelfs y Navojoa.....	83
19b	Control: (1,2,3); Villa Juárez: (4,5); Kronstad: (6).....	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
1	Composición química del trigo.....	13
2	Principales productores de trigo en el mundo.....	17
3	Estimación de la producción de trigo cristalino y harinero en México.....	19
4	Clasificación de granos de trigo en México en función del gluten.....	21
5	Estados con mayor producción de trigo ciclo 2018-2019.....	22
6	Características agronómicas de las variedades de trigo liberadas.....	26
7	Clasificación de las proteínas según su solubilidad de acuerdo con el método de Osborne.....	29
8	Clasificación para determinar la calidad panificable de las diferentes subunidades	42
9	Determinación del contenido de humedad y proteínas de las harinas de trigo.....	59
10	Porcentaje de proteína de harinas de trigo, TDM y su composición de SGAPM. ...	63
11	Valores de TDM ¹ , volumen de pan en harinas de trigo y su composición de subunidades de gluteninas de alto peso molecular en HAVP ²	68
12	Valores de TDM ¹ , volumen de pan en harinas de trigo y su composición de subunidades de gluteninas de alto peso molecular en HBVP ²	70
13	Valores de absorción del agua, tiempo de desarrollo mixográfico (TDM), volumen, y volumen específico.....	76

RESUMEN

La calidad de la proteína del trigo está en función principalmente de las proteínas de almacenamiento del endospermo que constituyen al gluten, en donde la fracción de glutenina es la más importante en la descripción de calidad de los trigos panaderos. El entrelazado resultante de los enlaces covalentes disulfuro, los puentes de Hidrógeno y las interacciones hidrofóbicas conceden a las gluteninas sus propiedades de agregación y funcionales.

Se realizó un estudio de 8 variedades de harina de trigo panadero (*Triticum aestivum*) con el objetivo de relacionar la presencia y cantidad de subunidades de gluteninas de alto peso molecular (SGAPM) con propiedades funcionales y de panificación. Se identificaron las SGAPM señalando el respectivo número de Payne. La determinación alélica de las SGAPM se realizó por SDS-PAGE, al conocer la composición de subunidad fue posible determinar la presencia de calidad Glu-1. Las variedades mostraron hasta 3 subunidades diferentes de gluteninas.

La calidad de las muestras de harina fue probada por la determinación de porcentaje de proteína, tiempo de desarrollo mixográfico (TDM), así como las características de calidad de panificación (volumen de pan). Se encontró una alta correlación entre el volumen específico y TDM para las harinas (de alto y bajo volumen de pan). Se analizaron las características de mezcla y propiedades de panificación de las harinas. Se obtuvieron las correlaciones simples en las pruebas de Mixogramas, volumen de pan, la puntuación de la calidad Glu-1 y el contenido de proteínas. Los resultados muestran que el tiempo de mezclado en las harinas es afectado por el contenido de proteína. Por otra parte, los trigos que tienen las subunidades 1, 2*, 5+10 no alcanzaron un buen volumen de pan debido a que presentan una menor concentración de proteínas poliméricas de alto peso molecular y sus sitios activos pueden ser inactivados al haber interacciones de otros compuestos como el almidón u otras proteínas monoméricas que se encuentran en mayor proporción. Por lo tanto, se concluye que los trigos hexaploides del Estado de Sonora al tener 3 y 4 bandas de SGAPM con las combinaciones alélicas 1, 2*, 17+18, y 5+10. tienen buena calidad panadera.

INTRODUCCIÓN

Debido a la importancia que tiene el grano de trigo, siendo uno de los cereales de mayor consumo a nivel mundial (CIC 2018), ha sido importante estudiar su composición al igual que sus propiedades funcionales. Los nuevos cultivos de trigo están enfocados en buscar un alto rendimiento, mayor tolerancia al estrés abiótico y biótico y una mejor calidad de uso final (Mann et al. 2009). Al continuar con una mejora del trigo para alimentación, los mejoradores necesitan utilizar instrumentos para predecir el procesamiento y el rendimiento del producto final, estos instrumentos incluyen referencia sobre los genes que deben combinarse para obtener un grado de calidad particular, así como los instrumentos para medir las líneas individuales y obtener las especificaciones requeridas. Los diferentes productos finales en los que se utiliza el trigo (como, galletas, pan, tortillas, pasteles, cereal horneado para el desayuno) crea una amplia gama de especificaciones de rendimiento debido a los diferentes determinantes genéticos. La calidad del trigo ha sido analizada y ha estado centrada en las relaciones entre los alelos de proteínas de almacenamiento de semillas y las características de procesamiento (Bushuk, 1998; Shewry et al. 1999; Gras et al. 2001; Goesaert et al. 2005). La calidad de la harina de trigo está relacionada mayormente por la cantidad y composición de dos grupos complejos de proteínas: gluteninas encargadas de la estabilidad de la masa y gliadinas responsables de la extensibilidad y viscosidad (Gupta et al. 1994; Shewry et al. 1995). Se ha comprobado un mayor efecto en la calidad del pan no solo en las subunidades de glutenina de alto peso molecular (SGAPM) presentes sino también las proporciones de glutenina a gliadina, la distribución del peso molecular, la cantidad y el tamaño de los polímeros de glutenina y la variación alélica.

La ausencia de ciertas subunidades de gluteninas de alto peso molecular (GAPM) ejercen un efecto significativo en la calidad del pan; sin embargo, no todas las GAPM forman un polímero apropiado, ni contribuyen en la calidad de panificación (Cinco y Moroyoqui, 2008). Esto es debido a que ciertos genes que se encuentran en los brazos largos de los cromosomas 1A, 1B y 1D, que controlan la síntesis de las GAPM, no siempre se expresan debido a las condiciones ambientales en que se cultivan ciertos trigos.

El estado de Sonora es una región agrícola con un clima muy extremo con temperaturas muy elevadas, afectando a las enzimas responsables de biosintetizar proteínas y otros nutrientes, causando efectos en las propiedades funcionales de las harinas; por lo cual es muy probable, que la expresión y síntesis de GAPM produzca efectos benéficos en la calidad del pan.

Uno de los problemas que encuentran los productores mexicanos es la comercialización del grano, debido a que la industria molinera decide importar trigo, es decir, traerlo de otro país, argumentando que los trigos mexicanos no poseen la calidad de panificación requerida (Villa señor et al. 2000).

Para este estudio se utilizó la electroforesis en gel de poliacrilamida para analizar las proteínas poliméricas y clasificar las diferentes subunidades de gluteninas de los trigos panaderos. Así mismo correlacionar el TDM (tiempo de desarrollo mixográfico) y el volumen específico del pan en relación con su calidad panadera.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Generalidades del Trigo

Las gramíneas son plantas que producen un fruto cubierto o envuelto al grano denominado cariósido. La cariósido está compuesta por el pericarpio y la semilla; la semilla se subdivide en germen, endospermo y testa o envoltura de la semilla. Algunos cereales se les llama desnudos porque pierden sus glumas (lema y palea) en la recolección o cosecha.

El trigo es uno de los principales cereales mayormente utilizado en el mundo, tiene la cualidad de adaptarse a diferentes tipos de climas. Ha sido el principal cereal utilizado como alimento por presentar un alto valor nutritivo y energético, además su fruto es un grano seco no perecedero (Pomeranz, 1988).

Es un alimento con elevado porcentaje de carbohidratos; además proporciona fibra, proteínas, vitaminas (E y B) y minerales (zinc, cobre, manganeso y molibdeno) y agua (Serna Saldívar 2009). La composición proximal es la siguiente: 14.6 % de proteína (constituido principalmente por un 80 % de gluteninas y gliadinas), 1.8 % de lípidos, 3.0 % de fibra cruda, 2 % de ceniza y 78.6 % de carbohidratos digeribles (Tabla 1) (Hoseney, 1994).

Estructura del Grano

El grano tiene forma ovalada, mide alrededor de 8 mm, el color del grano puede ser blanco o rojo, según los pigmentos presentes en la parte superior de la semilla (Hoseney, 1991). El grano tiene forma ovalada y en sus extremos forma redondeada, por un extremo sobre sale el germen y al otro lado el mechón de pelos finos (pincel). En la (Figura 1) puede examinarse que el trigo está constituido por tres partes principales: endospermo, salvado y germen (Serna Saldívar, 2009). La temperatura ideal para su desarrollo está entre 10 y 25 °C, sin embargo, puede llegar a proliferar a temperaturas entre 3 y 33 °C (Dupont y Altenbach, 2003).

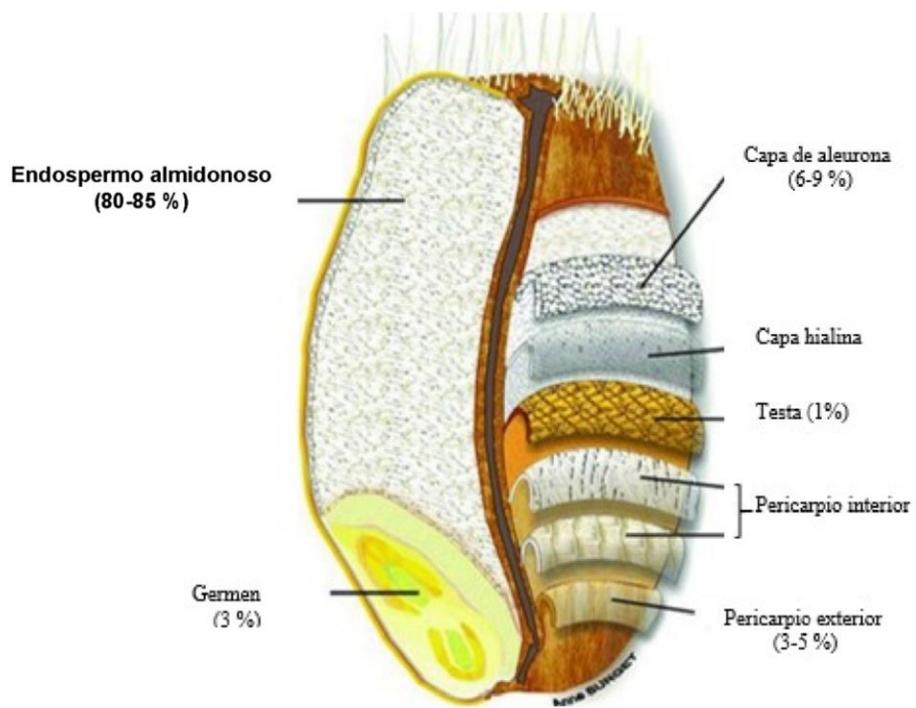


Figura 1. Estructura del grano de trigo.
Fuente: Onipe et al. (2015).

Glumas

Las glumas están compuestas por dos estructuras: la lema y la palea. El lema por lo general cubre el embrión y posee una punta lanceolada (en cereales pequeños como el trigo, la avena y la cebada) llamada arista. La contraparte de la lema recubre generalmente la parte ventral de los cereales más pequeños. La lema puede ser corta, mediana o llegar a recubrir totalmente el grano.

Pericarpio

El pericarpio cubre a la semilla y está conformada de varias capas de células; estas estructuras se dividen en epicarpio, mesocarpio y endocarpio; su función primordial es evitar que la humedad conducida por las células tubulares se pierda. Estas células sirven de medio de conducción y distribución del agua que se absorbe a través del germen en el proceso de la germinación. El pericarpio constituye 5-7 % del peso del grano, carece de almidón, contiene alto contenido de fibra y cenizas (Bewley y Black, 1978).

Testa

La testa está fuertemente adherida a la parte ventral de las células tubulares y puede tener una o dos estratos de células. El color de ciertos granos está relacionado con la existencia de pigmentos en ciertas capas celulares. Los taninos causan sabores amargos, favoreciendo a la semilla, con más resistencia al ataque de pájaros; también es menos susceptible a los hongos y a germinar en la panícula (espiga) (Bechtel, 1983).

Endospermo

Capa de aleurona

Las células de aleurona rodean al endospermo amiláceo con un grosor de 1, 3 o 4 células de espesor, según la especie forman los componentes del endospermo. Las células de aleurona por lo general tienen forma cuboides con paredes celulares mucho más gruesas, normalmente dos veces el grosor de aquellas en el endospermo central del almidón. Las células de aleurona contienen un citoplasma granular compacto constituido de granos de aleurona y pequeñas vacuolas que contienen cuerpos de inclusión (Olsen, 2004). Son abundantes en proteínas y

aceites, pero no contienen almidón y, a diferencia de las células del endospermo amiláceo tienen muerte celular programada (Young y Gallie, 2000), continúan viviendo en el grano maduro. Esto es importante si quieren realizar su papel clave en la germinación del grano, donde convierten y liberan una amplia cantidad de enzimas hidrolizantes responsables de mover los polímeros de almacenamiento del endospermo amiláceo. Casi siempre, las células de aleurona permanecen triploides, en comparación de las células de endospermo de almidón que se convierten en endoduplicativas y se vuelven poliploides en la naturaleza (Olsen, 2001). Las paredes de las células de aleurona del grano de trigo tienen dos capas muy diferentes (Bacic y Stone, 1981). La capa interna es más delgada y varía en concentraciones de (1,3; 1,4) β -glucanos (Wood et al. 1983). La capa exterior más gruesa de la pared de aleurona puede enriquecerse con arabinosilanos, aunque se piensa que los residuos de ácido ferúlico se reparten uniformemente a través de las dos capas de la pared (Fincher, 1989). Estas dos capas de aleurona pueden ser importantes durante la germinación del grano al disolverse la capa externa gruesa, mientras que la capa interior delgada permanece intacta. La capa más gruesa podría eliminarse para ayudar la secreción de enzimas hidrolíticas recién sintetizadas en el endospermo del almidón (Gubler et al. 1987), la retención de la capa delgada podría ser necesaria para controlar la integridad física de las células de aleurona hasta completar su función en la secreción de la enzima (Fincher, 1989).

Los polisacáridos centrales ubicados en las paredes de las células de aleurona son arabinosilanos se encuentran en niveles relativamente altos de (1,3; 1,4) β -glucanos en el grano de trigo. Las paredes de la aleurona de trigo fueron aislada y analizada mostrando aproximadamente un 65 % de arabinosilanos y aproximadamente un 28% (1,3; 1,4) β -glucanos; los niveles de celulosa y glucomanano salieron muy bajos (Bacic y Stone, 1981).

Endospermo periférico

El endospermo periférico se distingue por su alto contenido proteico y pequeñas unidades de almidón de forma angular y compactadas. En algunos cereales esta capa se asocia con una baja digestibilidad de nutrientes que, al ser tratada térmicamente, la enzima digestiva tiene un mayor acceso al sustrato.

Endospermo vítreo

Las células maduras del endospermo maduro están integradas por cuatro estructuras: paredes celulares, gránulos de almidón, matriz y cuerpos proteicos. Las paredes celulares son delgadas y encapsulan a los demás componentes; poseen alto contenido de fibra insoluble (celulosa y beta glucanes), en los solubles (pentosanes). Los gránulos de almidón cubren la mayoría del espacio celular y están rodeados y separados por la matriz proteica que mantiene la estructura interna. Los cuerpos proteicos son redondos y muy pequeños incrustados en la membrana de los gránulos de almidón; no existen espacios de aire y los gránulos de almidón están recubiertos por la matriz proteica y toman forma poligonal; la estructura tiene una forma translúcida porque la luz no es difractada cuando pasa a través del endospermo.

Endospermo almidonoso

El endospermo almidonoso está encerrado por el vítreo, se localiza en la parte más céntrica del grano, está compuesto por las mismas estructuras del endospermo vítreo; solo que las unidades de almidón son de gran tamaño y menos angulares; la unión entre los gránulos de almidón y la matriz proteica es más débil y las unidades de almidón tiene menos incrustaciones de los cuerpos proteicos, las paredes celulares son más delgadas y con menor contenido de proteína, presentan minúsculos espacios de aire que dan al endospermo apariencia opaca u Almidonoso (French,1984).

Germen

El germen básicamente encierra al axis embrionario. Este componente se encuentra adherido al endospermo por medio del escudo. Sirve como almacén de nutrientes y como puente de conexión entre la plántula o embrión de desarrollo y el gran almacén de nutrientes del endospermo. El axis está formado por la radícula y la pluma que formarán las raíces y la parte vegetativa de la planta, respectivamente. El germen carece de almidón y posee un alto contenido de aceite, proteínas, azúcares solubles y cenizas, es alto en vitamina B y E y produce la mayoría de enzimas para el desarrollo de la germinación (Bechtel,1983).

Composición Química

El almidón es el principal constituyente de los cereales, incluido en la fracción de extracto libre de nitrógeno (ELN). El Nitrógeno, cuantificado por lo general por el método Kjeldhal, forma parte de las proteínas, ocupando el segundo lugar más abundante en el grano. El extracto etéreo está formado por aceite y otros compuestos liposolubles. Los lípidos clasificados como polares y no polares se localizan en el germen. La fibra cruda son carbohidratos insolubles. Las glumas, el pericarpio y las paredes celulares del endospermo son altos en fibra. Las cenizas es el material inorgánico formado por minerales, comúnmente se encuentra unido al pericarpio y a la capa de aleurona. El endospermo es abundante en carbohidratos solubles (ELN) y bajo en minerales, extracto etéreo y fibra cruda. El trigo panadero tiene un 14.4 % de proteína, 2.3 % de extracto etéreo, 2.9 % de fibra cruda, 1.9 % de cenizas y 78.5 % de extracto libre de nitrógeno. Todos expresados en materia seca. La mayor parte del grano está compuesto por carbohidratos en un 80 %, del 3 al 5 % son carbohidratos estructurales constituido por la fracción fibrosa, el resto es material de reserva, principalmente almidón. El almidón se encuentra en gránulos dentro de las células del endospermo. Son polímeros de glucosa unidos por enlaces glucosídicos alfa 1-4 y 1-6 conformado por moléculas de amilopectina y amilosa; el primero es ramificado formado por cadenas de glucosa unidas por enlaces glucosídicos alfa 1-4 y ramificaciones cuando el enlace es alfa 1-6. Los cereales maduros poseen menor cantidad de monosacáridos, disacáridos y oligosacáridos (aprox., 2%); por lo general se localizan en el germen.

La fibra dietética se clasifica en soluble e insoluble. La fracción insoluble está formada por celulosa y hemicelulosa. Se encuentran en la envoltura del grano (lema y palea) principalmente la fracción localizada en el pericarpio incrementa el tránsito intestinal. Ayuda a disminuir la posibilidad de contraer cáncer en el tracto gastrointestinal, liga agentes carcinogénicos evitando que se queden en el tracto digestivo. La celulosa es un polímero lineal unido por enlaces de glucosa beta 1-4. La hemicelulosa es un polímero ramificado de azúcares como la xilosa, arabinosa, galactosa, ácido glucónico y glucosa. La fibra dietética soluble está conformada principalmente por pectinas, pentosanes, β -glucanes y hemicelulosa soluble. La fibra soluble es indigestible, pero capaz de ser degradada por la microflora del tracto gastrointestinal causando cambios importantes en el pH luminal. El consumir esta fibra favorece la excreción de sales biliares y de colesterol; de lo contrario aumenta la posibilidad de incidencia de

arteriosclerosis, alta presión, ataques cardíacos y embolias cerebrales. La fibra soluble se ubica en las paredes celulares y se relaciona con los compuestos fenólicos fluorescentes.

Las proteínas varían en cantidad dentro del mismo cereal de una cosecha a otra. La causa puede ser por el genotipo y las condiciones ambientales en el desarrollo y maduración del grano. Los compuestos proteicos se encuentran en mayor cantidad en el germen y la capa aleurona. Las proteínas se clasifican en solubles (albúminas) e insolubles y en soluciones iónicas débiles (globulinas). Las albúminas y globulinas se conforman por enzimas, nucleoproteínas y glucoproteínas, sustancias biológicamente activas durante la germinación. Cerca de un 80 % de las proteínas del grano es de almacenamiento. La fracción proteica más abundante es la prolamina. Las prolaminas son un grupo de proteínas vegetales con gran contenido en prolina (gluteninas y gliadinas) que se forman en los protopláستidos durante la maduración del grano. Las condiciones ambientales y fertilidad afectan la cantidad de prolaminas, un alto contenido de Nitrógeno incrementa la cantidad de esta fracción. Un bajo rendimiento de grano por la sequía o estrés, aumenta la proporción de proteína y prolaminas en el grano. Las prolaminas están encerradas en los cuerpos proteicos dentro del endospermo. Son insolubles en agua y solubles en alcohol. Las prolaminas son proteínas pobres por carecer de aminoácidos esenciales, pero son ricos en aminoácidos no esenciales como prolina, glicina, ácido glutámico y aspártico. En algunos cereales como el trigo, las prolaminas están entrelazadas a través de enlaces disulfuros y éstas necesitan de agentes reductores como el mercaptoetanol para poder extraerlas con mayor facilidad. En el caso del trigo, las gliadinas al ser sometidas en humedad y acción mecánica, adquiere propiedades como elasticidad y distensión crítica apta para la elaboración de galletas y productos afines (Chung y Pomeranz, 1985).

