



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA
DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD
DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO EN ALIMENTOS
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

Especialidad en Almacenamiento y Procesamiento de Granos

**Efecto de la Incorporación de Salvado de Trigo Extrudido a la
Formulación para Elaborar Galletas y su Impacto en las
Características Físicoquímicas e Índice Glucémico *In vitro***

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

Faviola Reyes Pérez

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

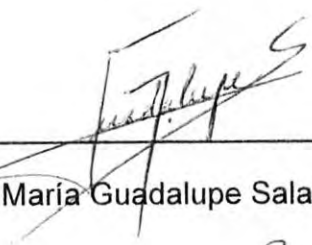


Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

APROBACIÓN

Efecto de la Incorporación de Salvado de Trigo extrudido a la Formulación para Elaborar Galletas y su Impacto en las Características Fisicoquímicas e Índice Glucémico In vitro

Faviola Reyes Pérez



Dra. María Guadalupe Salazar García



Dr. Benjamín Ramírez Wong



Dra. Alma Rosa Islas Rubio



M.C. Ana Lourdes Romero Baranzini

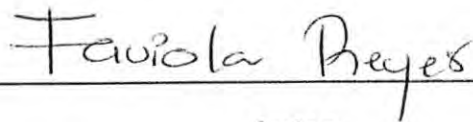
DERECHOS DE AUTOR

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

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

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

Atentamente



Autor



Coordinador del Programa del Posgrado

Hermosillo, Sonora

Agosto de 2012

AGRADECIMIENTOS

Al **Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos de la Universidad de Sonora** por ayudar en mi desarrollo académico para obtener el grado de Maestra en Ciencias.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología**, por contribuir económicamente para mi educación de posgrado.

A la **División de Ciencias Biológicas y de la Salud** por el apoyo obtenido mediante el Recurso PIFI 2011, especialmente al **Dr. Mario Onofre Cortez Rocha**.

Al **molino "La Fama"** por la donación de las materias primas requeridas para el desarrollo del trabajo.

A mi directora de tesis **Dra. María Guadalupe Salazar García** por su guía, apoyo y dedicación pero sobretodo por su confianza y enseñanzas durante el desarrollo de este trabajo. Le agradezco infinitamente sus consejos y que siempre haya creído en mí.

A la **MC. Ana Lourdes Romero Baranzini** por todas sus enseñanzas, colaboración y completa disposición para la realización de mi proyecto. Gracias por su confianza.

A la **Dra. Alma Rosas Islas Rubio** por sus atinados comentarios y aportaciones para la mejora de este trabajo, así como por su disposición y apoyo.

Al **Dr. Benjamín Ramírez Wong** por su importante colaboración a lo largo del trabajo de investigación, por sus sugerencias y comentarios para mejorar este trabajo de investigación.

Al **Centro de Desarrollo de Productos Bióticos del Instituto Politécnico Nacional (CEPROBI-IPN)** por las facilidades otorgadas en el uso de sus instalaciones y equipo de laboratorio para el desarrollo de parte de este trabajo.

Al **Dr. Luis Arturo Bello Pérez** y a la **Dra. Perla Osorio Díaz** por todo su apoyo, disposición y enseñanza para la realización de parte del trabajo experimental.

A todos **mis profesores** del posgrado, de cada uno de ellos llevo una enseñanza.

Al personal administrativo del **DIPA** por su ayuda cuando fue requerida, así como a todos aquellos que hicieron posible la culminación de este trabajo.

¡Muchas Gracias!

RESUMEN

La fibra dietética es parte de una dieta balanceada, estudios confirman que su consumo aporta un beneficio para la salud en la reducción de ciertas enfermedades entre ellas obesidad, diabetes tipo II y cáncer de colon, entre otras. Además la fibra dietética puede reducir el índice glucémico (IG) de los alimentos. Sin embargo, la incorporación de fibra a los alimentos, ha sido limitada porque los productos presentan pobres propiedades funcionales y efectos deteriorativos a la calidad total. Es por ello que el objetivo del presente estudio fue determinar el efecto de la adición de salvado de trigo extrudido con dos diferentes tamaños de partícula a harina de trigo sobre las características fisicoquímicas y funcionales de galletas. Se utilizó salvado de trigo comercial el cual fue sometido a extrusión bajo tres perfiles de temperatura (perfil 1, perfil 2 ó perfil 3) y tres valores de humedad distintos (15, 23 ó 31%). Los extrudidos fueron caracterizados fisicoquímicamente, y posteriormente sometidos a una molienda obteniéndose así una fracción gruesa (SG) (>0.28 mm) y otra fracción fina (SF) (<0.28 mm), los cuales se utilizaron en la formulación para elaborar galletas (70% harina y 30% salvado de trigo extrudido SG y SF), también se elaboraron tres galletas control. Las galletas se evaluaron física y químicamente. Se dividió el trabajo en dos etapas para las cuales se utilizaron dos diseño factoriales, con dos y tres factores, respectivamente. Se encontró un efecto muy significativo ($p < 0.01$) del perfil de temperatura (PT), contenido de humedad (H) y PT*H sobre el IAA y la densidad de los extrudidos de salvado de trigo. El diámetro, el grosor y el color (L, a, b) de las galletas se afectó significativamente ($p < 0.01$) por el PT, H, fracción de molienda (F) así como sus interacciones. Mediante una prueba de

contrastes, se determinó que los tratamientos de las galletas 5 (perfil 1, 31% humedad y SG), 11 (perfil 2, 31% humedad y SG) y 14 (perfil 3, 15% humedad y SF) presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$), se evaluó su contenido de fibra dietética (FDI, FDS y FDT) y se estimó el valor de su IG. El contenido de FDI, FDS y FDT de las galletas incrementó en las galletas elaboradas con salvado de trigo extrudido, mientras que el IG se logró reducir (de 80.16 a 68.54) en la galleta elaborada con el tratamiento 11. Se concluyó que el salvado de trigo extrudido FG puede mejorar el diámetro, incrementar el contenido de fibra dietética y reducir el IG de las galletas bajo las condiciones de esta investigación, y obtener así una galleta con mejores características físicas y un mayor beneficio a la salud de los consumidores.