Las glutelinas son la fracción proteica más difícil de extraer por su alto peso molecular y por la gran cantidad de puentes disulfuro. Para poder extraerlos es necesario utilizar detergentes, álcalis y mercaptoetanol. Las glutelinas son las proteínas principales de la estructura del endospermo, situadas dentro de la matriz proteica y asociadas con las prolaminas. En cuanto a la calidad nutricional, las glutelinas son mejores que las prolaminas. El aminoácido limitante en todos los cereales es la lisina, el aminoácido esencial de mayor importancia en la nutrición humana; sin embargo, las albúminas y globulinas localizadas, principalmente en el germen, poseen una cantidad adecuada de aminoácidos esenciales que permite un buen crecimiento o

balance positivo de Nitrógeno en lactantes. El segundo aminoácido limitante en los cereales es el triptófano y treonina. El valor nutritivo de una proteína depende de la cantidad de cada uno de los aminoácidos esenciales que contiene, la digestibilidad de la proteína y de la cantidad de factores antinutritivos que el alimento pueda contener (Betschart, 1988). Los cereales contienen baja cantidad de compuestos liposolubles importantes en la estabilidad. En los procesos de molienda en la mayoría de los productos, el germen es removido porque el aceite se oxida o se enrancia. El germen contiene más del 30 % de aceite. La fracción lipídica la forman los compuestos saponificables e insaponificables. Dentro de los saponificables están los polares (monoglicéridos, diglicéridos, ácidos grasos libres, fosfolípidos y glicolípidos) y los no polares (triglicéridos) porción más abundante y principal forma de almacenamiento de los lípidos, son atacados por la lipasa liberando ácidos grasos libres que disminuyen el pH; estos al oxidarse y enranciarse producen olores y sabores desagradables (Karmas y Harris, 2012). La mayoría de los ácidos grasos, en los triglicéridos son insaturados un 70 % del total es oleico (18:1) y linoleico (18:2). El ácido palmítico (16:0) es el principal ácido graso saturado ocupando del 15-25 % del total. Los fosfolípidos y glucolípidos se encuentran en menor cantidad, los lípidos al igual que los monoglicéridos y diglicéridos se consideran emulsificantes naturales. En la fracción insaponificable se encuentran los esteroides, tocoferoles, ceras y carotenoides. Los tocoferoles se encuentran principalmente en el germen y tienen actividad de vitamina E. Los esteroides son compuestos como el β -sitosterol y campesterol. Los cereales tienen cantidades trazas de esteroides que pueden transformarse en vitamina D (Bock,1990).

Los cereales son considerados como una fuente muy baja en calcio. La nixtamalización en las tortillas de maíz aumenta el contenido de calcio. El fósforo se encuentra en mayor cantidad, pero su biodisponibilidad se dificulta por estar ligado al ácido fítico. El ácido fítico o inositol también liga fuertemente a otros cationes; el inositol disminuye cuando el cereal es germinado o es procesado por fermentación, aumentan las fitasas rompiendo el enlace del inositol que liga a los minerales. Los cereales aportan una buena fuente de potasio, pero bajo en sodio; los productos integrales contienen cantidades significativas de los microminerales Hierro, Zinc y cobre. El pericarpio, el germen y la capa aleurona son estructuras anatómicas con mayor contenido de minerales. Las harinas y productos refinados pierden muchos de estos nutrientes en el procesamiento (Chavan et al. 1989).

El germen y la capa de aleurona son una fuente de vitaminas liposolubles e hidrosolubles, respectivamente, los alimentos refinados pierden por lo general estos compuestos. Los cereales son considerados como una buena fuente de las vitaminas del complejo B, los granos no contienen vitamina C, proveen 80, 52 y 72 % del consumo mundial de tiamina, riboflavina y niacina, respectivamente, concentradas en la capa de aleurona. Su remoción puede ser causa del beriberi (dificultad para caminar, dificultad para respirar, hormigueo, hinchazón de los pies). La niacina se encuentra en los cereales en forma libre y ligada; además puede ser sintetizada por el aminoácido triptófano. La deficiencia de la niacina puede producir la pelagra, cuyos síntomas son diarrea, dermatitis y demencia (Hoffmann, 1972).

Gluten

El gluten está conformado por proteínas que imparten funcionalidad a la harina de trigo y la calidad del pan resultante, dependiendo de la masa obtenida por la capacidad de absorber agua y las propiedades de elasticidad, cohesividad y viscosidad (Wieser, 2007).

El gluten tiene un alto contenido en prolina (14 % de la cantidad total de aminoácidos) y forma puentes de hidrógeno e intermoleculares con los grupos amida de la glutamina (37 % del total de los aminoácidos). El gluten también es rico en cisteína que forma puentes disulfuro intermoleculares e intramoleculares durante el amasado. Las interacciones hidrofóbicas e hidrofílicas permite que los polímeros se formen longitudinalmente formando una red elástica y cohesiva para un mayor esponjado por la generación de CO₂, producto de la fermentación (Kamal et al. 2009).

Las proteínas del gluten están constituidas por gliadinas y gluteninas, forman alrededor del 50 % de las proteínas del gluten. Las gliadinas son un conjunto de polipéptidos monoméricas y las gluteninas una mezcla de polipéptidos agregados por enlaces disulfuros (Sapirstein y Fu, 1998). Las dos proteínas son reconocidas de almacenamiento de trigo, las gliadinas y gluteninas, son los compuestos principales que conforman el polímero del gluten y determinan las propiedades de panificación (Branlard y Dardevet, 1985a, b). Las gliadinas son monómeros que se determinan en base a su movilidad electroforética a pH bajo (Woychik et al. 1961); estas se dividen en cuatro grupos: α -, β -, γ - and ω -gliadinas. Las composiciones de aminoácidos son semejantes entre cada uno de ellos (Tatham et al. 1990). Las ω -gliadinas son pobres en

metionina o cisteína. Los pesos moleculares de las α -, β - y γ gliadinas por SDS- PAGE van de 30 000 a 45 000 (Kasarda et al.1983). La ω -gliadinas tienen un peso molecular entre 46 000 y 74 000 con pequeñas cantidades de aminoácidos básicos. La fracción de glutenina se componen de dos grupos: las subunidades de glutenina de alto peso molecular (SGAPM) y las subunidades de glutenina de bajo peso molecular (SGBPM) que son estabilizados mediante enlaces de disulfuro entre cadenas (Field et al. 1983). Las SGAPM tiene un peso molecular entre 80 000 y 160 000 Da (Dalton) en un porcentaje aproximado del 5-10 % de la proteína total (Payne, 1986) y las SGBPM oscilan entre 30 y 51 000 utilizando SDS-PAGE (Payne et al. 1980). Las SGBPM son parecidas en la secuencia a las γ -Gliadinas, que son ricas en el aminoácido cistina con puentes disulfuros intercatenarios (Müller et al. 1998) y constituyen del 20 al 30 % de la proteína total (Gupta et al. 1992).

Tabla 1. Composición química del trigo.

Componente	(% base seca)
Carbohidratos	78.6
Proteína	14.6
Fibra cruda	3.0
Ceniza	2.0
Lípidos	1.8

Fuente: Hosney, 1994

Dureza del Trigo

La dureza del grano es utilizada como un parámetro para determinar el tipo de trigo (Morris, 2002). Es un determinante fundamental para la clasificación del trigo y calidad del producto (Campbell et al. 1999). La dureza del grano es considerada para la industria de la harina por su efecto en la molienda, horneado y calidad del trigo (Bettge et al. 1995). La discrepancia física más importante entre el endospermo de los trigo duros y blandos es que el trigo blando engloba gránulos de almidón unidos con una matriz de proteína que lo rodea (Simmonds et al. 1973). Los granos de trigo blando producen un almidón menos dañado). Estos grupos fácilmente se descomponen produciendo una harina más fina. Los granos duros son arduos de triturar y moler y aportan una harina de textura más gruesa con almidón más dañado (Jolly et al. 1993; Ikeda et al. 2005). El almidón dañado tiene mejor capacidad de absorción del agua (Brites et al. 2008). La harina de trigo duro se cuece al horno con bajo contenido de humedad; mayor capacidad de absorción de agua y disponibilidad del sustrato. Es mejor trabajar con trigo duro para la elaboración pan que se levante con levadura, es por eso que alto niveles de gránulos dañados en este tipo de harinas absorben más agua, en tanto que la harina de trigo blando se usa para galletas, pasteles y confituras (Morris y Rose, 1996).

Producción de Cereales a Nivel Mundial

Los cereales son los que aportan la mayor cantidad de alimentos para la humanidad podemos observar en la figura 2. La producción mundial de diversos grupos de cereales en el 2018. Hace referencia a los tres cereales más consumidos en el mundo por la humanidad: trigo, arroz y maíz. La FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) actualmente tiene un pronóstico de la producción mundial de trigo de 730.9 millones de toneladas (Mt) al 4 de abril del 2019. China tiene una producción de 130 Mt, segundo lugar la India con 98.4 Mt, los países con menor producción son: Ucrania y Turquía con 21 Mt (Sagarpa 2018). Para el arroz durante 2017 tiene estimado 516.4 Mt. China produjo en el 2017 alrededor de 213 Mt. La India alrededor de 170 Mt, Indonesia alrededor de 81 Mt; los países con menor producción son Brasil y Pakistán FAOSTAT 2017. Para la cebada se calcula que la producción mundial llegará a 139.9 miles de toneladas (mt) de la campaña 2018-2019 FAO, 2019. La unión europea tiene estimado unos 57.250 miles de toneladas, Rusia 16.500 miles de toneladas, España y Dinamarca son los que producen menor cantidad USDA, 2018.

La producción mundial de maíz 2017-2018 será de 1031.86 toneladas métricas (tm), Estados Unidos es el mayor productor del maíz con 357,267,000 mt siguiendo China y después Brasil. Los países con menor producción son Algeria y Japón con 1000 t USDA, 2018. Según la FAO la demanda mundial del grano de trigo será de 740 millones de toneladas, debido al incremento en el consumo humano de acuerdo al crecimiento demográfico. El maíz incrementará su demanda a 1.107 Mt como pienso y fines industriales en China y Estados Unidos. Respecto al arroz la demanda llegará a 509 Mt. Las cifras del USDA para los mismos cereales proyectan en 745 Mt para el trigo, 1.131 Mt para el maíz y 490 Mt para el arroz (FAO 2019). La producción mundial de trigo en el 2019, según la FAO se sitúa en 757 MT. La mayor parte del incremento anual pronosticado para 2019 es debido a los aumentos de producción de Europa, según se muestra en la Tabla 2 se prevé para la Unión europea una cantidad de 149 MT.

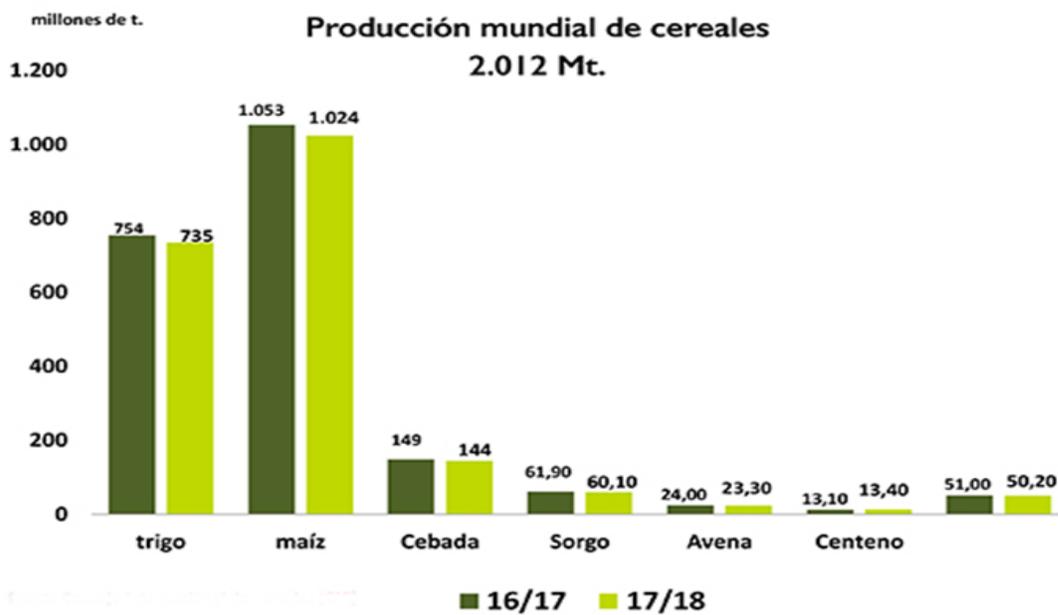


Figura 2. Producción mundial de diferentes cereales
Fuente: Datos del Consejo Internacional de Cereales (2018).

Tabla 2. Principales productores de trigo en el mundo.

País	Estimado en 2018	Pronóstico 2019 (Mt)
Unión Europea	137.5	149.0
China (continental)	128.0	129.0
India	99.7	99.0
Federación de Rusia	72.1	79.0
Estados Unidos de América	51.3	52.0
Otros	226.4	249.4
Total, mundial	728.3	757.4

Mt=Millones de toneladas
Fuente: FAO, (2019).

Producción de Trigo en México

México tiene una población de 134 156 515 millones de habitantes y utiliza una superficie para la siembra de cereales de 1,964,375 km² (CIA 2013). La producción de trigo nacional no abastece el consumo de la población por lo que hay que importar para satisfacer las necesidades del país. En nuestro país el trigo se sitúa en tercer lugar después del maíz y el frijol (InfoAgro. Com 2019).

Cabe señalar que, con base en cifras de agosto de 2019, para el ciclo Otoño-invierno 2018/2019 se tiene previsto alcanzar una producción de trigo panificable en el país de un millón 413 mil toneladas, 14.9 por ciento arriba del ciclo homólogo previo. De acuerdo con el organismo Seguridad Alimentaria Mexicana (Segalmex, 2019) se estimuló el cultivo de trigo panificable en el centro y la zona del Bajío del país, principalmente en los estados de Guanajuato, Michoacán y Jalisco. Con este esquema federal también se dio apoyo a los productores de los estados de Baja California, Sonora, Sinaloa, Chihuahua, Nuevo León, Michoacán, Jalisco, Durango, Querétaro, Coahuila e Hidalgo. En la Tabla 3 se muestra la estimación de producción de trigo cristalino y panadero para el año 2024 (Inforural, 2019).

Tabla 3. Estimación de la producción de trigo cristalino y harinero en México

TRIGO CRISTALINO	ESTIMACIONES**		
AÑO/PERÍODO	2016	2018	2024
Producción potencial*** (miles de toneladas)	2,309.52	2,323.26	2,364.48
Consumo nacional (miles de toneladas)	825.43	843.62	900.63
TRIGO HARINERO	ESTIMACIONES**		
AÑO/PERÍODO	2016	2018	2024
Producción potencial*** (miles de toneladas)	1.55	1.60	1.75
Consumo nacional (miles de toneladas)	6.20	6.33	6.76

Fuente: Elaboración propia con datos del siap, el siavi y un Comtrade 2017.

* Representa la participación del valor de la producción de 2016 con respecto al pib agrícola del mismo año.

** Estimaciones realizadas por la Coordinación de Asesores de la Subsecretaría de Agricultura.

*** Estimada con base en la capacidad instalada actual, rendimientos de referencia históricos y considerando que no se incrementará la frontera agrícola reportada en 2016.

Clasificación de Trigo en México

El trigo es el cereal que tiene más esquemas de clasificación por su alta diversidad y los diferentes usos terminales. En México, los trigos se organizan de acuerdo a su funcionalidad en cinco grupos como se describe en la tabla 4. En el área noroeste del país, Sonora, norte de Sinaloa y Baja California Sur se siembran los trigos panaderos y cristalinos pertenecientes a los grupos I, II, IV y V, entre tanto los trigos suaves del grupo III se siembran más en la región del bajo, en el Estado de Guanajuato y en el Estado de Chihuahua (Serna, 2009). Los principales tipos de trigo que se cultivan en México, de acuerdo al tipo de gluten y de mayor demanda son el grupo uno y tres habiendo, sin embargo, mayor crecimiento en la producción de trigos cristalino (Halverson et al. 1988). En la tabla 5 se observa la superficie sembrada de trigo en el ciclo 2018 contra el ciclo 2019 hasta el mes de marzo.

El trigo harinero en el Estado de Sonora ocupa el 20 % de la superficie sembrada, principalmente con las variedades Tacupeto F2001, Kronstad F2004, Roelfs F2007, Onavas F2009 y Tepahui F2009 (INIFAP, 2015). Respecto al trigo duro en Sonora se tiene las variedades de Clarke 2000 (Sémola y pasta), Cirno C2008, Baroyeca oro C2013 (pastas y fideos) (Chávez y colaboradores, 2015). En la Tabla 6 se muestran las características agronómicas de las 8 variedades utilizadas en este estudio.

Tabla 4. Clasificación de granos de trigo en México en función del gluten.

Grupo	Denominación	Características
I	Fuerte	Gluten fuerte y elástico apto para la industria mecanizada de panificación. Usados para mejorar la calidad de trigos débiles
II	Medio fuerte	Gluten medio fuerte para la industria artesana de panificación
III	Suave	Gluten débil poco elástico pero extensible apto para la industria galletera. Usados para mejorar las propiedades de trigos tenaces
IV	Tenaz	Gluten corto o poco extensible pero tenaz, apto para la industria pastelera y galletera
V	Cristalino	Gluten corto y tenaz, apto para la industria de pastas y sopas

Fuente: Serna. (2009).

Tabla 5. Estados con mayor producción de trigo ciclo 2018-2019.

Entidad	Superficie (ha) 2018	Superficie (ha) 2019	Variación % anual	Participación % 2019
Nacional	467,319	529,506	13.3	100.0
Sonora	223,373	260,536	16.6	49.2
Guanajuato	50,312	52,712	4.8	10.0
Baja California	46,610	52,244	12.1	9.9
Michoacán	39,966	47,180	18.1	8.9
Sinaloa	41,676	35,674	-14.4	6.7
Resto	65,382	81,160	24.1	15.3

Fuente: SIAP, (2019).

La producción en el Estado de Sonora

El cultivo de este cereal se realiza principalmente en el sur del estado, en los valles agrícolas del Yaqui y mayo, donde se establecen cada año extensiones superiores a las 250 mil hectáreas con las siembras de trigo. Sonora presenta las mejores condiciones climáticas para la producción de trigo, especialmente durante la temporada de otoño e invierno que proveen al menos 750 horas de frío para el desarrollo del cultivo. Además, dispone de infraestructura productiva como almacenes, vehículos, tractores, sembradoras, cosechadoras, distribuidores de insumos, agua, valles agrícolas nivelados, infraestructura de riego, carreteras, ferrocarriles y puertos para mover la cosecha. Según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO 2011). El trigo que se produce en Sonora representa el 38 por ciento de la superficie cultivada en México y aporta el 50 por ciento de la producción nacional. La producción de trigo panificable tuvo un aumento del 63 % en Sonora, pasando de 250 mil toneladas en el ciclo otoño invierno 2017-2018 a 407 mil toneladas en el otoño invierno 2018-2019 según datos de la Seguridad Alimentaria Mexicana (Segalmex 2019). La tabla 6 presenta las características agronómicas de las variedades sembradas en la región Noroeste de Sonora.

El trigo es el cereal más importante en la alimentación de los mexicanos, que consumen en promedio 57.4 % per cápita al año. El trigo forma el 40 % del total del gasto de los mexicanos en cereales y aporta el 10 % del total de las calorías de la dieta, según datos de la Cámara Nacional de la Industria molinera de trigo. El trigo cristalino representa el 57.79 % de la producción de trigo, con lo que cubre el consumo nacional y a la vez coloca a México como el tercer exportador de este grano a nivel mundial. A diferencia de la producción de trigo harinero, ubicado en áreas más dispersas de México, es insuficiente para complementar la demanda nacional, por lo que existe una necesidad de importar trigo, equivalentes a 74.93% del consumo nacional (SIAP, 2017).

Problemas en la Agricultura del Trigo en Sonora

El cultivo del trigo incrementó a finales de la década de los 60 con el uso de variedades semi-enanas de alto rendimiento, tratadas durante la revolución verde, aunado a las mejores prácticas del cultivo, disminuyendo el hambre y la pobreza en varias partes del mundo. Desde ese

momento la productividad del trigo ha estado disminuyendo a modo constante (FAOSTAT, 2010). Después de esto la producción de trigo se aumentó globalmente en el rendimiento unitario más que por la expansión de la tierra cultivable (FAO, 2013). El rendimiento en ese período estuvo relacionado con mejoras genéticas en el rendimiento, resistencia a enfermedades, la adecuación al estrés abiótico y el desarrollo en las prácticas agronómicas (Reynolds y Bourlag, 2006). Se estima que alrededor del 70 % del incremento en los rendimientos se le atribuye específicamente al mejoramiento genético. Sin embargo, en el último período, la tasa de aumento de la productividad ha ido disminuyendo, con proyecciones lineales que indican un crecimiento de 0.8 % para 2050 (Fischer et al. 2009), asimismo grandes variaciones de rendimiento entre países. Esto aunado que se pronostica que la demanda mundial de trigo aumente más rápido que los beneficios genéticos actuales (Miralles y Slafer, 2007). El agua también es un problema, en países de desarrollo la agricultura consume un 85 %, es necesario producir más alimento en similar volumen de tierra y utilizando menor cantidad de agua. (CIMMYT, 2009).

La roya amarilla del trigo causada por *Puccinia striiformis* f. *sp. tritici* se ha convertido en una enfermedad de importancia a nivel mundial en los últimos años. La resistencia genética en variedades es la estrategia más efectiva para el control de esta enfermedad. En la actualidad existen genotipos de trigo que han mostrado resistencia en diferentes años y ambientes de producción Wellings. (2011). El Centro Nacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), México, D.F., indica que en las últimas décadas el impacto de la mejora genética por resistencia genética ha generado una gran proporción del retorno económico global a la inversión en investigación internacional de trigo (Byerlee y Traxler 1995). Análisis de ensayos realizados en el Valle del Yaqui, Estado de Sonora, México, confirman que el progreso en la protección del potencial de rendimiento a través de la resistencia genética a la roya de la hoja causada por *Puccinia* ha sido aproximadamente tres veces mayor que los avances en el potencial de rendimiento (Sayre et al, 1998). La resistencia genética, en lugar del uso de fungicidas, sigue siendo el principal medio para controlar las royas del trigo. La generación de cultivos con mejor resistencia al estrés biótico y abiótico, en unión con las prácticas de gestión optimizadas se considera como la mejor estrategia para alcanzar este objetivo (Fischer y Edmeades, 2010).

En Sonora los fenómenos meteorológicos cada vez son más agresivos, el rendimiento de la cosecha ha ido disminuyendo y el control de plagas como enfermedades requiere de mayor esfuerzo, es por eso la necesidad de investigar nuevas mejoras genéticas en la semilla e implementar programas para aumentar la productividad en Sonora. Aunque para este año la investigación puede estar en riesgo, por la disminución de presupuesto por la SADER (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural).

Tabla 6. Características agronómicas de las variedades de trigo liberadas

Variedad de Trigo	Características
Bourlag 100	Trigo harinero para el noroeste de México, se originó de la selección en poblaciones segregantes de la cruce Roelfs F2007 y otras líneas. Presenta características muy semejantes a la variedad Roelfs. Tienen un promedio de proteína en grano de 11.9. ha mostrado ser moderadamente susceptible al carbón parcial y punta negra del grano. Es resistente a la roya de la hoja y resistente a la roya amarilla (INIFAP, 2018).
Kronstad F 2004	Trigo harinero Kronstad F2004 moderadamente resistente (MR) a moderadamente susceptible (MS) a la roya de la hoja y (MS) al carbón parcial del grano. Presenta un promedio de 12 % de humedad en el grano. 13.4% de proteína en grano y 11.6% de proteína en harina. se recomienda para el ciclo otoño-invierno en la región del noroeste de México (INIFAP, 2007).
Navojoa M 2007	Trigo harinero primaveral con tolerancia a sequía, resistente a la roya amarilla, moderadamente resistente a la roya de la hoja, MR al carbón parcial. Produce un grano con un 12.5% de humedad contiene un promedio de 12.0% de proteína que varía entre 9.7 y 14.7% (INIFAP 2010).
Norman F2008	Trigo harinero con calidad industrial, se adapta también muy bien a las condiciones climáticas de las zonas productoras de trigo del Noroeste y Bajío, aunado a que es resistente a los diferentes biotipos de roya de la hoja, roya del tallo, roya amarilla o lineal y es resistente al acame (Inforural 2013).
Onavas F2009	Variedad de trigo harinero para el noroeste de México con resistencia a roya de la hoja y alto potencial de rendimiento, MR a roya amarilla y al carbón parcial, moderadamente susceptible a la reacción de punta negra, proteína en grano 11.6 % (PIEAES*, 2009).
Roelfs F2007	Trigo harinero de siembra primaveral, MR a la roya amarilla o lineal, susceptible al carbón parcial. produce un grano que al 12% de humedad contiene un promedio de 12.4% de proteína que varía entre 10.1 y 14.9%. Puede adaptarse en las áreas de riego del Noroeste de México (INIFAP 2010).
Tacupeto F 2001	Variedad de trigo harinero de riego primaveral, apto para la región noroeste del país, susceptible a las razas de la roya amarilla, niveles aceptables de resistencia al carbón parcial. Un grano con 12 % de humedad contiene un promedio de 11.9 % de proteína, varía entre 10.7 y 13.3, apto para la producción mecanizada de pan (INIFAP, 2003).

Villa Juárez F 2009	Trigo harinero desarrollado para la zona noroeste de crecimiento primaveral, resistente a la roya de la hoja. El grano tiene un promedio de 12.2% de proteína en grano y 11% de proteína en harina (INIFAP, 2012).
------------------------	--

Proteínas del Trigo

Las proteínas del trigo tienen una función muy importante en las propiedades funcionales del producto final (Cinco y Moroyoqui, 2001). Existen diferentes criterios para clasificar las proteínas del trigo, estas pueden ser en base a su solubilidad, en base a su tamaño molecular donde encontramos dos tipos: las proteínas monoméricas y poliméricas (Lafiandra y MacRitchie, 1997). Y de acuerdo a su funcionabilidad. En 1907 Osborne clasificó las proteínas de los granos de cereales en base a su secuencia de extracción y diferencia en solubilidad. Osborne realizó diferentes extracciones consecutivas con agua, solución de sal diluida, solución de alcohol y solución de ácidos o álcalis diluidos; con estas separaciones las proteínas pueden clasificarse en albuminas, globulinas, gliadinas y gluteninas. En la Tabla 7 se observan las diferentes fracciones, al igual que el aspecto biológico y funcional. (Goesaert et al 2005). En 1970, Chen y Bushuk añadieron una quinta fracción a las cuatro separaciones originales de Osborne, dividiendo la glutenina en dos fracciones: una soluble en ácido acético diluido (0.05) M y otra insoluble.

Tabla 7. Clasificación de las proteínas según su solubilidad de acuerdo al método de Osborne.

Fracción Osborne	Comportamiento en solubilidad	Composición	Papel biológico	Papel funcional
Albúminas	Extraíbles en agua	Proteínas no del gluten (principalmente monoméricas)	Proteínas estructurales y metabólicas	Variable
Globulinas	Extraíbles en sales diluidas	Proteínas no del gluten	Proteínas estructurales y metabólicas	Variable
Gliadinas	Extraíbles en solución de alcohol	Proteínas del gluten principalmente gliadinas monoméricas y polímeros de glutenina de bajo peso molecular	Proteínas de almacenamiento de la semilla tipo prolamina	Viscosidad a la masa/ extensibilidad
Gluteninas	Extraíbles en ácido acético diluido	Proteínas del gluten principalmente, polímeros de alto peso molecular	Proteínas de almacenamiento de la semilla tipo prolamina	Elasticidad a la masa/tenacidad
Residuo	Sin extraer	Proteínas del gluten (polímeros de alto peso molecular) y proteínas no del gluten poliméricas	Proteínas de almacenamiento de la semilla, tipo prolamina (gluten) y tipo globulinas (triticinas)	Variable

Fuente: Goesaert et al. (2005).

Clasificación en Base a su Solubilidad

En 1907 Osborne clasificó las proteínas vegetales en cuatro grupos de acuerdo a su extracción y solubilidad con distintos solventes; al grupo soluble en agua los llamó albúminas, a los solubles en sal llamó globulinas, gliadinas o prolaminas las solubles en alcohol y glutelinas o gluteninas a las solubles en ácidos o álcalis diluidos (Shewry et al. 1986). La clasificación de Osborne aún es utilizada por los químicos en cereales, debe entenderse que cada una de estas fracciones forman una mezcla de diferentes polipéptidos y estos se traslapan en sus solubilidades, particularmente para las gliadinas y gluteninas (Gianibelli et al. 2001).

Clasificación en Base a su Tamaño Molecular

Las proteínas del trigo pueden separarse en dos grupos según su estado de agregación. Las proteínas monoméricas solubles en alcohol al 70 % a este grupo pertenecen las gliadinas. El segundo grupo son aquellas proteínas insolubles en alcohol llamadas poliméricas, primordialmente las gluteninas (Shewry y Tatham; 1997). Cuando los polímeros de gluteninas aumentan de tamaño aumenta su insolubilidad y disminuye la solubilidad del solvente, debido al acomodo que se va dando entre las moléculas (Sing y MacRitchie, 2001).

Clasificación en Base a su Funcionalidad

Las propiedades que brindan al trigo su funcionalidad son debido a las proteínas que forman el gluten (Tosi et al. 2011). El gluten es una masa elástica, donde el almidón y compuestos solubles son vertidos. Las proteínas del gluten son consideradas tecnológicamente activas, tiene la función al formarse la masa de retener gas y obtener productos horneados y esponjosos (Balderok et al. 2000). La calidad de panificación depende del gluten que se obtiene en la masa, al absorber agua junto con las fuerzas de elasticidad, viscosidad y cohesividad (Wieser, 2007). Son dos tipos las proteínas que forman al gluten, las monoméricas y poliméricas. Las primeras son las gliadinas y segundo las gluteninas (Batey, 2004). Se ha comprobado un mayor efecto en la calidad del pan debido a las subunidades de gluteninas de alto peso molecular (SGAPM) presentes. (Payne y Lawrence 1983), la proporción de glutenina a gliadina, la distribución del peso molecular (MacRitchie 1987) y la cantidad de proteína (MacRitchie 1992).

Proteínas de Almacenamiento

Las gliadinas y gluteninas han sido clasificadas como proteínas de almacenamiento, forman los principales componentes del gluten, un contribuyente principal a las propiedades reológicas y de calidad de pan en las harinas de trigo. Las proteínas del gluten confieren a la masa propiedades viscoelásticas únicas. Las gluteninas son proteínas poliméricas que une los polipéptidos de cada glutenina individual con enlaces disulfuro, conocidos como subunidades. La electroforesis en gel de poliacrilamida (SDS-PAGE) y la cromatografía líquida de alto rendimiento con exclusión de tamaño (SE-HPLC) han determinado dos grupos diferentes de glutenina: Las subunidades de glutenina alto peso molecular y las subunidades de bajo peso molecular SGAPM y SGBPM (HMW-GS y LMW-GS en inglés). Estos dos grupos de subunidades difieren en peso molecular, estructura y composición de aminoácidos; para las SGBPM el peso varía de 23 a 68 kDa y de 77 a 160 kDa, para las SGAPM (Kasarda, 1999). Existe una mayor proporción de SGBPM (3 a 4 veces en peso) que de SGAPM.

Las gliadinas, son proteínas monoméricas, solubles en soluciones acuosas de alcohol, cuyos pesos moleculares abarcan de 30-60 KDa. Las gliadinas clasificadas como α , β , γ tienen enlaces disulfuro intramoleculares, algunos tipos de ω -gliadina pueden estar relacionadas con subunidades de glutenina (Köhler et al. 1993). La gran mayoría de las ω -gliadinas son llamadas prolaminas pobres en azufre (Shewry et al. 1986), no poseen enlaces disulfuro. Ambas gliadinas y gluteninas se sintetizan en el retículo endoplásmico rugoso. Con un péptido de señal que es removido al dirigir el polipéptido al retículo endoplásmico lumen. Las proteínas se pliegan y se unen con enlaces disulfuro dentro del retículo endoplásmico (Shewry, 1996).

Las gliadinas y gluteninas representan entre un 35 y 45 % cada una en peso seco. Estudios genéticos de las proteínas de almacenamiento de trigo se heredan en algunos loci de cada genoma A, B y D. En el brazo largo de los cromosomas 1A, 1B, 1D de los genes de las SGAPM se localizan en los loci Glu-A1, Glu-B1 y Glu-D1 respectivamente (Payne 1987). Los genes de las SGBPM se encuentran en los loci Glu-A3, Glu-B3 y Glu-D3 de los brazos cortos 1AS, 1BS y 1DS (Singh et al. 1988). Los genes que codifican para las ω -gliadinas y varias γ -gliadinas se unen en tres loci homólogos Gli-A1, Gli-B1 y Gli-D1, en el extremo distal de 1AS, 1BS y 1DS, respectivamente. Los loci Glu-1 y Glu-3 que codifican para las SGBPM están muy cercanos

(Pogna et al. 1990). Ciertas ω -gliadinas están codificadas por genes proximales a los loci Gli-1 y se nombran Gli-A4, Gli-A5 y Gli-B3 (Metakovsky et al. 1997a). Las gliadinas α , β y algunas γ están codificadas por genes muy agrupados en un solo locus en cada uno de los brazos cortos de los cromosomas del grupo 6, denominados Gli-A2, Gli-B2 y Gli-D2 respectivamente. Para cada SGAPM y SGBPM los sitios codificadores, SDS-PAGE mostraron un alto grado de polimorfismo tanto en el pan como el trigo duro (Gupta et al., 1990a, 1990b). Varios estudios han mostrado que las variaciones alélicas en SGAPM y SGBPM están relacionadas con diferencias en las cualidades tecnológicas de la harina de trigo (Nieto y Taladriz et al. 1994). Se realizó una colección genética de trigo de base amplia, donde reveló la influencia de la diversidad de SGAPM y las gliadinas en las propiedades reológicas de la masa, como la fuerza, tenacidad y extensibilidad (Branlard et al. 1985a, b).

Proteínas Monoméricas

Las proteínas pueden catalogarse en base a su tamaño molecular: proteínas monoméricas y poliméricas en relación a la unión de un péptido o varios péptidos respectivamente (MacRitchie y Lafiandra 1997). Dentro de las proteínas monoméricas tenemos a las albuminas, globulinas y gliadinas; formadas por polipéptidos de una sola cadena (Southan y MacRitchie, 1999). Las cuales forman enlaces disulfuro intramoleculares (MacRitchie y Lafiandra 1997).

Albuminas y globulinas

Las albuminas son solubles en agua y las globulinas solubles en soluciones salinas, varias de ellas son enzimas, proteínas ribosomales y de membrana o inhibidores de enzimas, forman entre el 15-20 % del total de proteínas. Se encuentran en el embrión y en la capa aleurona. Tienen pesos moleculares menores que las gliadinas, de 12 a 16 KDa para las albuminas y de 20 a 200 KDa para las globulinas, según el análisis por SDS-PAGE (Gianibelli et al., 2001; Bietz y Wall, 1972).

Gliadinas

Son moléculas de forma globular, muy pequeñas, también se les considera como proteínas de almacenamiento, son solubles en etanol al 70 %, tienen atracción con los puentes de Hidrógeno y compuestos hidrófobos (Swanson, 2004), presentan un grupo muy variado cuyos pesos moleculares varían de 11000 a 80 000 D y se dividen en cuatro fracciones (α , β , γ , ω), las

primeras tres fracciones abundan en azufre formando puentes disulfuro intramoleculares, en cambio las ω -gliadinas presentan deficiencia en azufre. Las gliadinas ω y Υ se encuentran agrupadas en tres loci homólogos: Gli-A1, Gli-B1 y Gli-D1, localizados en los extremos de los brazos cortos de los cromosomas 1AS, 1BS y 1DS respectivamente (Singh et al 1988). Con respecto a su función, estas contribuyen a la viscosidad y extensibilidad del gluten, poseen bajo contenido de lisina afectando la calidad nutricional de las proteínas del trigo (Gianibelli et al. 2001).

Proteínas Poliméricas

Las proteínas poliméricas conocidas como gluteninas son las proteínas más largas, algunas de ellas tienen hasta 20 subunidades unidas por puentes disulfuro intracatenarios, con pesos moleculares alrededor de un millón de Daltons (Wrigley y Morris, 1996), se pueden establecer interacciones no covalentes con el Hidrógeno y las gliadinas (Belton, 2005); estas proteínas a su vez se clasifican en: Gluteninas de alto peso molecular (GAPM) y gluteninas de bajo peso molecular (GBPM).

Gluteninas de alto peso molecular

Los trigos hexaploides cuya fórmula genómica es AABBDD existen 7 pares de cromosomas en cada genoma diferente, formando 21 pares de cromosomas (Payne 1987). Ciertos genes localizados en los brazos largos de los cromosomas 1A, 1B y 1D (clasificados Glu-A1, Glu-B1 y Glu-D1, respectivamente regulan la síntesis de subunidades de gluteninas de alto peso molecular del trigo (*Triticum aestivum*). Forman el 10 % del total de las prolaminas. Cada locus Glu-1 consiste en dos genes ligados, designados tipo (x) y tipo (y), sumando 6 genes que codifican la síntesis de GAPM, a veces los genes 1Ay, 1By aunado en ocasiones el gen 1Ax, no se expresan (Yang et al. 2006). Las subunidades tipo (x) tienen mayor tamaño molecular, con una región repetitiva ligeramente más grande y menor movilidad electroforética en gel de poliacrilamida; en cambio las subunidades tipo (y) presentan menor tamaño molecular y una movilidad ligeramente mayor (Gianibelli *et al.* 2001). En la figura 3 se observa la localización de los pares de cromosomas.

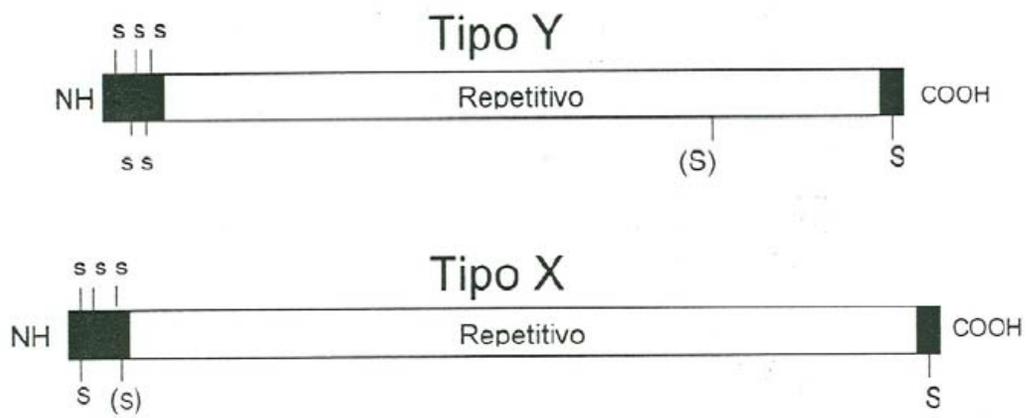


Figura 3. Subunidades de glutenina D1, 5+10 cuya síntesis se expresa por el gen 5x y el gen 10 y. Fuente: Shewry et al. (1992).

El centrómero divide a los cromosomas lineados en dos regiones formando los brazos que son llamados brazos largos y cortos en el trigo representados en la figura 4 (MacRitchie y Lafiandra, 1997). El locus Glu-A1 puede codificar para uno o ninguna subunidad, mientras que los loci Glu-B1 y Glu-D1 codifican para 1 o 2 subunidades de modo que una variedad de trigo hexaploide puede contener hasta 5 subunidades diferentes de gluteninas (Payne et al., 1981). Estas subunidades contienen aproximadamente un 35 % de glutamina (Q), un 20 % de glicina (G), y un 10 % de prolina (P) (Singh y Khatkar 2005). Son difícil de solubilizar por su alto grado de hidrofobicidad (Cinco-Moroyoqui y MacRitchie, 2008). Estudios anteriores en solubilidad de péptidos con secuencias correspondientes a las regiones terminales de N- y C- de estas proteínas, han comprobado que la terminal N- es la responsable de la insolubilidad de las GAPM (Bekkers et al. 1988). En la Figura 5 podemos ver modelo representativo.

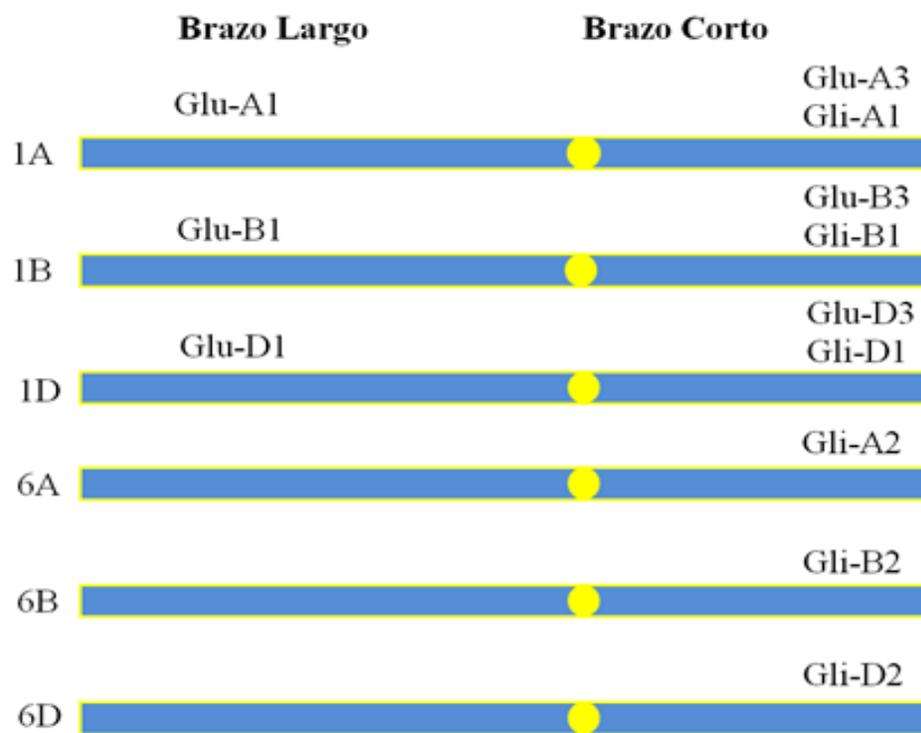


Figura 4. Localización cromosómica de los principales grupos de proteína en trigo hexaploide.

Fuente: (Payne 1987)

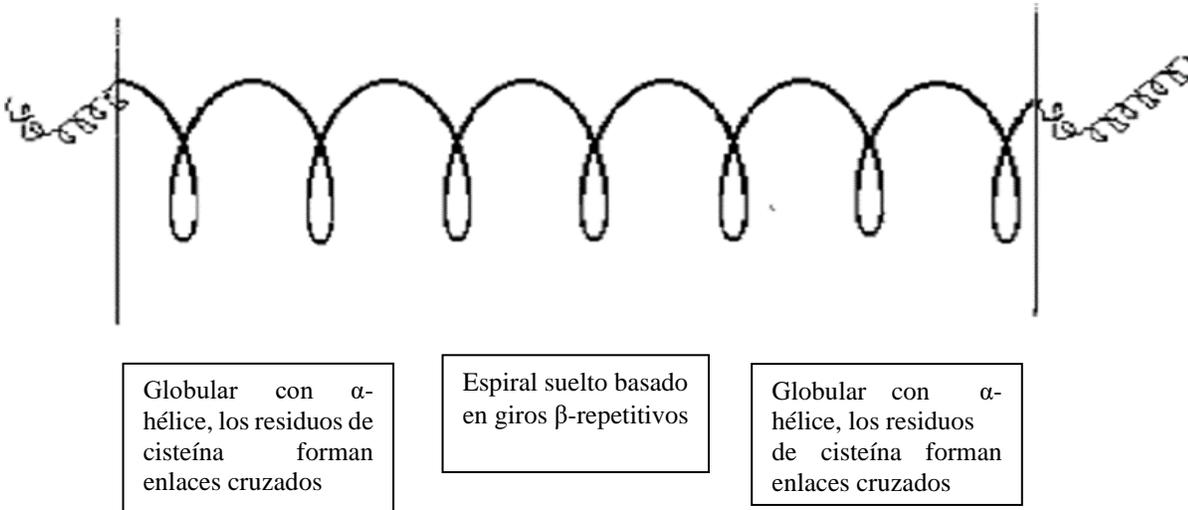


Figura 5. Estructura de las proteínas monoméricas.
Fuente: (Gianibelli 2001).