CONTENIDO

	Página
AGRADECIMIENTOS.....	iv
RESUMEN.....	v
LISTA DE TABLAS.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xi
INTRODUCCIÓN.....	1
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
Descripción del Grano de Trigo.....	4
Proceso de Molienda del Trigo.....	5
Salvado de Trigo.....	6
Carbohidratos: Tipos e Importancia.....	7
Digestibilidad de los Carbohidratos.....	9
Factores que Afectan la Digestibilidad del Almidón.....	11
Factores intrínsecos.....	11
Factores extrínsecos.....	12
Generalidades e Importancia de la Fibra Dietética.....	13
Fibra Dietética y Digestibilidad del Almidón.....	15
Composición Química de la Fibra Dietética.....	17
Celulosa.....	17
Hemicelulosa.....	17
Lignina.....	18
Pectinas.....	18
B-glucanos.....	19
Efectos Fisiológicos de la Fibra Dietética.....	19
Efecto de la Fibra Dietética en Enfermedades.....	21
Estreñimiento.....	21
Diarrea.....	22
Diverticulitis.....	22
Cáncer Colorrectal.....	23
Enfermedad Cardiovascular.....	23
Diabetes.....	23
Consumo de Fibra Dietética.....	24
Tratamientos Utilizados para Mejorar la Funcionalidad de las Fibras... ..	26
Tratamientos con Peróxido de Hidrógeno en Medio Alcalino.....	26
Modificaciones Enzimáticas.....	26
Modificaciones por Medio de Extrusión.....	27
Proceso de Extrusión y su Impacto en la Calidad del Alimento.....	27
Aspectos de Ingeniería de un Extrusor de Alimentos.....	29
Componentes Básicos del Extrusor de un Solo Tornillo.....	30
Mecanismo de Alimentación.....	30
Tornillo.....	30
Cañón o barril del extrusor.....	31
Sección de alimentación.....	31

Sección de compresión.....	32
Sección de alta presión.....	32
Dado o boquilla.....	32
Funcionamiento Básico del Extrusor de un Solo Tornillo.....	33
Efecto del Proceso de Extrusión en el Contenido de Fibra Dietética.....	33
Índice Glucémico.....	35
Índice Glucémico de los Carbohidratos.....	37
Definición de Galleta.....	40
Características Generales en la Elaboración de Galletas.....	40
HIPÓTESIS.....	42
OBJETIVOS.....	43
Objetivo General.....	43
Objetivos Particulares.....	43
MATERIALES Y MÉTODOS.....	44
Materia Prima.....	44
Acondicionamiento.....	44
Proceso de extrusión.....	44
Mezclas de Harina.....	45
Análisis Químico.....	46
Evaluación Fisicoquímica de los Extrudidos.....	46
Índice de Absorción de Agua.....	47
Índice de Expansión.....	47
Densidad.....	47
Elaboración y Evaluación Física de las Galletas.....	47
Determinación de Color.....	48
Determinación de Textura.....	48
Estimación del Índice Glucémico de las Galletas.....	49
Almidón Disponible.....	49
Tasa de Hidrólisis <i>in vitro</i>	50
Estimación del Índice Glucémico (IGe).....	50
Diseño Experimental y Análisis Estadístico.....	51
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	55
Análisis Químico de las Materias Primas.....	55
Análisis Fisicoquímicos de los Extrudidos de Salvado de Trigo.....	57
Índice de Absorción de Agua (IAA) de los Extrudidos.....	57
Índice de Expansión de los Extrudidos.....	60
Densidad de los Extrudidos.....	64
Determinación de Color de los Extrudidos: L, a y b.....	66
Parámetros Físicos de las Galletas Elaboradas con Salvado de Trigo Extrudido con Dos Fracciones de Molienda.....	68
Determinación de Color: L, a y b.....	70
Determinación de las Medidas Físicas: Diámetro, Grosor y Factor de Expansión de las Galletas.....	75

Fuerza Máxima de Ruptura de las Galletas.....	82
Parámetros Químicos de las Galletas Elaboradas.....	85
Determinación de Fibra Dietética de las Galletas.....	85
Estimación del Índice Glucémico en las Galletas.....	89
CONCLUSIONES.....	96
RECOMENDACIONES.....	97
REFERENCIAS.....	99

LISTA DE TABLAS

TABLA		Página
1	Clasificación de los componentes de la fibra dietética basada en su solubilidad/fermentabilidad.....	16
2	Tratamientos experimentales para el proceso de extrusión.....	52
3	Tratamientos experimentales para la elaboración de las galletas.....	53
4	Análisis químico de las materias primas.....	56
5	Análisis de varianza, valor de F, del efecto del perfil de temperatura y contenido de humedad sobre el Índice de absorción de agua, rango de expansión, densidad y determinación de color (L, a y b) de los extrudidos de salvado de trigo.....	58
6	Análisis de varianza, valor de F, del efecto del perfil de temperatura, contenido de humedad, y fracción de molienda del salvado de trigo extrudido sobre el valor de L, a, b, diámetro, grosor, factor de expansión y firmeza de las galletas elaboradas con el salvado de trigo extrudido molido.....	71
7	Contenido de fibra dietética insoluble, soluble y total en las galletas.....	86
8	Estimación del índice glucémico (IGe) de las galletas.....	90

LISTA DE FIGURAS

FIGURA		Página
1	Efecto del perfil de temperatura y el contenido de humedad sobre el índice de absorción de agua de los extrudidos de salvado de trigo.....	59
2	Efecto del contenido de humedad del proceso de extrusión sobre el índice de expansión de los extrudidos de salvado de trigo.....	61
3	Efecto del perfil de temperatura del proceso de extrusión sobre el índice de expansión de los extrudidos de salvado de trigo.....	63
4	Efecto del contenido de humedad (%) del proceso de extrusión sobre la densidad de los extrudidos de salvado de trigo.....	65
5	Efecto del perfil de temperatura y el contenido de humedad del proceso de extrusión sobre la luminosidad (L) de los extrudidos....	67
6	Efecto del contenido de humedad (%) del proceso de extrusión sobre el parámetro de color b de los extrudidos de salvado de trigo.....	69
7	Efecto del perfil de temperatura y la fracción de molienda del salvado de trigo extrudido sobre el parámetro luminosidad (L).....	72
8	Efecto del perfil de temperatura y el contenido de humedad (%) del salvado de trigo extrudido sobre el color (parámetro b) de las galletas elaboradas.....	74
9	Efecto del perfil de temperatura y contenido de humedad del salvado de trigo extrudido sobre el diámetro de las galletas.....	76
10	Efecto de la fracción de molienda (SF: salvado fracción fina y SG: salvado fracción gruesa) y el contenido de humedad del salvado de trigo extrudido sobre el diámetro de la galleta.....	78
11	Efecto de la fracción de molienda (SF: salvado fracción fina y SG: salvado fracción gruesa) y el perfil de temperatura del salvado de trigo extrudido sobre la fuerza máxima de ruptura de la galleta.....	83

12	Efecto de la fracción de molienda (SF: salvado fracción fina y SG: salvado fracción gruesa) y el contenido de humedad del salvado de trigo extrudido sobre la fuerza máxima de ruptura de las galletas.....	84
----	---	----

INTRODUCCIÓN

El trigo (*Triticum aestivum* L.) es de los cereales más importante y es el principal componente de la mayoría de las dietas debido a su adaptabilidad agronómica, su calidad nutricional y la habilidad de su harina para producir una gran variedad de alimentos (Wrigley, 2009). En el proceso de molienda del trigo el principal objetivo del molinero es separar el endospermo almidonoso, el cual se recupera como harina blanca, de las capas exteriores que son llamadas salvado. El salvado está formado por múltiples capas que comprenden del 10-15% del peso del grano (Antoine et al., 2003).