Gluteninas de bajo peso molecular

Las gluteninas de bajo peso molecular comprenden las subunidades B, C y D, abarcan la tercera parte del total de las proteínas, clasificadas ocupan el segundo lugar de abundancia en las proteínas de almacenamiento, después de las gliadinas (Singh et al 1991). Forman el 40 % de las proteínas de reserva en el endospermo del grano de trigo. Los genes se encuentran en tres locus *Glu-A3*, *Glu-B3* y *Glu-D3* en los brazos cortos de los cromosomas 1AS, 1BS y 1DS, respectivamente (Singh *et al.*, 1988). En la estructura primaria de las gluteninas de bajo peso molecular se encuentran los residuos de cisteína que permiten la formación de polímeros de cadenas prolongadas (subunidades con dos o más residuos de cisteína unidos por enlaces disulfuro intermoleculares) y polímeros cortos (únicamente con un residuo de cisteína unido por un enlace disulfuro intermolecular). Las cadenas prolongadas permiten la formación de masas fuertes (Gianibelli *et al.*, 2001).

Importancia de las Gluteninas en la Panificación

La calidad panadera de una harina, así como sus propiedades de mezclado en el amasado son determinadas por la cantidad y calidad de las proteínas. Resulta más difícil evaluar la calidad de la proteína que su cuantificación, se requiere de varios métodos para su determinación y al final la prueba de panificación; por lo general la calidad de la harina de trigo está basada en las propiedades viscoelásticas de la masa, por lo que es indispensable obtener masas fuertes, elásticas y extensibles para la panificación o producto. Después de hornear, las mediciones del volumen final del pan forman parte directa de la caracterización de la calidad panadera de la harina. Finney (1948) relacionó el contenido relativo de las proteínas de los cereales con un alto volumen de pan, Simmonds (1989) obtuvo resultados similares. Es importante la búsqueda de mejores trigos capaces de producir harinas con diferentes fuerzas y requerimientos del mezclado (Pomeranz 1988). Las proteínas del gluten (gliadinas y gluteninas) de trigo son importantes para la producción de pan y diversos usos en los alimentos porque imparten propiedades reológicas únicas. La gliadina es cohesiva, extensible, pero de baja elasticidad; mientras que la glutenina es de baja extensibilidad, pero es cohesiva y elástica,

por lo que contribuye a la fuerza de la masa (Humphris; et al 2000). Las gluteninas de alto peso molecular son las que dan la fuerza, elasticidad y el tiempo de mezclado (Weegels et al. 1996). En cambio, las gliadinas se les asocia con la extensibilidad, no muestran efecto directo en la fuerza de la masa y tienen bajo contenido de lisina, afectando la calidad nutricional de las proteínas del trigo (Gianibelli et al. 2001).

La variación de las gluteninas se basa en dos condiciones:

- 1) Relación de las gluteninas y gliadinas; y la más importante
- 2) Como se distribuye el peso molecular en las gluteninas. (Cinco Moroyoqui y MacRitchie, 2008).

La variación alélica en las subunidades (5+10) del locus glu-D1 de las gluteninas, están asociadas con la buena calidad de la masa y las subunidades (2+12) codificada por el genoma D en trigos panaderos se les atribuye una calidad de masa débil. (Payne et al 1981), (Branlard y Dardevet 1985), (Gianibelli et al 2001). Las subunidades 1, 2*, 7+8, 7+9, 13+16, 17+18 tienen efecto positivo en la calidad de las harinas, en cambio las subunidades 1Dx2 + 1Dy12 se ha asociado con una mala calidad de la panificación, especialmente con la resistencia de la masa (Payne, 1987; Payne y Lawrence, 1983 *et al.*, 2002; *et al.*, 2004). En otros estudios encontraron que los pares alélicos (Glu-B1, subunidades 17+18 fuertes, contra subunidades 20x+20y débiles. Las diferencias son debidas al tamaño molecular de los polímeros de glutenina por deducción en las mediciones de solubilidad (Gupta y MacRitchie, 1994). Se pueden hacer combinaciones alélicas para fortalecer el gluten. (Payne y Lawrence, 1983) Existen diferencias en las variedades de trigo en cuanto al tipo y cantidad de subunidades de gluteninas presentes (Hou y Ng., 1995). A estas subunidades se les ha designado un número que va del 1 al 4, siendo el numero 4 el valor más alto que le confiere mayor calidad a las proteínas (Payne et al. 1987). La tabla No. 8 muestra la numeración para determinar la calidad de panificación en las diferentes subunidades de gluteninas HMW (Payne y Lawrence 1983). Las subunidades de Gluteninas de APM y las subunidades de Gluteninas de BPM son consideradas como importantes señaldadores de calidad en las masas por ser responsables de la cantidad, distribución y tamaño de los polímeros que forman las gluteninas (Hou y Ng, 1995). Estudios revelan que de acuerdo a su efecto en calidad

en elaboración de pan; Glu-1, ejerce más efecto que Gli-1 y este a su vez tiene más efecto que Gli-2 (Pomeranz, 1990).

Métodos Utilizados para el Análisis de las Proteínas de Trigo

Determinación de la Proteína Polimérica

Electroforesis en gel de poliacrilamida

La electroforesis es una de las técnicas más importantes para el análisis de proteínas, separa diversos tipos de proteínas tanto vegetales como de animales de diferentes tamaños y de varias muestras representativas (Shewry *et al.* 2003). Las proteínas tienen grupos químicos ionizables que aportan una carga eléctrica determinada. Cuando las proteínas son sometidas a un campo eléctrico, migran de un polo a otro a distinta velocidad, debido a su tamaño. La corrida electroforética es realizada sobre un soporte sólido (Calaveras, 2004). Para la separación de las biomoléculas se utiliza la poliacrilamida como soporte. La poliacrilamida puede formar geles no iónicos, transparentes que ayudan a visualizar las bandas durante el desarrollo de la corrida. Al modular la concentración de los polímeros se puede controlar el tamaño del poro. Con la técnica SDS-PAGE se puede identificar la expresión de gluteninas de alto y bajo peso molecular, como se muestra en la tabla 7. La electroforesis puede utilizarse para identificar sustancias, obtener una buena resolución de sus componentes a analizar y caracterizar bioquímicamente a las proteínas poliméricas (Gianibelli *et al.* 2001). La técnica SDS-PAGE no proporciona información de como las unidades de polipéptidos interaccionan para obtener grandes polímeros de gluteninas. Por lo cual se requiere de otras técnicas que ayuden a complementar los análisis de electroforesis.

Determinación de la Proteína Monomérica, Fracción Albúmina

Método de Lowry-Hartree

La determinación de proteína que actualmente se realiza es el método de Hartree-Lowry (modificación del método de Lowry) donde se utiliza un espectrofotómetro para la cuantificación de proteínas por presentar ventajas en la sensibilidad, con un límite de detección del orden de 15 µg de proteína, buena precisión y fácil implementación. El ion cobre divalente

del $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ en condiciones alcalinas forma un complejo con los enlaces peptídicos y el ion cobre es reducido a cobre monovalente, este cobre al igual que los grupos radicales de los aminoácidos tirosina, triptófano y cisteína al reaccionar con el reactivo Folín Ciocalteau forma un producto inestable de color azul compuesto por molibdeno/tungsteno. La concentración de proteína es proporcional a la intensidad del color azul (Hartree, 1972).

Tabla 8. Clasificación para determinar la calidad panificable de las diferentes subunidades.

HMW-SG Clasificación	Cromosoma		
	1A	1B	1D
4	-	-	5+10
3	1	17+18	-
3	2*	7+8	-
2	-	7+9	2+12
2	-	-	3+12
1	N	7	4+12
1	-	6+8	-

Fuente: (Payne y Lawrence; 1983).

Pruebas Funcionales

El Alveógrafo

El alveógrafo es una técnica reológica utilizada para probar la masa de harina de trigo bajo condiciones de mezclado, la masa se extiende y se corta en una pieza circular, después de un tiempo de reposo es sometida a una fuerza biaxial al inflar en forma de burbuja hasta que no soporta la presión y se rompe. Esta presión es medida en un manómetro y queda registrado en una gráfica en función del tiempo. La extensión obtenida durante el inflado de la bomba de la masa sirve de señal como una ventaja de la prueba alveográfica de la capacidad de estiramiento, donde las masas se someten a deformaciones de tensión simple.

La extensión biaxial físicamente está relacionada con la expansión de las células de gas en la masa ascendente en la etapa de la fermentación y en el inicio de la cocción y, por lo tanto, puede ser útil para evaluar la calidad general de la harina. Scott Blair y Pottel (1937) Encontró la relación de la sobrepresión con la viscosidad de la masa y la consideró como una magnitud de la capacidad que tiene la harina para absorber agua. (ISO 1983) define la sobrepresión \underline{P} como un indicador de la resistencia de la deformación de la masa. La abscisa L es considerada como la medida de la extensibilidad de la masa. La proporción obtenida al dividir la P entre la abscisa L fue utilizada por varios investigadores un medio útil para predecir la calidad de la harina (Maes y Pirotte 1957, Chopin 1962). Se asignó el peso S al área bajo la curva de la cual se puede derivar la energía de deformación \underline{W} , que indica la energía necesaria para inflar la masa hasta romperse (Chopin 1927). El índice G en reología de la masa puede considerarse dependiente del producto de las propiedades descritas como elasticidad o ausente de elasticidad, se observa el equipo y los Alveogramas en la Figura 7.

Conclusiones de algunos estudios puede no ser necesariamente aplicable a las harinas de trigo blando y su comportamiento funcional en sistemas como masa para pasteles y masa para galleta. En México el alveógrafo es una de las técnicas más utilizadas, pero no proporciona la información adecuada para predecir la calidad panadera de una harina. Es un instrumento útil para diferenciar la calidad de las harinas o para determinar el uso final de estas (Rodriguez y Castillas, 1984).

El Farinógrafo

El Farinógrafo es un instrumento que mide la consistencia de una masa al ejercer una fuerza suficiente para mezclar a velocidad constante y absorción de agua necesaria para lograr esta consistencia. El principio de medición se basa en el registro de la resistencia que la masa opone a una acción mecánica constante con características de prueba invariables. La resistencia es representada sobre un diagrama de esfuerzo-tiempo en el momento de la formación de la masa y a lo largo de todo el período de la prueba (Quaglia, 1991). Entre los parámetros que normalmente se determinan en el análisis están: absorción e agua, estabilidad y tiempo de desarrollo Figura 7. Algunos investigadores (Wan y Kovacs, 2002) usan el tiempo de desarrollo para relacionarlo con fuerza del gluten en trigos cristalinos; sin embargo, esta técnica tiene mayor aplicación cuando se trabaja con trigos hexaploides. El tiempo de desarrollo (en min) se define como tiempo justo para que una masa alcance su máxima consistencia. Existe una relación entre el tiempo y el gluten: a mayor tiempo tendrá un gluten más fuerte (Quaglia, 1991).

El Mixógrafo

El Mixógrafo se desarrolló para simular el movimiento mezclador más enérgico que se usa en las panaderías estadounidenses para lidiar con los trigos más fuertes (Walker y Hazelton 1996). En este caso el Farinógrafo no era apropiado para la faena porque fue desarrollado para trigos europeos más débiles. El Mixógrafo es un pequeño instrumento mezclador de masa de alta velocidad, registra la resistencia y determina el comportamiento de la masa en la panificación (Finney y Shogren, 1972). Las curvas del Mixogramas muestran el cambio de las propiedades plásticas, elásticas y viscosas de la masa durante el mezclado. Al iniciar la curva, el agua se pone en contacto con la harina y es absorbida por la proteína y el almidón y debido a la fuerza del plegado y estiramiento de los pernos de mezcla, la masa comienza a desarrollarse, conforme se va desarrollando la masa, la fuerza necesaria para mover los pasadores a través de la masa aumenta a un movimiento máximo. Este punto en la gráfica le corresponde a la parte superior de la curva. Después de este punto, la disminución mecánica de la masa causa un aumento en la movilidad que hace que la curva se incline hacia abajo y se desplace. (Jhonson et al. 1943; Shuey, 1974). Las características de la masa se cuantifican mediante los parámetros: tiempo pico (T), altura máxima (H), pendiente de desarrollo (D), pendiente de debilitamiento (W) y ángulos de las pendientes de desarrollo y debilitamiento. El tiempo pico es cuando la masa

logra su máxima resistencia a la extensión (altura máxima), o el tiempo óptimo de mezclado. Combinar la masa al máximo se ha correlacionado con un alto volumen de pan Figura 8. Diferentes cultivares de trigo logran producir tiempos de mezcla óptimos que varían ampliamente.

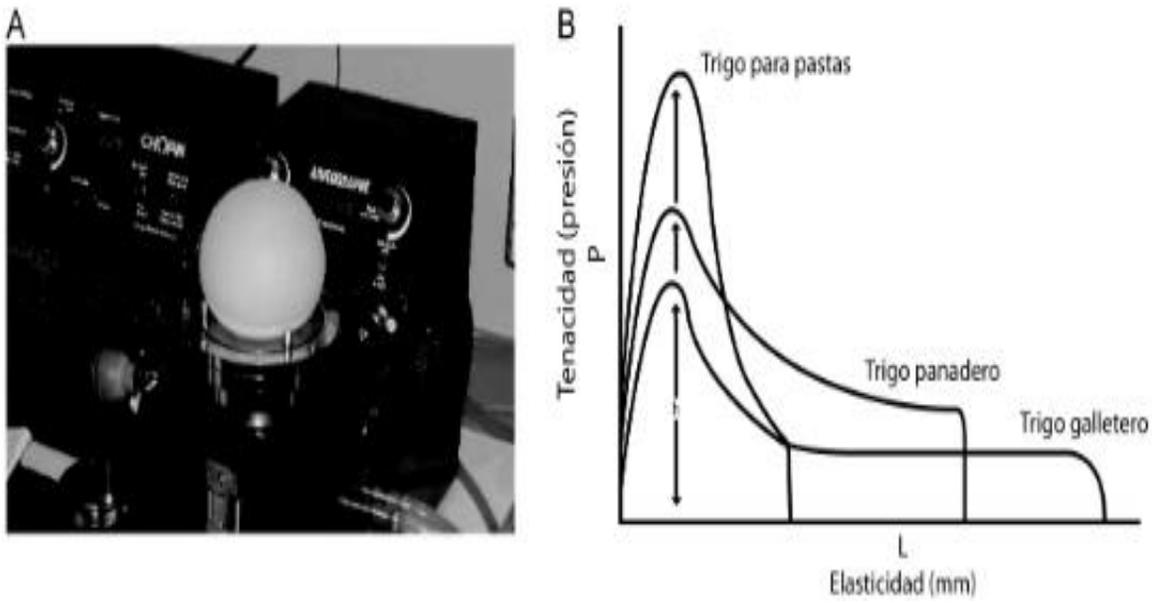


Figura 6. (A) alveógrafo Chopin y (B) Alveogramas típicos
(Wheat and Flour Testing Methods 2004)

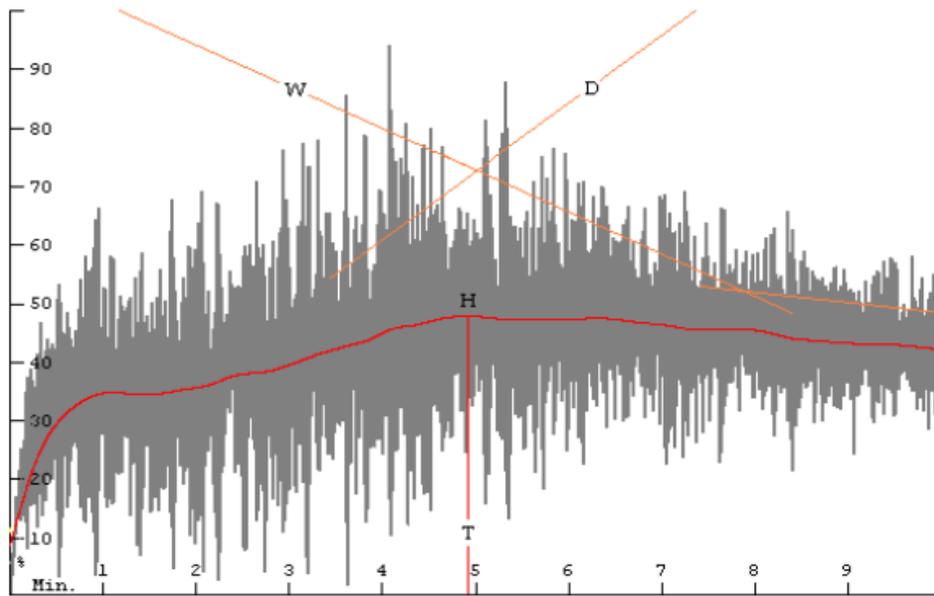


Figura 8. Mixograma típico de una masa de harina de trigo fuerte que muestra el tiempo pico (T), la altura máxima (H), la pendiente de desarrollo (D) y la pendiente de debilitamiento (W).
 Fuente: Summer Steeples, 2010.

Pruebas Reológicas

Para describir la calidad de panificación se debe tener en cuenta del trigo tres requisitos: calidad física, calidad molinera, y calidad panadera. La calidad física incluye un grano limpio, sano y de buen llenado (Hugo y Godiño 2000). Para la calidad molinera se obtiene cuando se produce un elevado porcentaje de harina de excelente calidad para su uso final, sin añadir aditivos. Dentro de la calidad panadera o productos derivados, se considera de buena calidad cuando tiene propiedades que permiten elaborar un pan deseable, según los requisitos del panadero y el consumidor. Las pruebas de panificación son una de las más consideradas para valorar la calidad de la harina de trigo. En esta prueba se obtienen datos importantes como la absorción óptima de agua, tiempo óptimo de mezclado, textura de la masa mediante los períodos de fermentación, peso, rendimiento de pan, volumen y densidad aparente del pan (Serna, 1996). La reología permite explicar la estructura o composición de alimento haciendo un análisis de los cambios que ocurren en un proceso. Así mismo ayuda a conocer el control de calidad en productos intermedios y finales para evaluar la aceptación de los productos. (Rao y Steffe, 1992, Weipert et al 1993). En la figura 9 se observa un esquema del control de calidad de panificación con los materiales y procesos involucrados.

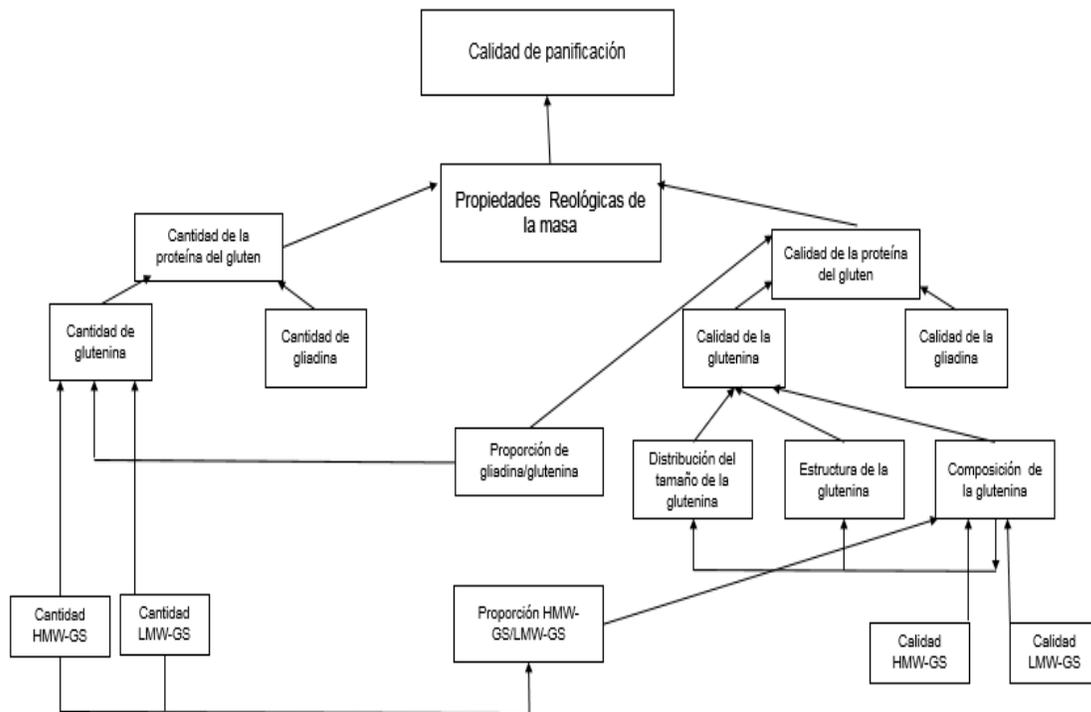


Figura 9. Factores que gobiernan la calidad del pan y las propiedades reológicas del trigo (adaptada de Veraverbeke y Delcour, 2002).

HIPÓTESIS

Los trigos panaderos que se cultivan en la región agrícola del Estado de Sonora no contienen todas las GAPM que imparten características de calidad funcional deseables en la industria de la panificación y por ello requieren hacer mezclas de harinas para obtener productos de calidad deseable.

OBJETIVOS

Objetivo General

- Analizar la composición de gluteninas de alto peso molecular de trigos hexaploides sonorenses.

Objetivos Específicos

- Identificar las Gluteninas de alto peso molecular en trigos sonorenses.
- Relacionar la presencia de las gluteninas de alto peso molecular con propiedades funcionales y de panificación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia Prima

Los trigos hexaploides que se utilizaron en el estudio fueron de la cosecha 2016-2017 obtenidos del Banco de Semillas del INIFAP (Estación Experimental Agrícola “Dr. Norman E. Bourlag”, Cd. Obregón, Son., México). Para la realización de este trabajo se utilizaron ocho variedades de trigos panaderos identificados como: Villa Juárez, Kronstad, Onavas, Bourlag, Navojoa, Norman, Roelfs y Tacupeto. Las muestras fueron almacenadas en el laboratorio de bioquímica del Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos de la Universidad de Sonora (DIPA). Los trigos fueron limpiados con un limpiador de granos (Modelo M2BC, marca Clipper) para extraer toda materia extraña. El trigo ya limpio fue colocado en bolsas de plástico almacenado a temperatura de refrigeración (4 °C) hasta su uso.

Obtención de la Harina

Para la preparación de la harina se determinó la humedad del grano según el método 44-40 de la AACC (2000) y posteriormente se acondicionó a una humedad del 14 %, por 24 horas por el método 26-95 de la AACC (2000). Para la obtención de la harina se utilizó el molino experimental (marca Brabender, Modelo Quadrumat Senior). Una vez obtenida la harina fue colocada en bolsas de plástico para después almacenar por un tiempo de 15 días para su maduración.

Análisis Químico y Reológico de las Harinas de Trigo

La metodología aplicada para el análisis químico de las harinas de trigo recomendada por la AACC (2000) son las siguientes: contenido de humedad, contenido de proteína y para las pruebas reológicas se utilizó el Mixógrafo, prueba de panificación y volumen de pan

Contenido de Humedad

La determinación del contenido de humedad se llevó a cabo por el (método 44-40)

Contenido de Proteína

El contenido de proteína se determinó por digestión utilizando el método de Kjeldahl. Los valores de nitrógeno fueron convertidos a proteína multiplicando por el factor de conversión 5.7 se utilizó para el contenido de proteína el Método 46-13 de la AACC (2000)

Mixograma

La cantidad de muestra para los Mixogramas fue de 35 g obtenidos por duplicado mediante el método 54-40A de la AACC 1995, con el Mixógrafo (National Manufacturing, Inc.; NJ). Normalmente, en este análisis se evalúa: área bajo la curva, altura de la curva, ángulo y grosor de los segmentos, antes y después del punto óptimo de desarrollo. En esta investigación sólo se reporta el tiempo de desarrollo mixográfico (TDM).

Prueba de Panificación

La elaboración de pan se llevó a cabo siguiendo el método 10-10 de la AACC (2000), el cual fue realizado en el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD) de Hermosillo, Sonora. México. Para obtener el pan se utilizaron 35 g de harina (14 % b.h.), 3.83 ml de solución azúcar-sal, 1.2 ml de manteca tibia, 0.7 g de levadura y la cantidad de agua ajustado para el Mixógrafo. Los ingredientes fueron batidos en una mezcladora (National Manufacturing División Lincoln, NE, USA), posteriormente la masa fue introducida en la cámara de fermentación (marca National MFG Company) a una temperatura de 30 °C y una humedad relativa de 75 y 80 %. Después de reposar 52 min fue ponchada la masa con una abertura de 2.5 mm en una ponchadora (marca National MFG) de nuevo se colocó en la cámara de fermentación. Transcurridos 25 minutos la masa fue ponchó por segunda vez con una abertura de 2.5 mm, se llevó a la cámara por 13 minutos, se ponchó a 1.8 plg. Después se moldeó y se llevó a la cámara por 40 min. El horneado fue a 200 °C por 17 minutos. Una vez horneado fue pesado en balanza eléctrica e inmediatamente el volumen se tomó por desplazamiento de semilla de nabo (marca National MFG Co. modelo PUP). Las determinaciones complementarias fueron: contenidos de proteína, Mixogramas, volumen de pan.

Volumen de Pan

El volumen de pan se midió después de hornear por desplazamiento de semilla de nabo, en un medidor de volumen de pan (Marca National MFG Company, modelo PUP) con volumen de calibración de 400 cc.

Análisis de las Proteínas del Trigo

Extracción de la Proteína Polimérica

Para la extracción de las gluteninas, primero se eliminaron las proteínas monoméricas, se pesaron 10 mg de las harinas utilizadas en tubos de Eppendorf con 500 μ L de buffer Tris base 0.08 M, pH 8.0 + 500 μ L de alcohol propílico, todas fueron agitadas mecánicamente por 15 min a temperatura ambiente con un agitador (Marca Vortex, Modelo Genie Z, Scientific, Industries, New York, USA), nivel de poder 4. después fueron centrifugadas por 30 min a 10 000 rpm (Marca Hermie modelo Z216MK, Hermie Labor technick GmbH, Germany). La metodología de extracción de proteína soluble e insoluble se realizó según lo describe Singh et al (1991). El sobrenadante anterior fue eliminado, la extracción se realizó 2 veces después, al residuo se le añadió 500 μ L de buffer Tris + 500 μ L de propanol en los tubos Eppendorf para ser agitados 15 min mecánicamente, seguido de otros 15 min en la centrifuga, el líquido se eliminó. Al residuo o pellet se le adicionó 100 μ L con buffer de extracción de gluteninas (buffer Tris base 0.08 M, pH 8.0 + β -mercaptoetanol 5 % + SDS 0.5 %) y 100 μ L de propanol, la proteína polimérica y los reactivos fueron agitados mecánicamente por 10 min y centrifugados a 10 000 rpm por 10 min. El sobrenadante fue decantado en un nuevo tubo Eppendorf y guardado en refrigeración para posteriormente obtener las diluciones para los geles de poliacrilamida.

Electroforesis Disociante en Gel de Poliacrilamida

Para analizar las subunidades presentes en las muestras de harina panadera, se utilizó electroforesis desnaturizante y reductora (SDS-PAGE), consiguiendo la separación de las gluteninas de alto peso molecular. La electroforesis fue corrida en una cámara MiniProtean II (Bio Rad) con un voltaje de 200 V alrededor de 50 minutos según el método de Laemmli (Laemmli, 1970) con unas modificaciones por Lookhart (1982). Las dimensiones del gel fueron de 7 cm (L) x 8 cm (W) y 0.75 de grosor. Los geles utilizados fueron homogéneos, el gel de

separación fue preparado con una concentración final de acrilamida del 10 %, pH 8.8. Para el gel superior (Stacking gel) un pH 6.8 de concentración final de acrilamida de 4 %. Para la dilución se tomaron 10 μ L de muestra y 90 μ L de buffer muestra, en cada pozo se inyectaron 10 μ L de muestra. Los geles fueron teñidos y desteñidos por el método de tinción de plata, Blum *et al.* (1987).

Para la identificación de las subunidades de glutenina de alto peso molecular (SGAPM) las harinas fueron comparadas, con las bandas conocidas de patrones electroforéticos de harinas estándar (Lookhart y Jones 1982). A los patrones de las bandas de cada variedad de SGAPM se le asignó el correspondiente número de identificación de la nomenclatura de Payne (Payne *et al.*; 1984).

Calificación Según la Calidad de las SGAPM (Glu-1 Score)

Para calificar la calidad se utiliza la puntuación (Glu-1 score, por sus siglas en inglés), según Payne y colaboradores (1987). El procedimiento es asignar una calificación a cada subunidad o par de subunidades expresada en las bandas de cada variedad, después los valores o calificaciones se suman. Ver las cantidades en la tabla 8. La calificación más alta es 4, dada para el par de subunidades 5+10. El valor de 3, corresponde a la subunidad 1 y 2* y las subunidades pares 7+8, 17+18, y 13+16. Se da una calificación de 2, a los pares 7+9, 2+12 y 3+12. Finalmente se proporciona una calificación de 1, a las subunidades codificadas por un alelo nulo del cromosoma 1A, así como el par de subunidades 6+8 y a la subunidad 20, codificada por el cromosoma 1B. Por ejemplo, la variedad Kronstad con subunidades 1/2*_5+10, recibe una calificación de 10, por ser el valor más alto.

Extracción de Proteína Monomérica

Se pesaron 20 mg de grano molido y se añadió 1 ml de agua destilada, luego se agitó en Vortex por 1 hora, después se centrifugó la muestra a 10 000 rpm por 1 hora a temperatura ambiente y se extrajo 150 μ L del sobrenadante para el análisis de proteínas.

Cuantificación de la Proteína Monomérica

Las albúminas solubles en agua al ser tratadas con hidrólisis alcalina y soluciones estándares fueron cuantificadas por el método de Hartree-Lowry, el cual consistió en la adición de 0.85 ml

de agua destilada y 0.9 ml de reactivo A (hidróxido de sodio 0.5 N, carbonato de sodio 0.91 M y tartrato de sodio y potasio 7 mM), seguido de una incubación a 50 °C durante 10 minutos, segundo adicionar 0.1 ml de reactivo B (hidróxido de sodio 0.1 N, sulfato de cobre pentahidratado 40 mM y tartrato de sodio y potasio 70 mM) dejar a temperatura ambiente por 10 minutos y tercero la adición de 3 ml de reactivo C (reactivo del fenol según Folin-Ciocalteu: con 15 volúmenes de agua destilada) agitar en el Vortex por 3 seg e incubar a 50 °C por 10 min. Por último, medir las absorbancias en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 650 nm.

Análisis Estadístico

Los datos fueron analizados por medio del análisis de varianza de una vía, utilizando el programa estadístico JMP 5.0. Los valores promedios fueron comparados por el método de rango múltiple de Tukey empleando un nivel de confianza del 95 %. Además, se llevaron a cabo correlaciones simples (r) entre las distintas pruebas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización Química y Reológica de las Harinas de Trigo

Contenido de Humedad

Los contenidos de humedad en las harinas de las diferentes variedades de trigo se muestran en la Tabla 8, donde se observa que el porcentaje más alto en humedad lo obtuvo la variedad Navojoa con un porcentaje de 13.37 %, encontrándose este valor dentro del rango según la FAO (1985) hasta un máximo de 15.5 %.

Contenido de Proteína

En el contenido de proteína en las harinas de trigo se obtuvieron valores en un rango de 11.35 a 13.75 en BS. Los valores promedio de estas determinaciones fueron diferentes al reportado en la literatura el cual está en un 13 - 15% según (Calaveras, 2004). En la tabla 9 podemos observar que el mayor porcentaje de proteína en base seca lo tienen Roelfs y Tacupeto con un valor de 13.72 y 13.75 respectivamente y de menor valor Bourlag y Onavas con 11.35 y 11.64, después le siguen Navojoa, Norman, Villa Juárez, Kronstad.

Según estudios realizados por Vázquez Lara y colaboradores en el 2009 en 10 líneas experimentales de trigo provenientes del campo INIFAP ciclo 2002-2003, el porcentaje de proteína varió de 8.82 a 13.55 de proteína, los valores obtenidos en esta investigación coinciden en ese rango.

Tabla 9. Determinación del contenido de humedad y proteínas de las harinas de trigo (*Triticum aestivum*).

Variedad	Humedad (%)	Proteína base	
		Húmeda (%)	Seca (%)
Bourlag	8.51±0.03 ^c	10.38±0.12 ^c	11.35±0.13 ^d
Onavas	8.76±0.03 ^c	10.62±0.05 ^{b,c}	11.64±0.06 ^{c,d}
Kronstad	8.54±0.24 ^c	10.9±0.24 ^b	11.93±0.23 ^c
Villa Juárez	8.54±0.14 ^c	10.94±0.29 ^b	11.96±0.30 ^c
Norman	12.75±0.11 ^b	11.00±0.11 ^b	12.6±0.07 ^b
Navojoa	13.37±0.14 ^a	11.04±0.00 ^b	12.73±0.02 ^b
Roelfs	12.81±0.07 ^b	11.85±0.23 ^a	13.72±0.08 ^a
Tacupeto	12.61±0.05 ^b	12.14±0.32 ^a	13.75±0.16 ^a

Promedio ± desviación estándar. Letras diferentes en superíndice indican diferencias significativas entre variedades en la misma columna ($P \leq 0.05$, n=3).

Análisis de los Mixogramas de las Harinas de Trigo.

En esta prueba se obtuvo el tiempo de desarrollo mixográfico de la masa en minutos. Se observan en la tabla 12 cuatro grupos que presentan TDM parecidos, tenemos el primer grupo Norman y Navjoa con 2.07 y 2.21; el segundo grupo Tacupeto y Roelfs 3.10 y 3.11; el tercer grupo Kronstad y Villa Juárez con 4.40 y 4.75 y el cuarto grupo Onavas y Bourlag con 5.10 y 5.40. Los valores de TDM y el volumen de pan no presentan una relación proporcional; que indique que si aumenta el TDM también aumenta el volumen. Considerando la composición de las subunidades de glutenina de alto peso molecular 5 + 10, 17 + 18, 1 y 2 * tienen efecto positivo sobre el tiempo de mezclado y la fuerza de la masa. Las subunidades 2 + 12 también se relacionaron positivamente con un tiempo de mezcla regular. Los efectos positivos como negativos pueden atribuirse a las diferencias de calidad coaligado con alelos específicos de las SGAPM. Gupta y MacRitchie (1994) comunicaron que las subunidades de glutenina de alto peso molecular 5 + 10 y 2 + 12, 17 + 18 y 20, también 1 y 2 * se producen en cantidades similares. Llegaron a la conclusión de que las discrepancias cualitativas en estas subunidades son responsables de sus diferentes efectos sobre el tiempo máximo de desarrollo de la masa en el Mixógrafo y los valores de resistencia máxima (Rmax) del extensógrafo. Finney y Shogren (1972) mostraron una inversa relación del contenido de proteína con el tiempo de mezclado arriba del 12 % del contenido de proteína, pero si aumenta aún más el contenido de proteína no influye en el tiempo de mezclado. La calidad y cantidad de proteínas tienen un papel importante en la masa para una retención de gas eficiente durante la fermentación y las primeras etapas de la cocción.

En la figura 10 están representados los Mixogramas de las diferentes variedades de harina panadera. La fuerza que tiene la masa va a depender del tipo de subunidad de gluteninas, la proporción de glutenina a gliadina, y la distribución del peso molecular con la cantidad de proteína y la variación alélica que exprese el genoma del trigo (Payne y Lawrence 1983; MacRitchie 1987; MacRitchie 1992).

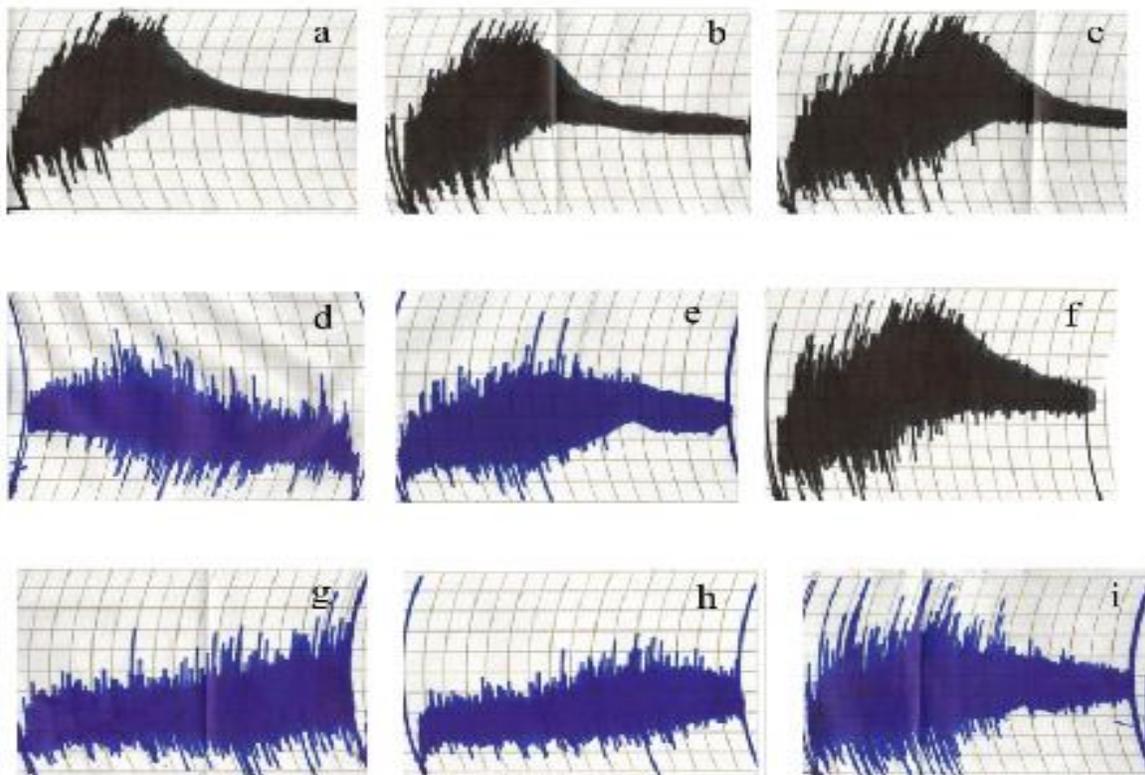


Figura 10. Mixogramas de las harinas con sus TDM: a) Navojoa (2.21 min), b) Norman (2.07 min), c) Roelfs (3.11 min), d) Villa Juárez (4.75min), e) Kronstad (4.40 min), f) Tacupeto (3.10 min), g) Onavas (5.10 min), h) Bourlag (5.40 min), i) Control (3.45 min).

Análisis e Identificación de las SGAPM por SDS-PAGE

La caracterización de las subunidades de glutenina se realizó mediante la técnica de electroforesis en geles de poliacrilamida. Al extracto crudo se le añadió un agente reductor el beta-mercaptoetanol y fue sometido a un campo eléctrico para separar las moléculas cargadas por diferencias en movilidad. La conexión eléctrica entre los electrodos positivo y negativo es posible a través de un gel, cuando termina la electroforesis, el gel es teñido para visualizar las proteínas.

En la tabla 1 se observa que las variedades Tacupeto, Roelfs clasificadas, presentan el mayor contenido de proteína (13.7), con un valor regular de TDM (3.10), también tuvieron un score Glu-1 de 8., esto puede deberse a la baja concentración o ausencia de alguna de las subunidades de los genomas; particularmente el B y una mayor presencia de las otras fracciones monoméricas como las albúminas, globulinas y gliadinas que al formar parte de las proteínas del grano, pero no de las de almacenamiento, aumenta el porcentaje de proteína en base seca. Por otro lado, las variedades Onavas y Bourlag, clasificadas con el subíndice “**d**”, presentan menor contenido de proteína (11.6 y 11.3 respectivamente) pero un alto TDM (5.1 y 5.4) En este caso los trigos tuvieron un score Glu-1 de 5, con un buen volumen de pan. Análisis realizados por Lawrence (1986) en 104 trigos australianos, obtuvieron una calificación significativa de 8.1; sin embargo, muchos de los mejores trigos para la elaboración de pan tenían subunidades 2+12 del Glu-1D con subunidades tales como 17+18 y 1 o 2*. En los primeros estudios de las SGAPM de trigos australianos por Wrigley y colaboradores (1982) tuvieron resultados diferentes a los basados en otros genotipos y porque la variación en otras clases de proteínas (gliadinas y subunidades de bajo peso molecular SGBPM) podía ser más importante en esos trigos que en otros

Tabla 10. Porcentaje de proteína de harinas de trigo, TDM y su composición de SGAPM.

Variedad	% Proteína (b.s.)	TDM (min)	Tipo de subunidad GAPM		
			A	B	D
Tacupeto	13.75±0.16 ^a	3.10±0.04 ^c	2,	17+18,	12
Roelfs	13.72±0.08 ^a	3.11±0.01 ^c	2,	17+18,	12
Navojoa	12.73±0.02 ^b	2.21±0.06 ^d	1 / 2*,	—	5+10
Norman	12.60±0.07 ^b	2.07±0.01 ^d	1 / 2*,	—	5+10
Villa Juárez	11.96±0.30 ^c	4.75±0.00 ^b	1 / 2*,	—	5+10
Kronstad	11.93±0.23 ^c	4.40±0.21 ^b	1 / 2*,	—	5+10
Onavas	11.64±0.06 ^{c,d}	5.10±0.04 ^a	2,	17+18,	12
Bourlag	11.35±0.13 ^d	5.40±0.14 ^a	1 / 2*,	—	5+10

Promedio ± desviación estándar. Letras diferentes en superíndice indican diferencias significativas entre variedades en la misma columna ($P \leq 0.05$, $n=3$).

Cuantificación de la Proteína Monomérica Fracción (Albúmina)

En la figura 11 se observa una correlación menor (0.18) al incluir las 8 variedades, esto se debe a que los valores de Navojoa y Norman presentaron un TDM menor en comparación con su alto valor de proteína. En cambio, la Figura 12, presenta las harinas de bajo volumen de pan (HBVP) con una alta correlación de (0.88) por la eliminación del valor TDM en Navojoa, Norman y Bourlag dejando solo las 5 variedades que muestran un comportamiento más parecido. Esto indica que más del 60 % de las variedades de trigo a medida que aumenta la proteína monomérica representado por la fracción albúmina, el TDM disminuye y viceversa a medida que la proteína monomérica disminuye, el TDM aumenta.