El salvado es el principal subproducto de la molienda del trigo que sirve como una de las principales fuentes de fibra dietética para la industria panadera (Zhang y Moore 1997; Anwarul et al., 2002). La fibra dietética es parte esencial de la dieta humana es un constituyente importante para una buena salud debido a sus propiedades funcionales (Lee et al., 2004). Se ha encontrado que el consumo de fibra dietética reduce el riesgo de contraer graves enfermedades, así como el impacto negativo personal y social de ciertas enfermedades como son el cáncer colorrectal, enfermedades cardiovasculares y diabetes (Collins et al., 2010; Zhang y Hamaker, 2010).

Sin embargo, la fibra dietética a menudo afecta las características físicas, químicas, reológicas y sensoriales de los alimentos procesados comprometiendo así la calidad de los mismos (Stanyon y Costello 1990; Gajula et al., 2008; Noort et al., 2010). Las modificaciones físico-químicas que sufre la fibra durante el proceso de extrusión es

una posible técnica para mejorar sus propiedades funcionales y posiblemente agregar un mejoramiento de la calidad de la fibra (Gualberto et al., 1997, Gajula et al., 2008). Después de la extrusión y seguido de un proceso de molienda el salvado de trigo tiene una apreciación sensorial aceptable, con ausencia de arenosidad y propiedades de textura que son compatibles con una amplia variedad de productos (Dreher, 1999; Gajula et al., 2008).

El proceso de extrusión es utilizado ampliamente en la industria alimentaria, muchos alimentos a base de cereales se elaboran por este proceso como los son bocadillos, cereales para desayuno y pastas, entre otros. La extrusión puede resultar en la fragmentación de proteínas, almidones, polisacáridos y polisacáridos no almidonosos, creando moléculas reactivas las cuales tal vez pueden formar nuevas uniones que podrían resultar en un beneficio para la salud (Kahlon et al., 2006), se sabe que también mejora la calidad nutricional de los alimentos, la digestibilidad de algunos nutrientes, solubiliza la fibra e inactiva algunos factores antinutricionales (Vernaza et al., 2009). Durante la extrusión los componentes de la fibra sufren grandes modificaciones químicas, lo cual resulta en propiedades físicas, químicas, estructurales y funcionales únicas (Larrea et al., 2010).

El consumo de fibra dietética actualmente se encuentra estrechamente relacionado a un nuevo concepto originalmente desarrollado para personas con diabetes mellitus, siendo este el índice glucémico (IG), se sabe que la incorporación de fibra en los alimentos provoca una disminución del valor del IG de los mismos (Jenkins et al., 1981; Wong y Jenkins, 2007).

El índice glucémico es un concepto desarrollado para caracterizar el potencial incremento de la glucosa en sangre que ocasionan los carbohidratos en los alimentos (Chibbar et al., 2010). Así también se define como el valor que describe el incremento de la glucosa en sangre seguida por la ingesta de un alimento que contenga carbohidratos comparado con la hiperglucemia inducida por el consumo de una carga equivalente de un alimento estándar (Magaletta et al., 2010). Además permite clasificar a los alimentos en base a la velocidad de liberación y absorción de carbohidratos (Rizkalla et al., 2002).

La búsqueda por desarrollar nuevos productos que satisfagan la creciente demanda por alimentos más saludables ha llevado a la incorporación de distintas fuentes de fibra en los alimentos buscando con esto reducir el valor de índice glucémico de los mismos (Rosell et al., 2006; Arías-García et al., 2007). Se ha encontrado que los productos de panadería al ser una parte importante de una dieta balanceada son buenos portadores de fibra dietética y por tanto es posible buscar disminuir el índice glucémico de estos productos (Athayde et al., 2009; Angioloni y Collar, 2010).

La industria alimentaria se enfrenta al reto de desarrollar nuevos productos alimenticios que presenten un beneficio para la salud, así como características nutritivas y sensoriales para ser aceptados por el consumidor. Es por lo anterior que el objetivo del presente trabajo es determinar el efecto de la incorporación de salvado de trigo extrudido a la formulación para elaborar galletas y su impacto en las características fisicoquímicas e índice glucémico in vitro.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Descripción del Grano de Trigo

Los cereales son la principal fuente de nutrición humana, y son incorporados en una gran variedad de productos. Los principales componentes de los granos de cereales son almidón (60-70%) y proteínas (10-15%) (Izydorczyk y Dexter 2008; Robert et al., 2011).

El trigo (*Triticum aestivum* L.) es de los cereales más importante y es el principal componente de la mayoría de las dietas debido a su adaptabilidad agronómica, su calidad nutricional y la habilidad de su harina para producir una gran variedad de alimentos (Wrigley, 2009). La cariósida o grano tiene una longitud por término medio de 8 mm y un peso aproximado de 35 mg. El tamaño de los granos varía según la variedad y según la posición en la espiga (Hoseney, 1991).

Además del embrión desde el centro hacia la periferia del grano se pueden distinguir el endospermo (compuesto de endospermo almidonoso y la capa de aleurona), la testa (compuesta de epidermis nucelar) y el pericarpio (formado por las células tubulares, células cruzadas, hipodermis y epidermis) (Antoine et al., 2003). De esta forma la cariósida o grano se subdivide en tres partes fundamentales: pericarpio (12.5%), endospermo (85%) y germen (2.5%) (Quaglia, 1991; Serna-Saldívar, 1996).