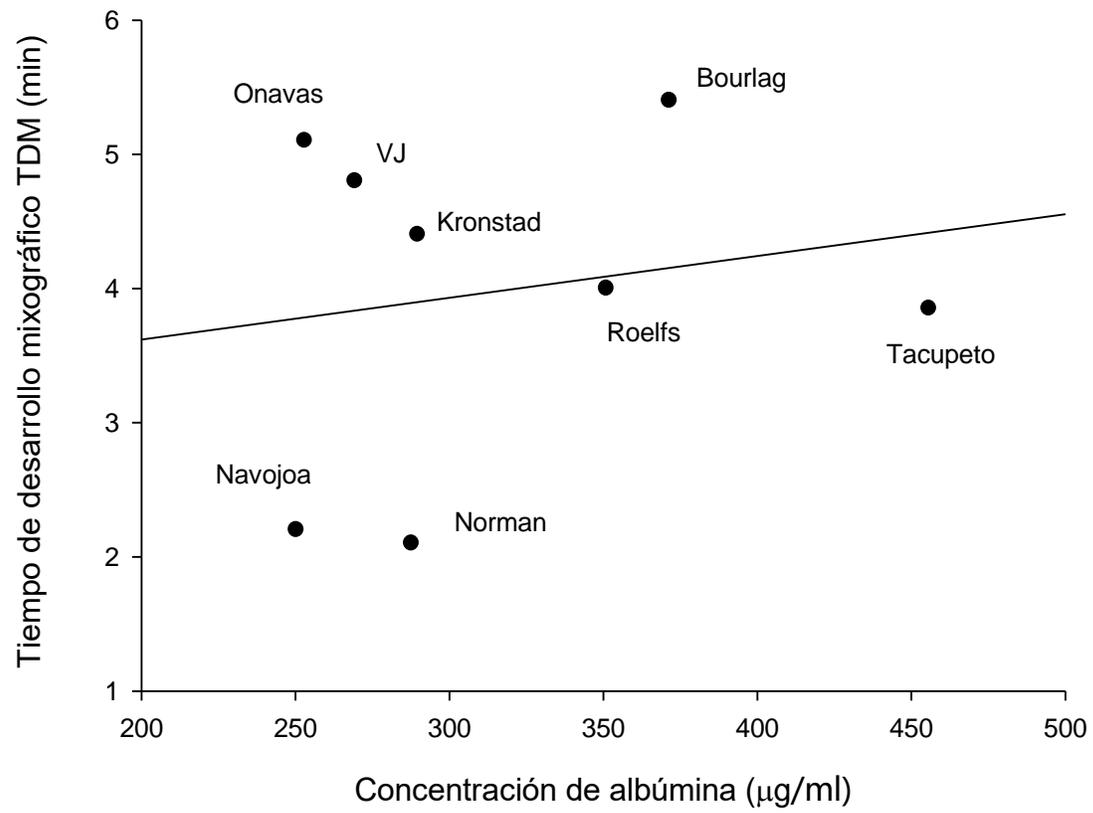


Figura 11. Concentración de albúmina vs TDM en 8 variedades de harina de trigo.
 $r = 0.18$

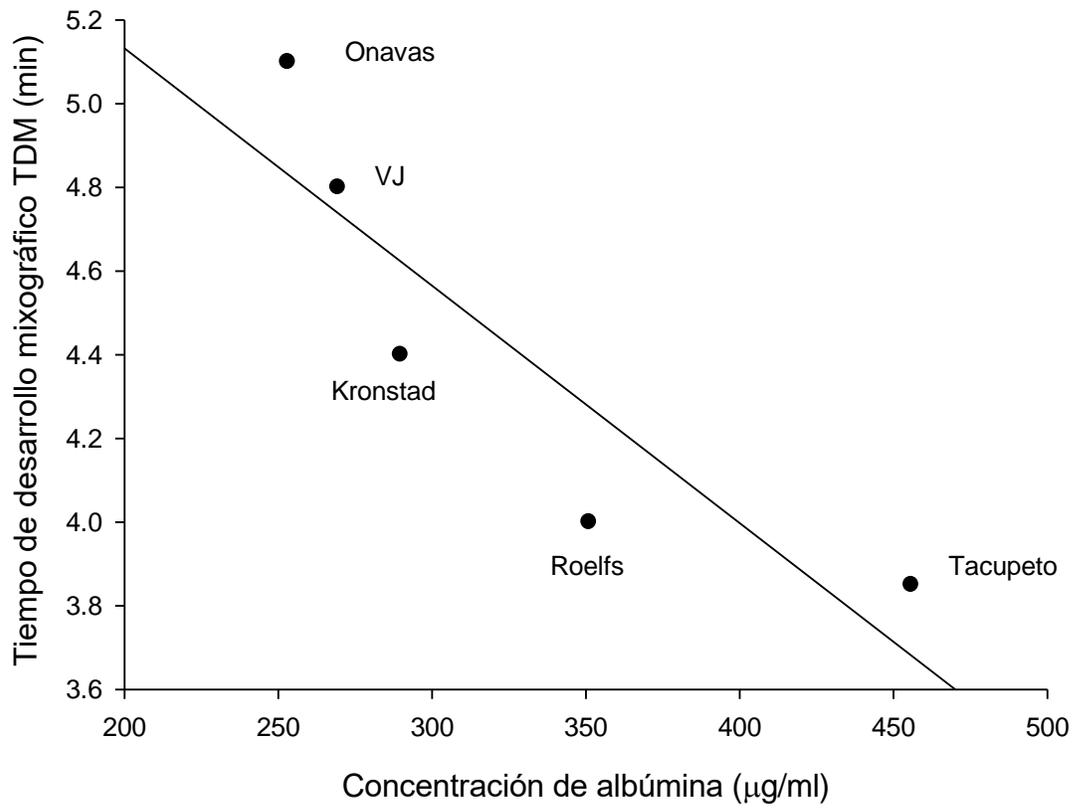


Figura 12. Concentración de albúminas vs TDM en 5 variedades de harina de trigo.

$r = 0.88$

TDM en Harinas con Alto Volumen de Pan (HAVP)

En la tabla 1 con HAVP se muestran los valores de tiempo de desarrollo mixográfico (TDM), volumen de pan y el tipo de subunidad de las gluteninas de alto peso molecular. Los datos obtenidos muestran que Onavas y Kronstad tienen el mayor TDM caso contrario al contenido de proteínas donde ocupan el cuarto y quinto lugar en el porcentaje de proteína en b.s. Las variedades Tacupeto y Norman que en la tabla anterior presentaban mayor contenido de proteína b.s. aquí tienen un menor TDM.

Tabla 11. Valores de TDM¹, volumen de pan en harinas de trigo y su composición de subunidades de gluteninas de alto peso molecular en HAVP².

Variedad	TDM (min)	Volumen (cm ³)	Tipo de subunidad GAPM		
			A	B	D
HAVP					
Onavas	5.10±0.04 ^a	217.7±1.7 ^b	2,	17+18,	12
Kronstad	4.40±0.21 ^b	224.9±1.7 ^{a,b}	1 / 2*,	—	5+10
Tacupeto	3.10±0.04 ^c	233.3±3.4 ^a	2,	17+18,	12
Norman	2.07±0.01 ^d	194.8±5.09 ^b	1 / 2*,	—	5+10

Promedio ± desviación estándar. Letras diferentes en superíndice indican diferencias significativas entre variedades en la misma columna ($P \leq 0.05$, n=3).

TDM¹ = tiempo de desarrollo mixográfico,

HAVP² = harinas con alto volumen de pan.

TDM en Harinas con Bajo Volumen de Pan (HBVP)

En la tabla 12 del grupo HBVP, se encuentra que Bourlag y Villa Juárez tienen el mayor tiempo de desarrollo 5.4 y 4.75 y un bajo porcentaje de proteína b.s. 11.35 y 11.96 y ambas presentan las subunidades 1 / 2*, —, 5+10; sin embargo, aunque Bourlag tiene un TDM de 5.4 no tiene el mayor volumen de pan (200.8 cm³), Villa Juárez con un TDM de 4.75 presenta un mayor volumen de (208.3 cm³). Roelfs presenta un TDM aún más bajo de 3.11 y presenta un volumen de 208.1 cm³ parecido a Villa Juárez. Navojoa con un TDM de 2.21 tiene un volumen cercano al de Bourlag.

Tabla 12. Valores de TDM¹, volumen de pan en harinas de trigo y su composición de subunidades de gluteninas de alto peso molecular en HBVP².

Variedad	TDM (min)	Volumen (cm ³)	Tipo de subunidad GAPM		
			A	B	D
HBVP					
Bourlag	5.4±0.14 ^a	200.8±1.70 ^{a,b}	1 / 2*,	—	5+10
Villa Juárez	4.75±0.00 ^b	208.3±2.04 ^a	1 / 2*,	—	5+10
Roelfs	3.11±0.01 ^c	208.1±1.70 ^a	2,	17+18,	12
Navojoa	2.21±0.06 ^d	194.8±3.40 ^b	1 / 2*,	—	5+10

Promedio ± desviación estándar. Letras diferentes en superíndice indican diferencias significativas entre variedades en la misma columna ($P \leq 0.05$, n=3).

TDM¹ = tiempo de desarrollo mixográfico, HBVP² = harinas con bajo volumen de pan.

Identificación de las SGAPM por SDS-PAGE

Para la identificación de las subunidades es necesario utilizar un patrón como el que se muestra en la figura 13. Las figuras de los perfiles electroforéticos de las 8 variedades de harina se observan en la figura 14. En los perfiles de cada una de las muestras, se indican los números de identificación para las SGAPM, según la nomenclatura de Payne et al (1984). En las bandas puede observarse que las parejas de subunidades más repetidas fueron: 2_5+10. Los resultados también indican que de las variedades de trigo Norman, Kronstad, Navojoa, Villa Juárez y Bourlag tienen el par de subunidades 5+10 o Dx5+Dy10 y tres de las variedades presentan el par de subunidades 2+12 o Dx2+Dy12; sin embargo, los resultados obtenidos para estas 3 últimas variedades indican que a pesar de tener este par de subunidades asociadas con menor calidad en la elaboración de pan, presentan también subunidades asociadas con mayor calidad como lo indica la contribución a la calificación de la calidad de sus demás subunidades componentes, como es el caso de la subunidad Ax2* (genoma A), con un valor de calidad 3 y el par de alelos Bx17+By18 (genoma B), con un valor de 3 que contribuye para una calificación de calidad de alta como puede observarse en la Tabla 7. Debido a que las subunidades 2+12 son codificadas por genes ligados en el brazo largo del cromosoma 1D, estas dos proteínas casi siempre aparecen juntas. La subunidad 12 se considera evidencia de la presencia de la subunidad 2, cuando una banda gruesa se encuentra en la región 2/2* (Lookhart et al 1993); por lo tanto, la resolución en algunas variedades para las subunidades 2/2* también se basó en el ancho de la banda localizada en esta región. El mecanismo por el cual las SGAPM contribuyen al mezclado y horneado no está bien entendido, pero una contribución cuantitativa resultado del número de subunidades parece razonablemente según (Lawrence et al., 1988), por lo tanto en las variedades de trigo en las que se expresan 5 subunidades de masa molecular alta, tendrán mejor calidad en la elaboración de pan, que las variedades en las que se expresan 4, al menos cuando los alelos expresados sean comunes para ambos trigos o hagan igual contribución para calidad (Payne et al., 1981). Los factores estructurales probablemente jueguen un papel importante (Kasarda, 1989). Las 8 variedades de trigo sonorenses analizados son esencialmente uniformes en sus biotipos de SGAPM. Los valores de calidad del Glu-1 que pueden asignarse varían de 5 a 10. De las 8 variedades de trigo, 5 presentaron el par de alelos 5+10, entre ellas Norman, Kronstad, Navojoa, Villa Juárez y Bourlag tuvieron el valor de calidad 8. de las 3 variedades

que presentaron las subunidades 2+12, de las cuales Tacupeto, Onavas y Roelfs, tuvieron una calificación de 5. Puede concluirse que los valores más bajos de calidad se deben principalmente a la presencia de los alelos de pobre calidad 2+12, como se observa en las muestras Tacupeto, Onavas y Roelfs y a la forma nula de la subunidad B (1/2*, nulo, 5+10), que se caracteriza por pobre calidad para mezclado y horneado (Carrillo et al., 1990). Los trigos panaderos contienen en teoría 6 diferentes SG de masa molecular alta, pero debido al silenciamiento y de algunos de estos genes, es más común que las variedades presenten 3 a 5 subunidades GAPM (1 a 3 subunidades de trigo cristalino, genoma tetraploide). Por lo tanto, todos los trigos hexaploides contienen al menos la subunidad 1Bx, 1Dx y 1Dy, mientras que algunas variedades también contienen una subunidad 1By y una Ax. Parece ser que el gen que codifica a la subunidad 1Ay está siempre reprimido (Payne et al., 1981). En este estudio se observó que la mayoría de las variedades presentan de 3 a 4 bandas, lo que comprueba su buena calidad.

Variación alélica de SGAPM en Trigo panadero

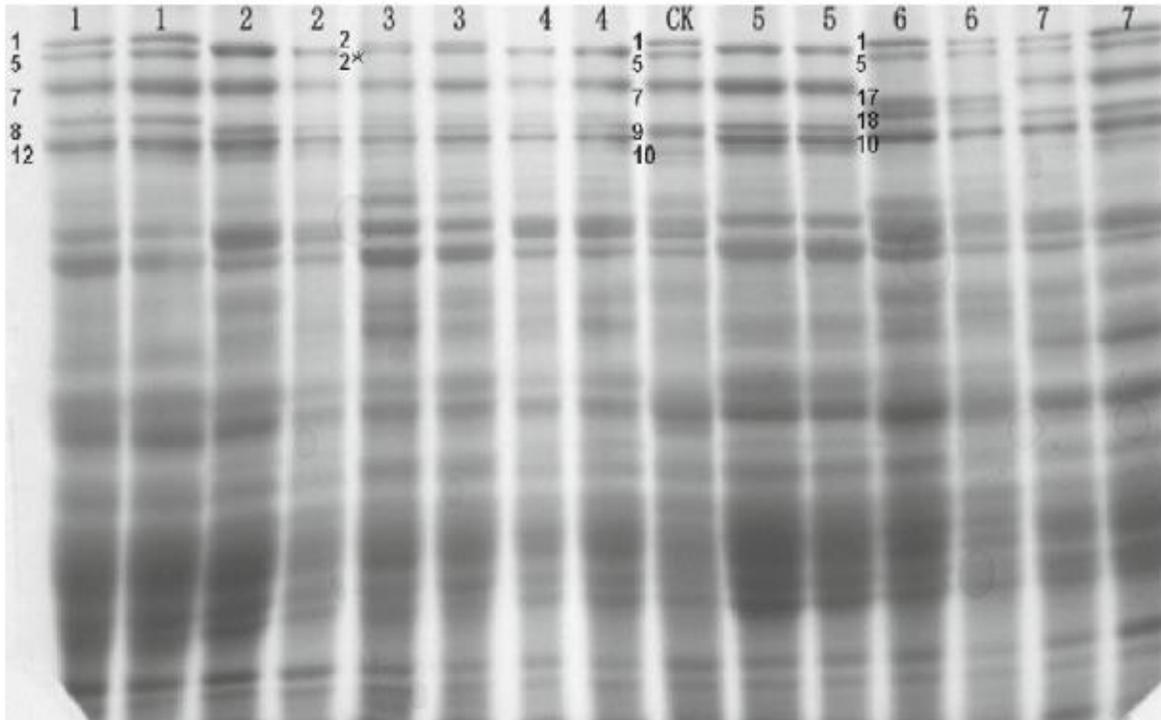


Figura 13. SDS-PAGE Patrones de SGAPM de algunos cultivos de trigo panadero y algunas especies relacionadas. Fuente: Gao et al, 2018.

Las subunidades son codificadas por tres genes de loci diferentes, Glu-A1, Glu-B1 y Glu-D1 localizados en los cromosomas 1A, 1B, 1D respectivamente (Southan y MacRitchie 1999), en cada locus existe una variación alélica la cual determina las propiedades de fuerza del gluten (Branlard et al; 2001). Ciertas combinaciones alélicas imparten un gluten con mayor fuerza, y otras la debilitan (Payne y Lawrence, 1983). Las subunidades que tienen un efecto positivo son: 1, 2*, 7+8, 7+9, 13+16, 17+18, y 5+10. Las subunidades con efecto intermedio serían 7+9 y 2+12. y con efecto negativo las subunidades 0, 7, 20, 13+19, 3+12 y 4+12 (Payne y Lawrence , 1983, Peña et al 2002, Peña et al 2004). Las subunidades 5+10 poseen mayor fuerza y confieren mayor volumen de pan que las subunidades 2+12. Los alelos 17+18 también presentaron buen volumen de pan, la subunidad 2+12 está más relacionado a un volumen de pan más bajo. En general las subunidades de glutenina que presentan las 8 variedades del trigo son de buena calidad panadera.

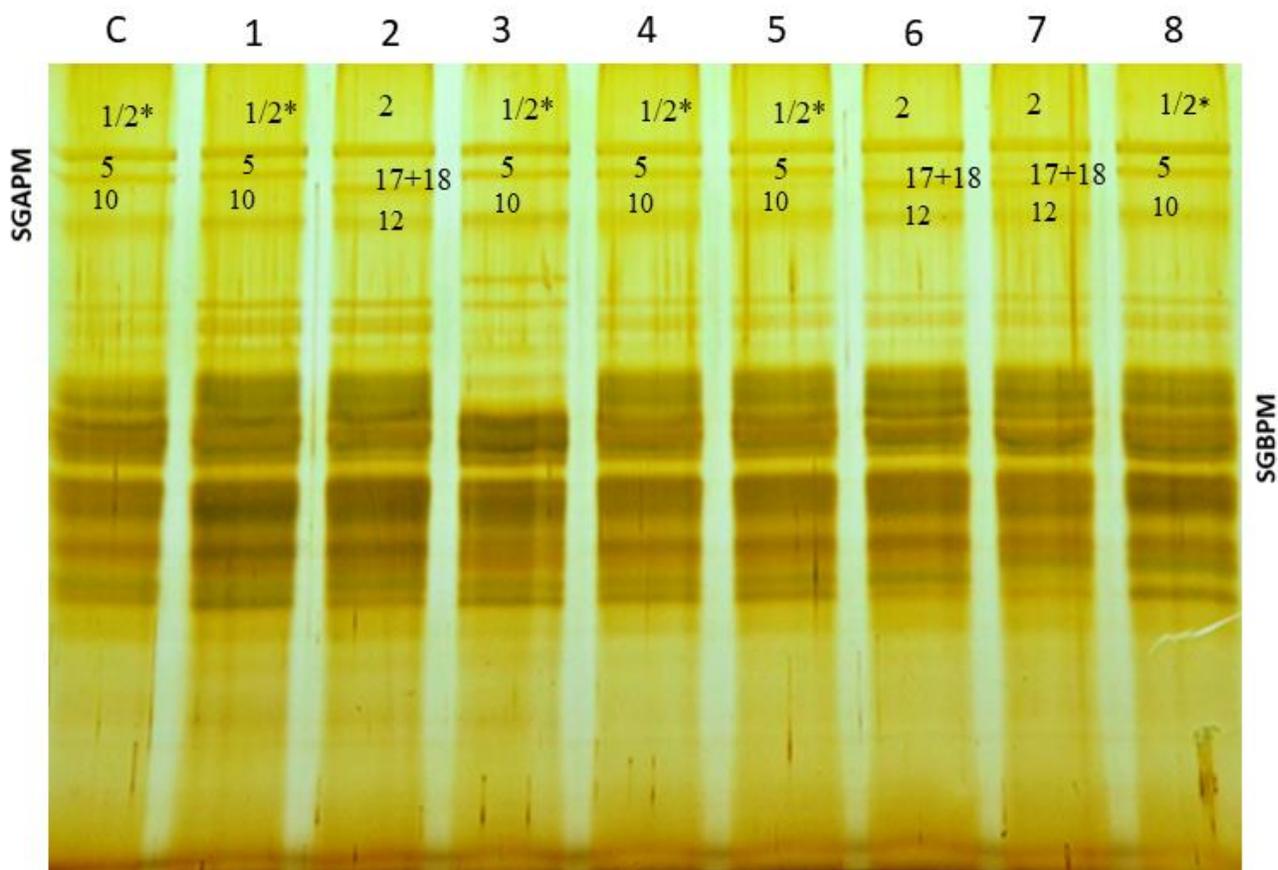


Figura 14. Perfil electroforético de las proteínas poliméricas de las harinas: Control 1/2*, 5+10; línea 1, Navojoa 1/2*, 5+10; línea 2, Roelfs 2, 17+18; línea 3, Norman 1/2*, 5+10; línea 4, Villa Juárez 2, 5+10; línea 5, Bourlag 1/2*, 5+10; línea 6, Tacupeto 2, 17+18, 12; línea 7, Onavas 2, 17+18, 12; línea 8, Kronstad 1/2*, 5+10. Ordenados de menor a mayor volumen específico de pan.

Tabla 13. Valores de absorción del agua, tiempo de desarrollo mixográfico (TDM), volumen y volumen específico.

Variedad	Abs. Agua (ml)	TDM (min)	Volumen (cm ³)	Vol. Esp. (cm ³ /g)
Norman	18.96±0.0 ^a	2.07±0.01 ^c	212.9±5.1 ^c	4.30±0.16 ^{b,c,d}
Navojoa	19.03±0.0 ^a	2.21±0.06 ^e	194.8±3 ^e	3.96±0.13 ^d
Tacupeto	19.38±0.0 ^a	3.10±0.04 ^a	233.3±3.4 ^a	4.61±0.00 ^{a,b}
Roelfs	19.26±0.0 ^a	3.11±0.01 ^{c,d}	208.1±1.7 ^{b,c,d}	4.18±0.13 ^{c,d}
Kronstad	18.75±0.0 ^a	4.40±0.21 ^{a,b}	224.9±1.7 ^{a,b}	4.83±0.02 ^a
Villa J.	18.78±0.0 ^a	4.75±0.00 ^{c,d}	208.3±2.0 ^{b,c,d}	4.41±0.03 ^{b,c}
Onavas	18.58±0.0 ^a	5.10±0.04 ^{b,c}	217.7±1.7 ^{b,c}	4.69±0.04 ^{a,b}
Bourlag	18.78±0.0 ^a	5.40±0.14 ^{a,d,e}	200.8±1.7 ^{d,e}	4.31±0.12 ^{b,c,d}

Promedio ± desviación estándar. Letras diferentes en superíndice indican diferencias significativas entre variedades en la misma columna ($P \leq 0.05$, n=2).

Correlaciones entre las Pruebas de Panificación

Con el propósito de determinar si se encuentra alguna relación entre las características de panificación y características reológicas de las harinas se realizaron correlaciones simples (r) utilizando la siguiente clasificación se estima significativamente débil si $(r) \leq 0.5$, moderadamente significativo de $0.5 \leq (r) \leq 0.75$ y fuerte si $(r) > 0.75$

Relación de Volumen Específico de Pan y TDM en las 8 Variedades de Harina de Trigo

En la Figura 15 se observa el volumen específico de pan en dos grupos de harinas, los de alto y bajo, dentro de los panes con alto volumen de pan (HAVP): tenemos a Norman, Tacupeto, Kronstad y Onavas; y en los de bajo volumen de pan (HBVP) tenemos: Navojoa, Roelfs, Villa Juárez y Bourlag con una correlación cercana a 0.6

En el análisis estadístico se hará una correlación entre el perfil de las SGAPM, concentración de albúminas y su relación con las propiedades funcionales medidas en el Mixógrafo.

Relación de Volumen Específico con el TDM en HAVP y HBVP

En la figura 16 se observa el Volumen específico y TDM en HAVP con una buena correlación de 0.91. directamente proporcional, esto indica que, si aumenta el TDM, aumenta el volumen específico; si disminuye el TDM también disminuye el volumen específico. En la Figura 17 se muestra un Volumen específico y TDM en HBVP con una alta correlación de 0.90. Los resultados revelan una relación directamente proporcional, aún mayor que la gráfica anterior. Si un parámetro aumenta el otro también aumenta y viceversa.

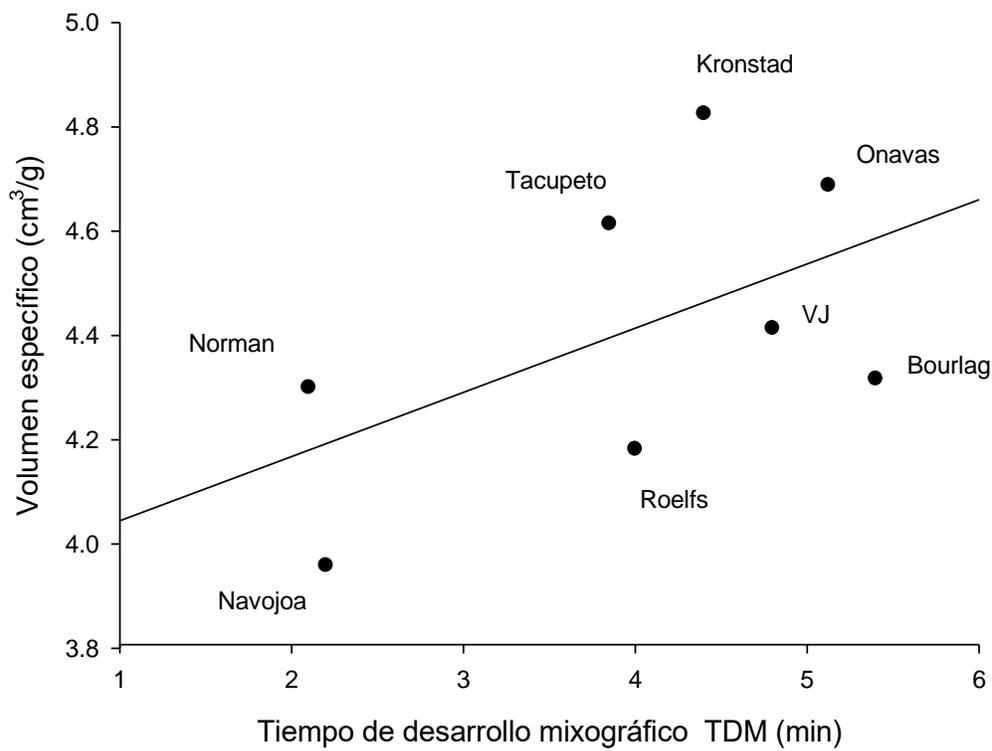


Figura 15. Volumen específico vs TDM en ocho variedades de trigo.
 $r = 0.54$

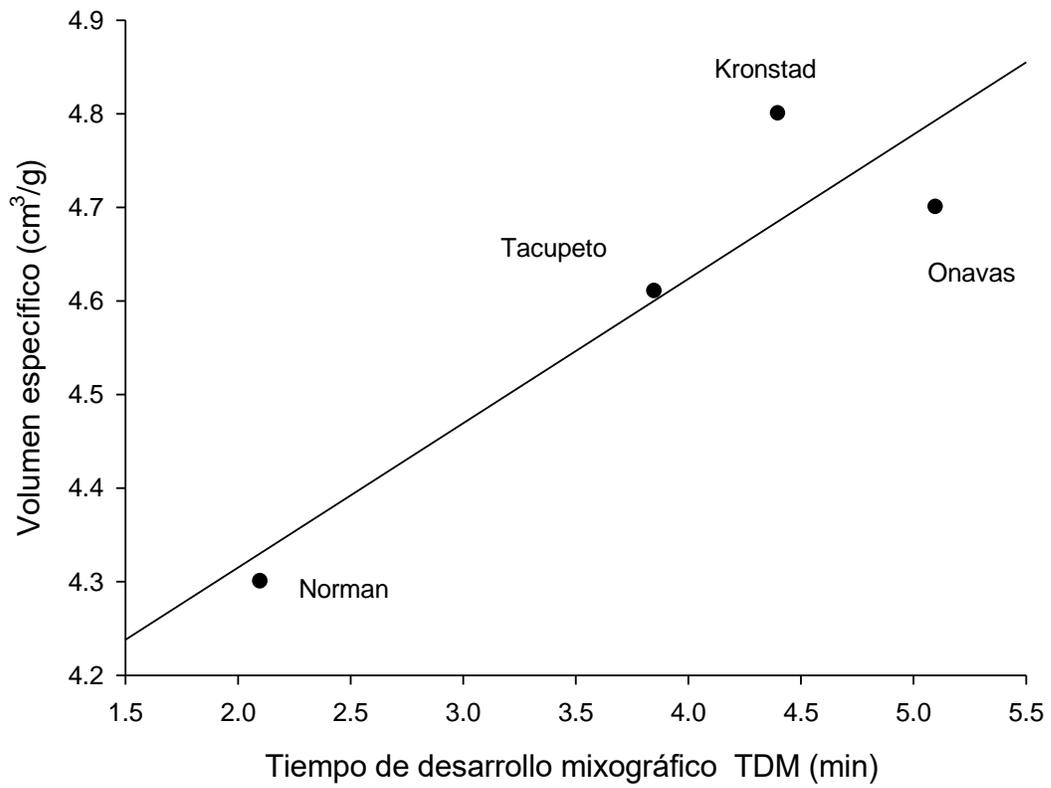


Figura 16. Volumen específico y TDM en HAVP en cuatro variedades de trigo.

$r = 0.91$

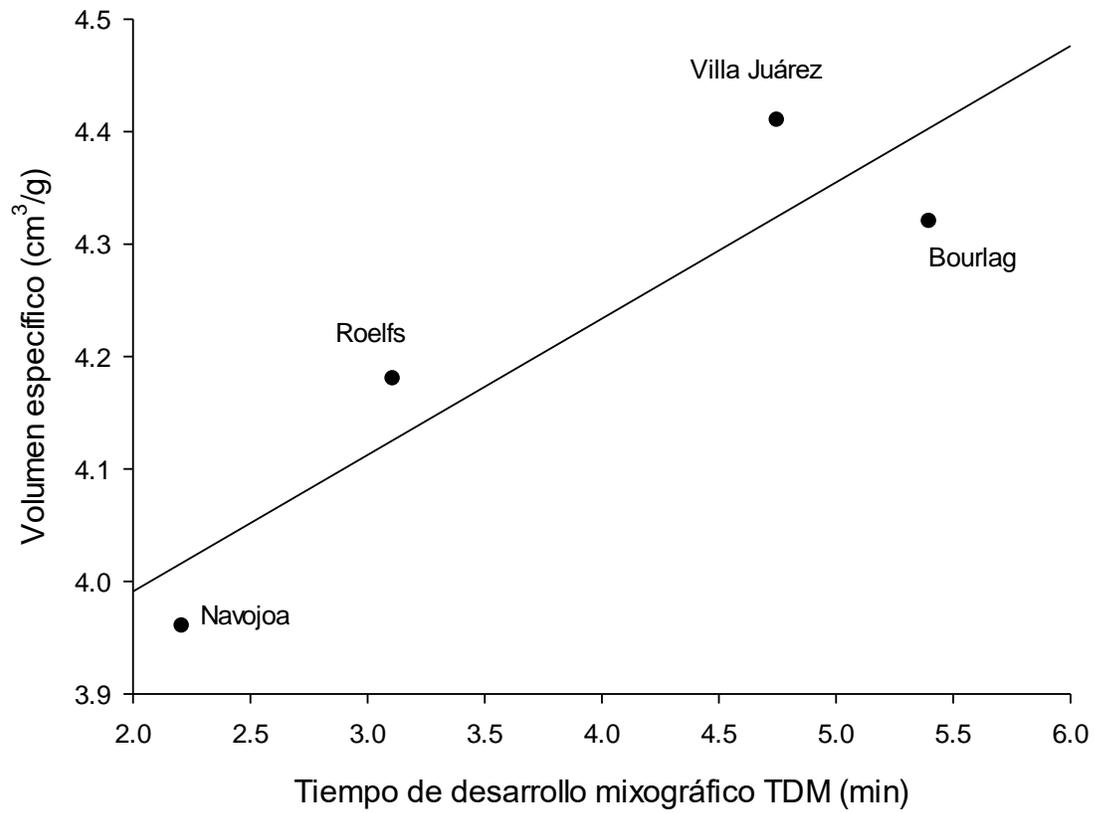


Figura 17. Volumen específico y TDM en HBVP en cuatro variedades.

$r = 0.90$

Resultados de la variación alélica

Los trigos representados arriba de la recta son: Norman, Tacupeto, Kronstad y Bourlag estos presentan subunidades, 1, 2*, 5+10. La variación alélica en las subunidades (5+10) del locus glu-D1 de las gluteninas de alto peso molecular, están asociadas con la buena calidad de la masa (Payne et al 1981; Branlard y Dardevet 1985; Gianibelli et al 2001). Las gluteninas de alto peso molecular son las que dan la fuerza, elasticidad y el tiempo de mezclado (Weegels et al 1996). El valor de la correlación es 0.84 indica que a un mayor tiempo de desarrollo mixográfico, hay un aumento del volumen de pan, y a menor TDM hay un menor volumen específico de pan. Las harinas que presentaron valores inferiores en volumen de pan fueron: Navojoa (1/ 2*, 5+10), Roelfs (2/ 2*, 17+18, 12), Villa Juárez (2/ 2*, 17+18, 12) y Bourlag (1/ 2* 5+10). Estas harinas contienen las subunidades de gluteninas de alto peso molecular. Las subunidades (2+12) codificada por el genoma D en trigos panaderos se les atribuye una calidad de masa débil (Payne et al 1981; Branlard y Dardevet 1985; Gianibelli et al 2001). La subunidad 17+18 presenta efecto positivo en la calidad de las harinas (Payne, 1987; Payne y Lawrence, 1983 *al.*, 2002; *et al.*, 2004). Existen diferencias en las variedades de trigo en cuanto al tipo y cantidad de subunidades de gluteninas presentes (Hou y Ng., 1995). Al parecer los trigos que tienen las subunidades 1, 2* 5+10 no alcanzaron un buen volumen de pan debido a que presentan una menor concentración de proteínas poliméricas de alto peso molecular y sus sitios activos son inactivados al haber interacciones de otros compuestos como el almidón u otras proteínas monoméricas que se encuentran en mayor proporción. Los resultados obtenidos en la cuantificación de la proteína albúmina y el TDM, muestran en efecto una buena correlación en 5 variedades (Tacupeto, Roelfs, Kronstad, Villa Juárez y Onavas). Al aumentar la proteína monomérica representado por la fracción albúmina, el TDM disminuye y viceversa a medida que la proteína monomérica disminuye, el TDM aumenta.

Payne et al. 1987, Preston et al 1992 han indicado que la 'fuerza' de la masa y el potencial de panificación de las harinas están positivamente relacionados con las subunidades 5 + 10, 7 + 8, 17 + 18, 1 y 2 * y negativamente asociados con las subunidades 6 + 8, 2 + 12 y 20. En estudio, algunos cultivares, como Tacupeto, Roelfs y Onavas, aunque tienen subunidades 2 + 12, produjeron masas fuertes y buenos volúmenes de pan. La presencia del par de subunidades 2 + 12 en el locus Glu-D1 no tuvo un efecto negativo en la calidad de la elaboración del pan. Singh

et al (1990) obtuvieron resultados similares para los cultivares australianos de trigo Cook, Gabo, Oxley y Tingalen

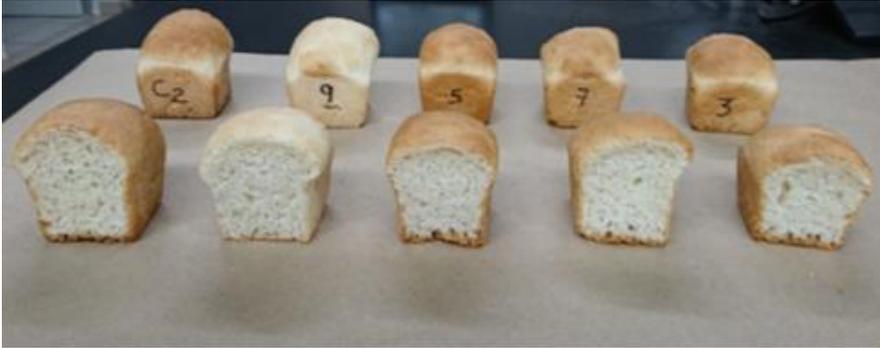


Figura 18. Pan cortado y alineado de mayor a menor volumen, Orden: Control, Tacupeto, Norman, Roelfs y Navojoa.



Figura 19 a). Control: (1,2,3); Villa Juárez: (4,5); Kronstad: (6).

Figura 19 b). Kronstad (7); Onavas: (8, 9) Bourlag: (10, 11).

CONCLUSIONES

La calidad de panificación de las 8 variedades de harina de trigo tiene una correlación altamente positiva entre el volumen específico y el TDM; lo mismo sucede, pero inversamente proporcional con el TDM y la concentración de albúminas en el 60 % de las muestras, lo cual nos indica que las características del pan están influenciadas por la composición proteica. Las relaciones de las SGAPM de las variedades pueden intervenir en el comportamiento panadero, pero no alcanza predecir en su totalidad. El volumen de pan y los parámetros del Mixógrafo son mejores predictores que la puntuación por el Score Glu-1 basado en la composición de SGAPM. La variación en el volumen del pan se puede relacionar directamente a la variación de la cantidad y tipo de proteína.

Por lo tanto, se concluye que los trigos hexaploides del Estado de Sonora al tener 3 y 4 bandas de SGAPM con las combinaciones alélicas 1, 2^{*}, 17+18, y 5+10. tienen buena calidad panadera, aún la presencia del par de subunidades 2 + 12 en el locus Glu-D1 no tuvo un efecto negativo en la calidad de la elaboración del pan.

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar la cuantificación de las SGAPM por Ultra cromatografía líquida de alta resolución de fase inversa (RH-PLC) y relacionar la presencia y cantidad de gluteninas de alto peso molecular con propiedades funcionales y de panificación.

REFERENCIAS

- Altenbach, S. B., DuPont, F. M., Kothari, K. M., Chan, R., Johnson, E. L., & Lieu, D. (2003). Temperature, water and fertilizer influence the timing of key events during grain development in a US spring wheat. *Journal of Cereal Science*, 37(1), 9-20.
- American Association of Cereal Chemists. (1995). *Approved Methods of the AACC*, 10th ed. Official the Association: St. Paul MN.
- Bacic, A., & Stone, B. A. (1981). Chemistry and organization of aleurone cell wall components from wheat and barley. *Functional Plant Biology*, 8(5), 475-495.
- Batey I. L. (2004). Gluten and modified gluten. En; Wrigley C., Corke H. & Charles Walker C. (Eds). *Encyclopedia of Grain Science Vol. 1 (259)* Madison, Wisconsin, Estados Unidos: Elsevier Applied Science Publishers.
- Bechtel, D. B. (1983). *New frontiers in food microstructure*. American Association of Cereal Chemists. St. Paul, Mn, USA.
- Bekkers, A. C., Van Dijk, A., De Boef, E., Van Swieten, E., Robillard, G., & Hamer, R. J. (1996, September). HMW glutenins: structure–function relationships step by step. In *Gluten 96—Proc. 6th Int. Wheat Gluten Workshop*, Sydney (pp. 190-194).
- Belton, P. S. (2005). New approaches to study the molecular basis of the mechanical properties of gluten. *Journal of Cereal Science*, 41(2), 203-211.
- Betschart, A.A. (1988). Nutritional quality of wheat and wheat foods. Cap. 3. In: *Wheat: Chemistry and Technology*, Y. Pomeranz, Ed Vol. I. American Association of Cereal Chemists, St Paul, MN. USA.
- Bettge, A. D., Morris, C. F., & Greenblatt, G. A. (1995). Assessing genotypic softness in single wheat kernels using starch granule-associated friabilin as a biochemical marker. *Euphytica*, 86(1), 65-72

- Bewley, J. D., & Black, M. (1978). *Physiology and biochemistry of seeds in relation to germination*. Berlin: Springer Verlag.
- Bietz, J. A., & Wall, J. S. (1972). Wheat gluten subunits: Molecular weights determined by sodium dodecylsulfate-polyacrylamide gel electrophoresis. *Cereal Chemistry*, 49, 416-430.
- Blum, H., Beier, H., & Gross, H. J. (1987). Improved silver staining of plant proteins, RNA and DNA in polyacrylamide gels. *Electrophoresis*, 8(2), 93-99.
- Bock, M. A. (2000). Minor constituents of cereals. *FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY-NEW YORK-MARCEL DEKKER-*, 479-504.
- Branlard, G., & Dardevet, M. (1985). Diversity of grain proteins and bread wheat quality: I. Correlation between gliadin bands and flour quality characteristics. *Journal of cereal science*, 3(4), 329-343.
- Branlard, G., & Dardevet, M. (1985). Diversity of grain protein and bread wheat quality: II. Correlation between high molecular weight subunits of glutenin and flour quality characteristics. *Journal of Cereal Science*, 3(4), 345-354.
- Brites, C. M., Dos Santos, C. A. L., Bagulho, A. S., & Beirão-da-Costa, M. L. (2008). Effect of wheat puroindoline alleles on functional properties of starch. *European Food Research and Technology*, 226(5), 1205-1212.
- Bushuk, W. (1998). Wheat breeding for end-product use. *Euphytica* 100:137–145.
- Calaveras, J. (2004). *Nuevo tratado de panificación y bollería*. AMV Ed. Mundi prensa. 2ª Edición.
- Campbell K.G., Bergman C.J., Gualberto D.G., Anderson J.A., Giroux M.J., Hareland G., Fulcher R.G., Sorrells M.E. and Finney P.L. (1999). Quantitative trait loci associated with kernel traits in soft and hard wheat cross. *Crop Science* 39: 1184-1195.

- Carrillo, J. M., Rousset, M., Qualset, C. O., & Kasarda, D. D. (1990). Use of recombinant inbred lines of wheat for study of associations of high-molecular-weight glutenin subunit alleles to quantitative traits. *Theoretical and Applied Genetics*, 79(3), 321-330.
- Chavan, J. K., Kadam, S. S., & Beuchat, L. R. (1989). Nutritional improvement of cereals by fermentation. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 28(5), 349-400.
- Chopin, M. (1927). Determination of baking value of wheat by measure of specific energy of deformation of dough. *Cereal Chem*, 4(1).
- Chopin, M. (1962). Sur l'utilisation du rapport P/L dans l'essai des farines avec l'Iveograph. *Bull. Ec. Fr. Meun.* 189, 1962, vol. 139.
- Chung, O. K., & Pomeranz, Y. (1985). Amino acids in cereal proteins and protein fractions. Digestibility and amino acids availability in cereals and oilseeds. American Association of Cereal Chemists. St Paul, Minnesota, 65-107.
- CIC (2018). Consejo Internacional de Cereales.
- CIMMYT (2009). Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo.
- Cinco-Moroyoqui, F. J., & MacRitchie, F. (2008). Quantitation of LMW-GS to HMW-GS Ratio in Wheat Flours. *Cereal Chemistry*, 85(6), 824-829.
- Cinco, M. F. (2002). Methodology for determining glutenin subunit composition of isogenic wheat lines varying in the number of high molecular weight glutenin subunits.
- D'Appolonia, B. L., & Kunerth, W. H. (1984). *Farinograph Handbook*: American Association of Cereal Chemists. Inc. St. Paul, Minnesota, USA.

Dubois, M., Dubat, A., & Launay, B. (2016). *Alveo Consistograph Handbook*. Elsevier.

DuPont, F. M., & Altenbach, S. B. (2003). Molecular and biochemical impacts of environmental factors on wheat grain development and protein synthesis. *Journal of Cereal Science*, 38(2), 133-146.

Evers, A. D., & Bechtel, D. B. (1988). Microscopic structure of the wheat grain. *Wheat: chemistry and technology*, 1, 47-95.

F.A.O (2019). Food and agriculture Organization in: [http// Faostat. Fao. Org/](http://Faostat.Fao.Org/)

Field, J. M., Shewry, P. R., & Mifflin, B. J. (1983). Solubilisation and characterisation of wheat gluten proteins: correlations between the amount of aggregated proteins and baking quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 34(4), 370-377.