En México, los trigos se clasifican de acuerdo a la funcionalidad del gluten en cinco grupos. En la región noroeste del país, Sonora y norte de Sinaloa, se siembran los trigos panaderos y cristalinos pertenecientes a los grupos I, II, IV y V, mientras que

los trigos suaves (grupo III) se cultivan en la región del Bajío y Chihuahua (Serna-Saldívar, 1996).

Proceso de Molienda del Trigo

En el proceso de molienda del trigo, el principal objetivo del molinero es separar el endospermo almidonoso, el cual se recupera como harina blanca, de las capas exteriores que son llamadas salvado (Antoine et al., 2003).

El grano limpio se acondiciona antes de pasar a la molienda. El acondicionamiento es la adición de agua y cuyo objetivo es: a) separar efectivamente el pericarpio del endospermo; b) suavizar al endospermo para lograr una efectiva reducción en su tamaño y c) lograr un mejor comportamiento de las fracciones durante su tamizado (Serna-Saldívar, 1996).

La mayor parte del trigo es molido a través de un sistema de rodillos y tamices. El proceso de molienda convencional empieza cuando el trigo se somete a una operación de limpieza para remover metales, residuos vegetativos, piedras y otros granos. El trigo limpio y debidamente acondicionado se pasa al sistema de quiebra, que consiste en varios molinos de rodillos corrugados estacionados en batería. Los tornillos trabajan con un diferencial de velocidad, pues un rodillo rota a mayores revoluciones que el otro. Las corrugaciones y el diferencial en velocidad logran que el grano se rompa y se abra liberando al pericarpio o cascarilla en forma de pequeñas hojuelas, fracciones o pedazos de endospermo de tamaño medio e inclusive un poco de harina (harina de quiebra) (Serna-Saldívar, 1996).

El material de sistema de quebrado se tamiza y clasifica por tamaño. Las fracciones más gruesas pasa a un segundo sistema para su posterior reducción de tamaño y clasificación con tamices. El propósito principal de la molienda es quebrar el grano en pedazos grandes para obtener el pericarpio o salvado en forma de hojuelas y sin residuos de endospermo. Después, los pedazos del endospermo son reducidos gradualmente hasta obtener la harina (Serna-Saldívar, 1996). Durante el proceso de la molienda del trigo se obtienen una serie de subproductos con características químicas diversas: harina, harinilla, residuos de harina, salvado grueso, salvado fino y deshechos de molienda (Quaglia, 1991).

Salvado de Trigo

El salvado de trigo comprende aproximadamente el 14% de la cariósida y puede estar incluido en la harina integral, pero normalmente, es separado de la harina, y se destina a la alimentación animal (Quaglia, 1991). De acuerdo a Serna-Saldívar (1996) la composición química del salvado de trigo es; humedad 8.8%, proteína 14.9%, materia grasa 4.49%, cenizas 9.18% y fibra cruda 11.84%.

El salvado de trigo está compuesto por varias capas que comprenden un rango de tejidos incluyendo desde el interior hacia el exterior, el pericarpio (epidermis, hipodermis, células transversales y tubulares), la testa, epidermis nuclear, la capa de aleurona y algo de endospermo almidonoso. Es en gran parte disponible como subproducto del proceso de molienda del trigo y contiene un alto nivel de arabinoxilanos (AX) (16-25%) (Swennen et al., 2006; Van Craeyveld et al., 2010).

La harina integral y el salvado de trigo son las fuentes más importantes de fibra dietética en la industria dedicada a la elaboración de productos de panificación (Gajula et al., 2008).

El salvado de trigo es rico en fibra insoluble y soluble. Este abarca 10% de fibra cruda, 26.5% pentosanas, 21.4% de celulosa, 7.51% de almidón, 5.04% de azúcares totales, 2.98% de sacarosa y 4.42% de azúcares reductores (Pomeranz, 1988).

Carbohidratos: Tipos e Importancia

Los carbohidratos son los sustratos principales para el metabolismo energético y su rol en la nutrición humana es proveer energía para las funciones normales del cuerpo. Sin embargo pueden afectar la saciedad, glucosa sanguínea e insulina y el metabolismo de los lípidos. A través de la fermentación pueden ejercer un mayor control sobre las funciones del colon incluyendo el tránsito intestinal, metabolismo y balance de la flora comensal, así también sobre la salud epitelial del intestino grueso (Cummings y Stephen, 2007).

La digestibilidad del almidón en los alimentos varía ampliamente, y esta cambia con la presencia de otros componentes de los alimentos (Björck et al., 1994; Hoover y Zhou, 2003), por lo tanto se ha propuesto una clasificación nutricional del almidón de la dieta, esta clasificación toma en cuenta la cinética de degradación y la digestibilidad completa del almidón y comprende almidón rápidamente digerible (RDS, por sus siglas en inglés), almidón lentamente digerible (SDS, por sus siglas en inglés) y almidón resistente (RS, por sus siglas en inglés). RDS es la fracción del almidón que causa un rápido incremento en el nivel de glucosa en sangre después

de la ingestión, la degradación del almidón a glucosa ocurre aproximadamente en 20 minutos (Englyst et al., 1992; Englyst et al., 2007). SDS es generalmente la forma más deseable del almidón ya que es favorable para el manejo de enfermedades tales como diabetes, hiperlipidemia y además genera saciedad (Lehman y Robin, 2007). Este almidón se digiere en el intestino delgado y atenúa la glucosa postprandial en sangre así como los niveles de insulina, la glucosa se presenta aproximadamente dentro de 100 minutos de haber iniciado la digestión (Jenkins et al., 1981).

RS se define como la fracción de almidón que escapa a la digestión en el intestino delgado o son pobremente absorbidos y/o metabolizados por el cuerpo humano. Además que tiene propiedades nutricionales y funcionales en común con la fibra dietética (Chibbar et al., 2010; Themeier et al., 2005). En el sentido expuesto, el almidón resistente se define como "almidón y los productos de degradación del mismo que no son digeridos en el intestino delgado de individuos sanos". Existen cuatro tipos de almidón resistente:

- Tipo I. Es el almidón físicamente inaccesible para las α -amilasas en el tracto gastrointestinal. Este tipo de almidón resistente es más abundante en cereales molidos parcialmente, semillas y legumbres.
- Tipo II. Es el almidón crudo o nativo que presenta resistencia a la digestión, consecuencia de la combinación de factores tales como tamaño del gránulo, proporción de las moléculas amorfas (moléculas de amilosa) y cristalinas (moléculas de amilopectina), estructura espacial de los

polisacáridos, existencia de complejos entre la molécula de almidón con otros componentes tales como grasa, proteína, entre otros.