Fincher, G. B. (1989). Molecular and cellular biology associated with endosperm mobilization in germinating cereal grains. *Annual review of plant biology*, 40(1), 305-346.

Fischer, R. A., & Edmeades, G. O. (2010). Breeding and cereal yield progress.

Fischer, R. A., Byerlee, D. R., & Edmeades, G. O. (2009). Can technology deliver on the yield challenge to 2050? (No. 138-2016-2032).

Finney, K. F. (1948). Loaf volume and protein content of hard winter and spring wheat. *Cereal Chem.*, 25, 291-312.

Finney, K. F. (1972). A ten-gram mixograph for determining and predicting functional properties of wheat flours. *Bakers Digest*, 46, 32-35.

French, D. (1984). *Starch: Chemistry and technology*. New York: Academic.

- Gao, Z., Tian, G., Wang, Y., Li, Y., Cao, Q., Han, M., & Shi, Z. (2018). Allelic variation of high molecular weight glutenin subunits of bread wheat in Hebei province of China. *Journal of genetics*, 97(4), 905-910.
- Garcia, R., Annone, J. G., Martín, A. J., Mac Maney, M., & Regis, S. (2001). Efecto del nitrógeno sobre el rendimiento y distintos parámetros de calidad industrial de distintas variedades de trigo pan (*Triticum aestivum* L.). Villa Carlos Paz, Córdoba.
- Gianibelli, M. C., Larroque, O. R., MacRitchie, F., & Wrigley, C. W. (2001). Biochemical, genetic, and molecular characterization of wheat glutenin and its component subunits. *Cereal Chemistry*, 78(6), 635-646.
- Goesaert, H., Brijs, K., Veraverbeke, W. S., Courtin, C. M., Gebruers, K., & Delcour, J. A. (2005). Wheat flour constituents: how they impact bread quality, and how to impact their functionality. *Trends in food science & technology*, 16(1-3), 12-30.
- Gras, P. W., Anderssen, R. S., Keentok, M., Békés, F., & Appels, R. (2001). Gluten protein functionality in wheat flour processing: a review. *Australian Journal of Agricultural Research*, 52(12), 1311-1323.
- Gupta, R. B., & MacRitchie, F. (1994). Allelic variation at glutenin subunit and gliadin loci, Glu-1, Glu-3 and Gli-1 of common wheats. II. Biochemical basis of the allelic effects on dough properties. *Journal of Cereal Science*, 19(1), 19-29.
- Gupta, R. B., Batey, I. L., & MacRitchie, F. (1992). Relationships between protein composition and functional properties of wheat flours. *Cereal Chemistry* 69, 125-131.
- Gupta, R. B., & Shepherd, K. W. (1990). Two-step one-dimensional SDS-PAGE analysis of LMW subunits of glutelin. *Theoretical and Applied Genetics*, 80(1), 65-74.
- Gubler, F., Ashford, A. E., & Jacobsen, J. V. (1987). The release of α -amylase through gibberellin-treated barley aleurone cell walls. *Planta*, 172(2), 155-161.

- Halverson, J. (1988). Criteria of wheat quality. *Wheat: Chemistry and technology*, 15-46.
- Blum, H., Beier, H., & Gross, H. J. (1987). Improved silver staining of plant proteins, RNA and DNA in polyacrylamide gels. *Electrophoresis*, 8(2), 93-99.
- Hartree, E. F. (1972). Determination of protein: a modification of the Lowry method that gives a linear photometric response. *Anal. Biochem.* 48, 422-427.
- Hoffmann, F. (1972). Compendio de vitaminas: propiedades de las vitaminas y su importancia en la alimentación humana y animal (No. Ba1 DEPOSITO FV).
- Humphris, A. D. L., McMaster, T. J., Miles, M.J., Gilbert, S.M., Shewry, P.R., and Tatham A.S. (2000). Atomic Force Microscopy (afm) Study of Interactions of HMW Subunits of Wheat Glutenin. *Cereal Chem.*77 (2):107-110.
- Hoseney, R. C. (1994). *Principles of cereal science and technology*. American Association of Cereal Chemists. Inc., St. Paul, 170.
- Hoseney, R. C. (1986). *Principles of cereal science and technology. A general reference on cereal foods*. American Association of Cereal Chemists, Inc.
- Hoseney, R. C. (1985). Mixing phenomenon. *Cereal foods world (USA)*.
- Hou, G., & Ng, P. K. W. (1995). Quantification of glutenin subunits by sequential acetone precipitation and by sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE) coupled with densitometry using a known quantity of glutenins as a standard. *Cereal chemistry (USA)*. Hugo, W., & Godiño, M. (2000). *Tecnología de almacenamiento de granos de trigo*. INIA Serie Técnica.
- Ikeda, T. M., Ohnishi, N., Nagamine, T., Oda, S., Hisatomi, T., & Yano, H. (2005). Identification of new puroindoline genotypes and their relationship to flour texture among wheat cultivars. *Journal of Cereal Science*, 41(1), 1-6.

Inforural. com.mx. 2013 <https://www.inforural.com.mx/estimula-el-programa-precios-de-garantia-la-produccion-nacional-de-trigo-panificable-sader/>

INIFAP 2018.

Johnson, J. A., Swanson, C. O., & Bayfield, E. G. (1943). The correlation of mixograms with baking results. *Cereal Chem*, 20, 625-644.

Jolly C.J., Rahman S., Kortt A.A. and Higgins T.J.V. (1993). Characterization of the wheat Mw 15,000 “grain-softness” protein and analysis of the relationship between its accumulation in the whole seed and grain softness. *Theoretical and Applied Genetics* 86: 589-597.

Kamal, A. H. M., Kim, K. H., Shin, D. H., Seo, H. S., Shin, K. H., Park, C. S., ... & Woo, S. H. (2009). Proteomics profile of pre-harvest sprouting wheat by using MALDI-TOF mass spectrometry. *Plant Omics*, 2(3), 110.

Kasarda, D. D. (1999). Glutenin polymers: The in vitro to in vivo transition. *Cereal Foods World*, 44(8), 566-571.

Kasarda, D. D. (1989). Glutenin structure in relation to wheat quality. *Wheat is unique*, 277, 302.

Kasarda, D. D., Autran, J. C., Lew, E. J. L., Nimmo, C. C., & Shewry, P. R. (1983). N-TERMINAL AMINO ACID SEQUENCES OF ω -GLIADINS AND ω -SECALINS. *Biochimica et biophysica acta*, 747, 138-15.

Kent-Jones, D. W., & Amos, A. J. (1967). *Modern cereal chemistry*. London: Food Trade P.

Kingswood K (1975). The structure and biochemistry of the wheat grain. In: Spicer A. (ed), *Bread: social, nutritional and agricultural aspects of wheaten bread*. London: Appl Sci Publ: 47–65.

- Köhler, P., Belitz, H. D., & Wieser, H. (1993). Disulphide bonds in wheat gluten: further cystine peptides from high molecular weight (HMW) and low molecular weight (LMW) subunits of glutenin and from γ -gliadins. *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung*, 196(3), 239-247.
- Laemmli, U.K. (1970). Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage. T4. *Nature*, 227(5259), 680-685.
- MacRitchie, F., & Lafiandra, D. (1997). Structure-function relationships of wheat proteins.
- Lawrence, G. J., MacRitchie, F., & Wrigley, C. W. (1988). Dough and baking quality of wheat lines deficient in glutenin subunits controlled by the Glu-A1, Glu-B1 and Glu-D1 loci. *Journal of Cereal Science*, 7(2), 109-112
- Lookhart, G.L., Bean, S.R., and Bietz, J.A. 2003. HPLC of Gluten Monomeric Proteins. Ch. 4 in: *Wheat Gluten Protein Analysis*. Shewy, P.R., and Lookhart, G.L. eds. Am. Assoc. Cereal Chem.: St. Paul, MN.
- Lookhart, G. L., Jones, B. L., Hall, S. B., & Finney, K. F. (1982). An Improved Method for Standardizing Polyacrylamide Gel Electrophoresis. *Cereal Chem*, 59(3), 178-181.
- MacRitchie, F. (1999). Wheat proteins: characterization and role in flour functionality. *Cereal Foods World*, 44(4), 188-193.
- MacRitchie, F. (1992). Physicochemical properties of wheat proteins in relation to functionality. In *Advances in food and nutrition, research* (Vol. 36, pp. 1-87). Academic Press.
- MacRitchie, F. (1987). Evaluation of contributions from wheat protein fractions to dough mixing and breadmaking. *Journal of Cereal Science*, 6(3), 259-268.

- Mann, G., Diffey, S., Cullis, B., Azanza, F., Martin, D., Kelly, A., & Kutty, I. (2009). Genetic control of wheat quality: interactions between chromosomal regions determining protein content and composition, dough rheology, and sponge and dough baking properties. *Theoretical and Applied Genetics*, 118(8), 1519-1537.
- Metakovsky, E. V., Branlard, G., Chernakov, V. M., Upelnik, V. P., Redaelli, R., & Pogna, N. E. (1997). Recombination mapping of some chromosome 1A-, 1B-, 1D- and 6B-controlled gliadins and low-molecular-weight glutenin subunits in common wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 94(6-7), 788-795.
- Miralles, D. J., & Slafer, G. A. (2007). Sink limitations to yield in wheat: how could it be reduced? *Journal of Agricultural Science*, 2007, vol. 145, núm. 2, p. 139-149.
- Morris C.F. and Rose S.P. (1996). Wheat. In: Henry R.J. and Kettlewell P.S. (eds), *Cereal Grain Quality*. New York: Chapman Hall, pp. 3-54.
- Morris, C. F. (2002). Puroindolines: the molecular genetic basis of wheat grain hardness. *Plant molecular biology*, 48(5-6), 633-647.
- Müller, S., Vensel, W. H., Kasarda, D. D., Köhler, P., & Wieser, H. (1998). Disulphide bonds of adjacent cysteine residues in low molecular weight subunits of wheat glutenin. *Journal of Cereal Science*, 27(2), 109-116.
- Nagamine, T., Kai, Y., Takayama, T., Yanagisawa, T., & Taya, S. (2000). Allelic variation at the Glu-1 and Glu-3 loci in southern Japanese wheats, and its effects on gluten properties. *Journal of Cereal Science*, 32(2), 129-135.
- Nieto-Taladriz, M. T., Perretant, M. R., & Rousset, M. (1994). Effect of gliadins and HMW and LMW subunits of glutenin on dough properties in the F 6 recombinant inbred lines from a bread wheat cross. *Theoretical and Applied Genetics*, 88(1), 81-88.
- Olsen O. A. (2001). Endosperm development: cellularization and cell fate specification. *Annu.Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 52: 233–267 [10.1146/annurev.arplant.52.1.233](https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.52.1.233).

- Olsen, O. A. (2004). Nuclear endosperm development in cereals and *Arabidopsis thaliana*. *The Plant Cell*, 16(suppl 1), S214-S227.
- Onipe, O. O., Jideani, A. I., & Beswa, D. (2015). Composition and functionality of wheat bran and its application in some cereal food products. *International journal of food science & technology*, 50(12), 2509-2518.
- Payne, P. I. (1987). Genetics of wheat storage proteins and the effect of allelic variation on bread-making quality. *Annual Review of Plant Physiology*, 38(1), 141-153.
- Payne, P. I., Nightingale, M. A., Krattiger, A. F., & Holt, L. M. (1987). The relationship between HMW glutenin subunit composition and the bread-making quality of British-grown wheat varieties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 40(1), 51-65.
- Payne, P. I. (1986). Endosperm proteins. In: *plant gene research: a genetic approach to plant biochemistry*. Blonstein, AD and King, P. J.
- Payne, P. I., Holt, L. M., Jackson, E. A., & Law, C. N. (1984). Wheat storage proteins: their genetics and their potential for manipulation by plant breeding. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, 304(1120), 359-371.
- Payne, P. I., & Lawrence, G. J. (1983). Catalogue of alleles for the complex gene loci, Glu-A1, Glu-B1, and Glu-D1, which code for high-molecular-weight subunits of glutenin in hexaploid wheat. *Cereal Research Communications*, 29-35.
- Payne, P. I., Corfield, K. G., Holt, L. M., & Blackman, J. A. (1981). Correlations between the inheritance of certain high-molecular weight subunits of glutenin and bread-making quality in progenies of six crosses of bread wheat. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 32(1), 51-60.
- Payne, P. I., Law, C. N., & Mudd, E. E. (1980). Control by homoeologous group 1 chromosomes of the high-molecular-weight subunits of glutenin, a major protein of wheat endosperm. *Theoretical and applied genetics*, 58(3-4), 113-120.

Pedersen, B., Bach Knudsen, K. E., & Eggum, B. O. (1989). Nutritive value of cereal products with emphasis on the effect of milling. *World review of nutrition and dietetics*, 60(1-91).

Peña, R. J., Gonzalez-Santoyo, H., & Cervantes, F. (2004). BREAD-MAKING QUALITY-RELATED PARAMETERS COMMONLY USED IN. The gluten proteins, 295, 156.

Peña, R. J., Trethowan, R., Pfeiffer, W. H., & Ginkel, M. V. (2002). Quality (end-use) improvement in wheat: compositional, genetic, and environmental factors. *Journal of crop roduction*, 5(1-2), 1-37.

PIEAES 2009. Patronato para la investigación y experimentación agrícola del Estado de Sonora A.C.

Pogna, N. E., Autran, J. C., Mellini, F., Lafiandra, D., & Feillet, P. (1990). Chromosome 1B-encoded gliadins and glutenin subunits in durum wheat: genetics and relationship to gluten strength. *Journal of Cereal Science*, 11(1), 15-34.

Preston, K. R., Lukow, O. M., & Morgan, B. (1992). Analysis of relationships between flour quality properties and protein fractions in a world wheat collection. *Cereal chemistry*, 69(5), 560-567.

Quaglia, G. 1991. *Ciencia y Tecnología de la Panificación*. Ed. Acribia Zaragoza España.

Rao, M. A., & Steffe, J. F. (Eds.). (1992). *Viscoelastic properties of foods* (pp. 355-370). New York: Elsevier Applied Science.

Reynolds, M. P., & Borlaug, N. E. (2006). Impacts of breeding on international collaborative wheat improvement. *The Journal of Agricultural Science*, 144(1), 3-17.

Rodríguez Bores, F. J., & Castilla Chacón, F. (1979). Métodos reológicos para la determinación del estado físico de la masa en la selección de líneas de trigo [*Triticum aestivum*]. Rheological methods for determining the mass physical state in wheat [*Triticum aestivum*] strains selection. *Agricultura Técnica en México (México)*. v. 5 (1) p. 31-39.

Scott Blair, G. W., & Potel, P. (1937). A preliminary study of the physical significance of certain properties measured by the Chopin extensimeter for testing flour doughs. *Cereal Chem*, 14, 257.

Segalmex seguridad alimentaria mexicana 10 de septiembre 2019. Padilla Loreda, S., & Quintero Soto, M. L. Seguridad alimentaria y sustentabilidad en las políticas públicas.

Sayre, K. D., Singh, R. P., Huerta-Espino, J., & Rajaram, S. (1998). Genetic progress in reducing losses to leaf rust in CIMMYT-derived Mexican spring wheat cultivars. *Crop science*, 38(3), 654-659.

Serna-Saldívar, S. R. O. (2009). *Química, Almacenamiento e Industrialización de los Cereales*. D.F. México: AGT Editor.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, (SIAP) Boletín mensual de avance de la producción de trigo grano. de marzo 2019.

Shewry, P. R., Halford, N. G., & Lafiandra, D. (2003). Genetics of wheat gluten proteins. In *Advances in genetics* (Vol. 49, pp. 111-184). Academic Press.

Shewry, P. R., & Lookhart, G. L. (2003). Wheat gluten protein analysis. American Association of Cereal Chemists.

Shewry, P. R., Tatham, A. S., & Halford, N. G. (1999). The prolamins of the Triticeae. In *Seed proteins* (pp. 35-78). Springer, Dordrecht.

Shewry, P. R., & Tatham, A. S. (1997). Disulphide bonds in wheat gluten proteins. *Journal of Cereal Science*, 25(3), 207-227

Shewry, P. R. (1996). Assembly and post-translation modification of wheat gluten proteins. *Gluten*, 96, 121-128.

Shewry, P. R., Tatham, A. S., Forde, J., Kreis, M., & Miflin, B. J. (1986). The classification and nomenclature of wheat gluten proteins: a reassessment. *Journal of cereal science*, 4(2), 97-106.

Shuey, W. C. (1974, January). PRACTICAL INSTRUMENTS FOR RHEOLOGICAL MEASUREMENTS ON WHEAT PRODUCTS. In *CEREAL SCIENCE TODAY* (Vol. 19, No. 9, pp. 388-388).

SIAP Servicio de información agroalimentaria y pesquera 2019, <https://blogagricultura.com/estadisticas-trigo-mexico/>

Simmonds, D. H., Barlow, K. K., & Wrigley, C. W. (1973). Biochemical basis of grain hardness in wheat. *Cereal Chemistry*. 50:553-562.

Simmonds, D. H. (1989). *Wheat and wheat quality in Australia*. CSIRO PUBLISHING.

Singh, M., & Khatkar, B. S. (2005). Structural and functional properties of wheat storage proteins: a review. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 42(6), 455-471.

Singh, H., & MacRitchie, F. (2001). Application of polymer science to properties of gluten. *Journal of Cereal Science*, 33(3), 231-243.

Singh, N. K., Shepherd, K. W., & Cornish, G. B. (1991). A simplified SDS—PAGE procedure for separating LMW subunits of glutenin. *Journal of cereal science*, 14(3), 203-208.

Slavin, J.L.; Martini, M.C.; Jacobs, D.R. y Maquart, L. (1999). Plausible Mechaniss for the protectiveness of whole grains. *Am J Clin Nutr*. 70 (3) 459-463

Southan, M., & MacRitchie, F. (1999). Molecular weight distribution of wheat proteins. *Cereal Chemistry*, 76(6), 827-836.

- Steeple, S. (2010). *Rheological characterization of four Kansas hard red winter wheat flour-water dough systems* (Doctoral dissertation, Kansas State University).
- Swanson, C. O., & Working, E. B. (1933). Testing the quality of flour by the recording dough mixer. *Cereal Chem*, 10(1), 1-29.
- Swanson, C.O. and Jhonson, J.A. 1943. Description of mixograms. *Cereal Chem*. 20:38.
- Tatham, A. S., Shewry, P. R., Belton, P.S. 1990. Structural studies of cereal prolamines, including wheat gluten. In *Advances in Cereal Science and Technology*, Y., P., ed. (USA, American Association of Cereal Chemists).
- Tosi, P., Gritsch, C. S., He, J., & Shewry, P. R. (2011). Distribution of gluten proteins in bread wheat (*Triticum aestivum*) grain. *Annals of botany*, 108(1), 23-35.
- Uthayakumaran, S., Gras, P. W., Stoddard, F. L., & Bekes, F. (1999). Effect of varying protein content and glutenin-to-gliadin ratio on the functional properties of wheat dough. *Cereal Chemistry*, 76(3), 389-394.
- Villaseñor, M. E., Sangermán, D. M. J., & Espitia, E. R. (2000). La problemática del cultivo de trigo (*Triticum aestivum* L.) en México y su inserción en el tratado de libre comercio. In *Problemática de los Cultivos Básicos y su Perspectiva Frente al Tratado de Libre Comercio. Memoria Simposio Nacional* (Vol. 10, pp. 7-17).
- Walker, C. E., & Hazelton, J. L. (1996). Dough rheological tests. *Cereal foods world*, 41(1), 23-28.
- Wang, C., & Kovacs, M. I. P. (2002). Swelling Index of Glutenin Test. II. Application in Prediction of Dough Properties and End-Use Quality. *Cereal Chemistry*, 79(2), 190-196.
- Weegels, P. L., Hamer, R. J., & Schofield, J. 1. (1996). Functional properties of wheat glutenin. *Journal of Cereal Science*, 23(1), 1-18.
- Wellings, C. R. (2011). Global status of stripe rust: a review of historical and current threats. *Euphytica*, 179(1), 129-141.

Weston, A., and Brown, P.R. 1997. HPLC and CE Principles and Practice. Academic Press. Ch. 2:24-70

Wieser, H. (2007). Chemistry of gluten proteins. *Food microbiology*, 24(2), 115-119.

Wilson, H., & Godiño, M. (2000). Tecnología de almacenamiento de granos de trigo. INIA Uruguay.

Wood PJ, Fulcher RG, Stone BA (1983). Estudios sobre la especificidad de la interacción de los componentes de la pared celular del cereal con rojo Congo y calcofluor: detección específica e histoquímica de (1-3), (1-4) - β -D-glucano. *J. Cereal Sci.* 1 95-110 10. 1016.

Woychik, J. H., Boundy, J. A., & Dimler, R. J. (1961). Starch gel electrophoresis of wheat gluten proteins with concentrated urea. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 94(3), 477-482.

Wrigley, C. W., & Morris, C. F. (1996). Breeding cereals for quality improvement. In *Cereal, grain quality* (pp. 321-369). Springer, Dordrecht.

Xiaolong Wang, Rudi Appels , Xiaoke Zhang, Dean Diepeveen, Kitti Torok, Sandor Tomoskozi, Ferenc Bekes e, Wujun Mab, Peter Sharp f, Shahidul Islam b,† *Food Chemistry* 231 (2017) 247–257.

Yang, Y. D., Hammes, U. Z., Taylor, C. G., Schachtman, D. P., and Nielsen, E. (2006). High-affinity auxin transport by the AUX1 influx carrier protein. *Curr. Biol.* 16, 1123–1127.

Young TE, Gallie DR (2000). " Muerte celular programada durante el desarrollo del endosperma", en *Muerte celular programada en plantas superiores* Eds Lam E., Fukuda H., Greenberg J., editores. (Amsterdam: Springer;) 39-57.