- Tipo III. Es el almidón retrogradado. Cuando los almidones se cocinan en presencia de agua, los gránulos se gelatinizan y las moléculas de amilosa y amilopectina se dispersan en el medio acuoso. Los dos factores básicos para que este proceso de gelatinización se produzca son la presencia de agua y el aumento de temperatura. El almidón gelatinizado es digestible prácticamente en su totalidad, pero cuando se enfría, las cadenas de amilosa y amilopectina recristalizan y se enlazan entre sí, dando lugar a estructuras insolubles y resistentes a la acción de las α -amilasas digestivas.
- Tipo IV. Son almidones químicamente modificados que contienen enlaces cruzados que dificultan el acceso enzimático.

El almidón resistente se considera un componente de la fracción insoluble de la fibra dietética aunque, a diferencia de otros polisacáridos no amiláceos contenidos en esta fracción, tiene una alta fermentabilidad, similar a la de muchas fibras solubles (Mataix, 2010).

Digestibilidad de los Carbohidratos

La parte de la energía que se requiere para moverse, llevar a cabo el trabajo y vivir, se consume en forma de carbohidratos, primariamente almidones que son la forma de combustible menos costoso, más fácil de obtener y de digestión más rápida. En los seres humanos, los carbohidratos son degradados por las enzimas que

convierten moléculas complejas en moléculas progresivamente más pequeñas y finalmente en glucosa, la cual entra en el flujo sanguíneo. Los alimentos que contienen almidón son los primeros en ser degradados por la α -amilasa salival la cual hidroliza las cadenas poliméricas del almidón en oligosacáridos pequeños. En el intestino, la α -amilasa pancreática adicionalmente hidroliza el alimento parcialmente digerido. La velocidad inicial de reacción de la hidrólisis es dependiente del grado de polisacáridos ramificados, mayormente como el resultado del impedimento estérico (Park y Rollings, 1994).

Los productos finales de la degradación de la amilosa como sustrato son exclusivamente maltosa y maltotriosa. La degradación de la amilopectina produce preferentemente maltosa, maltotriosa y α -dextrina límite que contiene las uniones ramificadas α -(1 \rightarrow 6). Las enzimas maltosa-glucoamilasa y sucrosa-isomaltasa, además hidrolizan la maltosa y las dextrinas ramificadas en glucosa, la cual se absorbe por el cotransportador sodio-glucosa unido en la superficie luminal de los enterocitos, para ser transportada hacia el torrente sanguíneo, la cual es entonces llevada al hígado y entra en la circulación alcanzando el tejido periférico a través de la acción de la insulina. Esta hormona es secretada por el páncreas, en respuesta al incremento de glucosa en sangre (Annison y Topping, 1994).

La facilidad con que los carbohidratos de los alimentos se degradan y absorben al flujo sanguíneo es de gran interés para la salud humana y se encuentra asociado con beneficios a la salud (Zhang y Hamaker, 2009).

Las determinaciones de la digestibilidad de los carbohidratos mediante análisis *in vivo* son invasivas, requieren de una labor intensiva, además de resultar un proceso caro. Por lo tanto se hace énfasis en los ensayos *in vitro* de digestión enzimática (Chibbar et al., 2010).

Factores que Afectan la Digestibilidad del Almidón

La digestibilidad del almidón puede ser afectada tanto por factores intrínsecos como extrínsecos, los cuales se mencionan a continuación:

Factores intrínsecos

Barreras físicas, como puede ser el tamaño de partícula del alimento, el cual afecta la hidrólisis con amilasas como resultado del área superficial, debido a que partículas más pequeñas, son digeridas más rápidamente que las grandes (Annison y Topping, 1994).

La presencia de complejos entre el almidón y lípidos, así como las proteínas que rodean el gránulo, hacen más lenta la acción de las enzimas. En un trabajo realizado por Tovar et al., (1990) con frijoles rojos (*Phaseolus vulgaris* L), reportan que la amilólisis fue favorecida por un proceso previo de homogenización, el cual demuestra que la ruptura de las paredes celulares es un prerrequisito para una eficiente digestión y el pre tratamiento con pepsina hidroliza a las proteínas que rodean al gránulo de almidón evitando la presencia de complejos entre almidón y proteínas que hacen más lenta la hidrólisis.

La relación que existe de amilosa/amilopectina en los diferentes tipos de almidón es otro factor que afecta la digestibilidad del almidón, en cereales como el maíz, arroz y cebada, la hidrólisis puede variar considerablemente con respecto a algunos de sus genotipos (Annison y Topping, 1994; Hoover y Zhou, 2003; Li et al., 2004). Frei et al., (2003) realizaron un estudio con arroz con alto contenido de amilosa, el cual presentó un menor índice de hidrólisis comparado con una variedad de menor contenido de amilosa.

La estructura del gránulo de almidón es otro factor que afecta su digestibilidad. Los gránulos de almidón presentan diferentes formas y tamaños así como la presencia de poros en la superficie (Annison y Topping, 2004; Hoover y Zhou, 2003).

Los tipos de cristales A-, B- y C- de los diversos almidones (clasificados de acuerdo a su patrón de difracción en rayos x) presentan diferente susceptibilidad a la hidrólisis con α -amilasa. Generalmente, los almidones que presentan cristales tipo A (cereales y tapioca) son más rápidamente hidrolizados que los almidones que presentan cristales tipo B (amilomaíz y leguminosas) (Li et al., 2004).

Factores extrínsecos

En los alimentos procesados, el almidón puede permanecer sin cambio, completamente gelatinizado o parcialmente retrogradado. Los almidones en estado nativo son altamente resistentes a la hidrólisis enzimática, comparados con los almidones que han sido gelatinizados (Annison y Topping, 1994). Zia-ur et al., (2001) reportaron un incremento del 111%, en la digestibilidad de almidón en frijoles rojos cocinados en olla de presión, comparados con frijoles rojos en estado crudo.

El tiempo de almacenamiento y las condiciones de almacenamiento son otros factores extrínsecos que influyen en la digestibilidad del almidón, las cuales pueden favorecer la formación de almidón resistente retrogradado (Annison y Topping, 1994). Rendón-Villalobos et al., (2002) obtuvieron valores de digestibilidad del almidón en tortillas que fueron almacenadas en refrigeración durante varios días, menores que en tortillas frescas.

La presencia de antinutrientes también afecta la digestibilidad del almidón. A diferencia de los cereales y tubérculos, las leguminosas son fuentes ricas de antinutrientes tales como el ácido fítico, polifenoles y lectinas. Estas sustancias son capaces de reducir la biodisponibilidad de proteínas y minerales (Björck, 1996).

Generalidades e Importancia de la Fibra Dietética

La Asociación Americana de Químicos en Cereales (AACC) define a la fibra dietética como: "la parte comestible de los alimentos de procedencia vegetal o los hidratos de carbono análogos que son resistentes a la digestión y/o absorción en el intestino delgado, con fermentación completa o parcial en el intestino grueso; químicamente, fibra dietética incluye polisacáridos, oligosacáridos, inulina, lignina y sustancias asociadas de la planta; fisiológicamente, la fibra dietética promueve efectos benéficos como el efecto laxante y/o disminución de los niveles de colesterol y de glucosa de la sangre" (Mataix, 2010).

El concepto de fibra dietética fue propuesto por Trowell (1972, 1976), como los remanes de las plantas resistentes a la hidrólisis por las enzimas de los humanos. En la hipótesis de la fibra dietética esta se sugirió como un factor para prevenir

ciertas enfermedades. Los datos médicos que apoyan el beneficio que proporciona la fibra dietética a la salud han ido en aumento, especialmente en relación con el papel que juega ésta en la reducción del riesgo de ciertas enfermedades, entre ellas la enfermedad cardiaca coronaria (Gualberto et al., 1997; Rosell et al., 2006).

Los polisacáridos no amiláceos y el almidón resistente (RS) son los principales carbohidratos funcionales en granos enteros de cereales, así como también en los productos alimenticios a base de cereales, relacionados con la salud del colon mediado a través de la modulación de la comunidad bacteriana (micobiota), producción de productos de fermentación como los ácidos grasos de cadena corta (AGCC) y propiedades fisicoquímicas (Sajilata, 2006).

Debido a la fuente botánica y condiciones de crecimiento, la fibra dietética de los cereales puede variar significativamente en composición química y características físicas (Zhang y Hamaker, 2010).

Tungland y Meyer (2002) sugirieron varios sistemas diferentes de clasificación para los componentes de la fibra dietética basados en su papel en la planta, en el tipo de polisacárido, en su solubilidad gastrointestinal, en el sitio de digestión, así como en los productos de digestión y una clasificación fisiológica. Sin embargo, ninguna clasificación es enteramente satisfactoria, ya que los límites no pueden ser enteramente definidos. Las clasificaciones más ampliamente aceptadas para la fibra dietética son la que diferencia a sus componentes por su solubilidad en agua y la basada en su fermentabilidad. La clasificación de los componentes de la fibra

dietética en base a su solubilidad en agua y fermentabilidad se presenta en la Tabla 1.

La fibra insoluble se compone, fundamentalmente, de fragmentos de las paredes celulares que contienen celulosa, lignina y hemicelulosa. La fibra soluble por su lado contiene, mayoritariamente, polisacáridos no-celulósicos tales como pectina, gomas y mucílagos, pentosanas, B-glucanos y hemicelulosa soluble (Dreher, 1999; Meister, 1996).

El grado de solubilidad en agua de las distintas fibras es muy variable. Las fibras solubles al contacto con el agua forman un retículo que la atrapa y origina soluciones de gran viscosidad. Los efectos derivados de la viscosidad de la fibra son los responsables sobre el metabolismo lipídico, hidrocarbonado y en parte a su potencial anticarcinogénico. Las fibras insolubles o poco solubles son capaces de retener el agua en su matriz estructural formando mezclas de baja viscosidad; esto produce un aumento de la masa fecal que acelera el tránsito intestinal (Escudero y González 2006).

Fibra Dietética y Digestibilidad del Almidón

La concentración de glucosa en sangre va a depender de factores concernientes al alimento como lo es la fibra dietética, tanto la fibra soluble como la insoluble contribuyen a una menor respuesta glucémica después de una ingesta de hidratos de carbono. La fibra soluble retarda el vaciamiento gástrico lo que puede contribuir a reducir la glucemia postprandial y la insulinemia influyendo en la saciedad, puesto

Tabla 1. Clasificación de los componentes de la fibra dietética basada en su solubilidad/fermentabilidad.

Característica	Componente de la fibra	Descripción	Principales fuentes de alimentos
Insoluble en agua/ poco fermentable	Celulosa	Componente estructural principal de la pared celular de plantas. Insoluble en álcali concentrado, soluble en ácido concentrado.	Plantas (vegetales, remolacha, varios salvados).
	Hemicelulosa	Polisacáridos de la pared celular, el cual contiene una cadena de uniones glucosídicas β -1,4. Soluble en álcali diluido.	Granos de cereales.
	Lignina	Componente de la pared celular, no carbohidrato. Polímero complejo. Resistente a la degradación bacterial.	Plantas leñosas.
Soluble en agua/ muy fermentable	Pectina	Componentes de la pared celular con ácido D-galactúronico como principal componente. Generalmente soluble en agua y forma un gel.	Frutas, vegetales, leguminosas, remolacha, papas.
	Gomas	Secretadas en los sitios de daños en las plantas por células secretoras especializadas. Uso alimenticio y farmacéutico.	Semillas de leguminosas (guar, algarroba), extractos de algas marinas (carragenina, gelan)
	Mucílagos	Sintetizados por las plantas, evitan la desecación de la semilla del endospermo. Uso en la industria alimenticia. Hidrofilíco.	Extractos de plantas (goma acacia, goma karaya, goma tragacanto).

Fuente: Dhingra et al., 2011.

que reducen la velocidad de absorción de la glucosa al dificultar el acceso de los nutrientes al epitelio del intestino delgado. Como es difícil lograr con alimentos naturales un adecuado aporte de fibra, es común el uso de alimentos enriquecidos con fibra dietética que aseguren un consumo alto. Las fibras más frecuentemente utilizadas son la goma guar, fibra de cítricos, leguminosas, salvado de trigo, entre algunos granos (Chung et al., 2007; Chung et al., 2008; Osorio-Díaz et al., 2008; Larrea et al., 2010).

Diversos estudios han demostrado que el consumo de fibra dietética disminuye la glucemia postprandial, Jenkins et al., (1997) estudiaron diferentes fibras utilizando una prueba de tolerancia y encontraron que las fibras solubles indujeron una disminución acentuada de la glucemia, constituyendo además un adecuado tratamiento dietético de la obesidad/diabetes.

Composición Química de la Fibra Dietética

Celulosa

Es un polímero lineal de unidades de D-glucosa unidas por enlaces β (1-4). La celulosa presenta una estructura plana fibrilar debido a que los seis átomos de carbono de la glucosa se encuentran en posición *trans* (Anderson y Clydesdale, 1980).

Hemicelulosa

La hemicelulosa está constituida por pentosas y hexosas distribuidas de forma ramificada y lineal conformando polímeros tipo polisacáridos denominados no-

celulósicos. La molécula de hemicelulosa se forma de una cadena de unidades de D-glucosa con enlaces tipo β -(1,4), con ramificaciones terminales de unidades de xilosa con enlaces tipo α -(1,6) (Baker et al., 1979).

Los xilanos son los polímeros con la mayor distribución y presencia como componente hemicelulósico de la pared celular (Baker et al., 1979; Lineback, 1999; Zhang y Hamaker, 2010). Los arabinoxilanos consisten de xilasas en uniones β -(1,4) con ramificaciones de α -L-arabinosa unidas en posición O-2 ó O-3, y los residuos de arabinosa también pueden estar unidos a otros grupos como ácido glucurónico, entrecruzados con ácido ferúlico y grupos acetilo (Zhang y Hamaker, 2010). Los arabinoxilanos solubles en agua (pentosanos) tienen una importancia funcional por su capacidad de "ligar" agua y la habilidad de incrementar la viscosidad (Lineback, 1999).

Lignina

No es un polisacárido, sino polímeros que resultan de la unión de varios alcoholes fenilpropílicos; contribuyen a dar rigidez a la pared celular haciéndola resistente a impactos y flexiones. La lignina no se digiere ni se absorbe, ni tampoco es atacada por la microflora bacteriana del colon. Una de sus propiedades más interesantes es su capacidad de unirse a los ácidos biliares y al colesterol retrasando o disminuyendo su absorción en el intestino delgado (Dhingra et al., 2011).

Pectinas

La pectina tiene un uso industrial ampliamente conocido por su capacidad de ligar agua. Su estructura básica es un polímero de unidades de ácido D-galacturónico

unidas por enlaces α -(1,4), donde algunos de los carboxilos pueden estar esterificados con grupos metilos o en forma de sal. Dentro de este grupo de carbohidratos se pueden distinguir varias clases: los ácidos pectínicos son polisacáridos que tienen esterificados parte del ácido D-galacturónico como estermetílico, mientras que aquellos que no están esterificados se les conoce como ácidos pécticos (Badui, 1993).

β -Glucanos

Los β -glucanos son una mezcla indigerible de polímeros de glucosa con enlaces β eta (1,3 y 1,4) menos conocidos que los polímeros de glucosa como el almidón y la celulosa (De Vries, 1996; Klopfenstein, 1988). Tienen la capacidad de enlazar el colesterol, facilitando su eliminación del cuerpo. Debido a que los β -glucanos reducen el contenido de lipoproteínas de baja densidad (LDL) e incrementan los niveles de lipoproteínas de alta densidad (HDL) son útiles en la prevención de enfermedades cardiovasculares y en la regulación del metabolismo de azúcares en el organismo (Falcón et al., 2007, Queenan et al., 2007).

Efectos Fisiológicos de la Fibra Dietética

Los efectos fisiológicos de la fibra dietética están presentes a lo largo de todo el tracto digestivo incluida la cavidad bucal. La fibra tiene un papel importante en las funciones del sistema digestivo desde la masticación hasta la evacuación de las heces (Escudero y González, 2006). Estos efectos fisiológicos de la fermentación de la fibra dietética están determinados por los siguientes hechos (Mataix, 2010):

- a) Productos formados en la fermentación colónica.

- b) Fenómenos de absorción.
- c) Patrones de motilidad.
- d) Cantidad y tipo de heces formadas.

La fibra dietética llega al intestino grueso de forma inalterada y aquí las bacterias del colon, con sus numerosas enzimas de gran actividad metabólica, pueden digerirla en mayor o menor medida dependiendo de su estructura. Este proceso de digestión se produce en condiciones anaerobias, cuyo proceso es llamado fermentación. En el colon se dan fundamentalmente dos tipos de fermentación: fermentación sacarolítica y fermentación proteolítica. Como resultado del proceso de fermentación se producen los siguientes productos: agua, gases (hidrógeno, anhídrido carbónico y metano), ácidos grasos de cadena corta (AGCC), los cuales son ácidos grasos volátiles destacando el acético, el propiónico y el butírico, que constituyen el 90-95% del total, mientras que el 5% restante son ácidos grasos de cadena ramificada (isobutírico, isovalérico, 2-metil-butírico) (Escudero y González, 200; Zhang y Hamaker, 2010).

Las fibras solubles (pectinas, algunas hemicelulosas, gomas, mucilagos y β -glucanos) forman soluciones viscosas (geles). La viscosidad está determinada por el peso molecular y la estructura química del polímero. En general, la fibra soluble forma soluciones viscosas de gran volumen en el estómago e intestino delgado como consecuencia de su viscosidad, hacen lento el vaciamiento gástrico y aumentan su distensión prolongando la sensación de saciedad en el estómago. Asimismo, se produce una disminución en la absorción de los ácidos biliares ya que estos se unen

a los residuos fenólicos y urónicos en la matriz de los polisacáridos (Collins et al., 2010; Dhingra et al., 2011).

Los componentes de la fracción insoluble, principalmente celulosa y algunas hemicelulosas, se caracterizan por la escasa capacidad para retener agua y formar soluciones viscosas en el estómago e intestino delgado. No obstante mantienen una cierta capacidad para retener agua bien en forma libre en las estructuras intersticiales de la matriz de las fibras, o retenida por enlaces de hidrógeno o iónicos. Las características de la fibra insoluble (baja fermentabilidad por la microbiota y su capacidad para retener agua en el colon distal) favorecen el aumento del tamaño del bolo fecal, lo que incrementa el peristaltismo y disminuye el tiempo de tránsito, manifestándose con un efecto laxante (Mataix, 2010).

Efecto de la Fibra Dietética en Enfermedades

Estreñimiento

El consumo de fibra mejora el estreñimiento leve y moderado, debido al incremento de la masa fecal. Los compuestos indigestibles de los alimentos tienen capacidad para adsorber y retener agua. Durante el proceso de fermentación en el colón, se incrementa la masa bacteriana y se producen gases. Ambos efectos aumentan el volumen del contenido intestinal y estimulan el peristaltismo. La mayor velocidad de tránsito produce una reducción de la absorción de agua en el colon, por lo que las heces contienen mayor cantidad de agua, son más voluminosas y de consistencia más blanda (Slavin, 2010).

Diarrea

La diarrea se caracteriza por la expulsión de heces abundantes, de poca consistencia, que suele ir acompañada de un menor número de deposiciones. Recientemente, diversos investigadores proponen que la incorporación de fibra soluble a las soluciones clínicas usuales podría ser útil para el tratamiento de diarrea aguda, basado en diferentes hipótesis (Mataix, 2010):

- Estimula el crecimiento de una microbiota que contribuye a mantener la composición y el balance normal de las distintas especies que la componen, dificultando así la proliferación de especies patógenas.
- La fermentación produce butirato que es la fuente de energía del colonocito y además la absorción de este ácido graso de cadena corta lleva asociado de forma indirecta la entrada de sodio, lo que potenciaría su absorción y por tanto la de agua.

Diverticulosis

Usualmente se encuentran en el colon sigmoideo, y se forman en un área débil en la pared del colon debido a los vasos sanguíneos del tejido. Frecuentemente múltiples divertículos se encuentran dispersos en la pared del colon u ocurren en agrupaciones que pueden atrapar bacterias o partículas de heces, el resultado es una infección que se llama diverticulosis. Los síntomas pueden incluir dolor abdominal junto con temperatura en bajo grado y cambios en el patrón de los movimientos del intestino u obstrucción parcial del colon (Aldoori et al., 1998).

La fibra ayudaría a disminuir la presión intraluminal del colon, evitando la formación sacular a través de la pared intestinal (Zhang y Hamaker, 2010).

Cáncer Colorrectal

Inicialmente se consideró que los efectos sobre el bolo fecal y la velocidad de tránsito intestinal que provocaba la fibra, podían ser la causa de su beneficio. Pero actualmente, existen cada vez más pruebas de que los ácidos grasos de cadena corta (AGCC) y en especial el butirato, son los que pueden tener una función protectora por sus efectos sobre la proliferación celular, la apoptosis y la expresión genética (Escudero y González, 2006), además existen resultados que indican que el almidón resistente puede reducir la tumorigenesis y el daño a colonocitos incrementando la concentración de AGCC, particularmente butirato (Le Leu et al., 2009).

Enfermedad Cardiovascular

El efecto de la fibra soluble sobre la reducción de los lípidos es probablemente el mejor conocido. El consumo regular de 20-30 g/día de fibra total, reduciría el riesgo de enfermedad cardiovascular entre un 12 y un 20% (Escudero y González, 2006).

Diabetes

Múltiples estudios han demostrado que el consumo de fibra dietética reduce los niveles de glucemia en pacientes con diabetes tanto tipo 1 como tipo 2 (Escudero y González, 2006; Dhingra et al., 2011).

Al parecer la fracción soluble es la más eficaz en el control de la glucemia. Los mecanismos que se proponen son: retraso en el vaciamiento gástrico; disminución

en la absorción de glucosa al quedar atrapada por la viscosidad de la fibra y ser entonces menos accesible a la acción de la amilasa pancreática, producción de ácidos grasos de cadena corta (AGCC): el propionato influiría en la neoglucogénesis reduciendo la producción hepática de glucosa (Mataix, 2010). La presencia de fibra dietética soluble, incluso a bajos niveles, limita la amilólisis de modo que incrementa el contenido de almidón resistente (Collins et al., 2010).

Consumo de Fibra Dietética

Actualmente la fibra dietética forma parte de una dieta saludable. En la actualidad los consumidores están interesados en la calidad, en el valor nutritivo y en la seguridad de los productos que consumen (Rosell et al., 2006).

A medida que ha aumentado el conocimiento de las funciones de la fibra su consumo se ha incrementado. Sin embargo, los cambios en el estilo de vida, horarios de trabajo, horas extras, costumbres alimenticias y la urbanización, conllevan a una mala alimentación. Aun cuando las personas consideren una dieta saludable y balanceada, raramente se consume la cantidad de fibra recomendada (Rayas y Romero, 2008).

Para los adultos se recomienda un consumo entre 20-35 g/día de fibra o aproximadamente 10 a 14 g de fibra dietética por cada 1.000 Kcal, siendo aconsejable una relación fibra insoluble/fibra soluble de 3/1. En los niños mayores de dos años y hasta los dieciocho, se recomienda el consumo de 5 g/día a su edad (es decir, para un niño de cuatro años de edad debería ingerir aproximadamente 9 g de fibra al día) (Escudero y González, 2006).

En un reciente reporte de la industria alimentaria se menciona alimentos "altos en fibra" como uno de los diez tendencias principales de alimentos funcionales en el mercado de Estados Unidos. Con el incremento en la conciencia acerca de los beneficios de la fibra dietética, la demanda para los alimentos funcionales altos en fibra se espera que continúe incrementando proyectando un crecimiento en esta industria para el año 2011 de alrededor de 495 millones de dólares, lo cual representa un aumento de más del doble sobre lo que se predijo para un periodo de 7 años (Sloan, 2006). Por lo tanto, es importante explorar nuevas formas de incorporar la fibra a productos alimenticios.

A pesar de los efectos benéficos, la incorporación de fibra a los alimentos, especialmente a productos horneados tales como pan, tortillas y galletas, ha sido limitada porque estos presentan pobres propiedades funcionales, efectos deteriorativos a la calidad total y poca aceptación del consumidor hacia estos productos. Problemas como poca extensibilidad, reducción del volumen, alteraciones en la estructura de la miga, la oscuridad de la corteza y en ocasiones un efecto sobre el sabor del mismo son comunes en productos horneados altos en fibra, ya que la fibra rompe la matriz continua viscoelástica de la masa (Wang et al., 2002; Seguchi et al., 2007). La creciente demanda de alimentos más saludables ha motivado a los tecnólogos de alimentos para diseñar productos enriquecidos en fibra (Rosell et al., 2006).

Tratamientos Utilizados para Mejorar la Funcionalidad de las Fibras

Tratamientos con Peróxido de Hidrógeno en Medio Alcalino

La des-lignificación parcial de las uniones entre la lignina y la celulosa por medio de tratamientos alcalinos con peróxido de hidrógeno da lugar a productos de celulosa con una alta capacidad de retención de agua y, por lo tanto, de hinchamiento o aumento de volumen, lo que es adecuado para su aplicación a productos de panadería (Dreher, 1999). Esto se debe a la capacidad especial del medio acuoso alcalino con peróxido de hidrógeno de disolver la lignina, de disminuir la proporción de celulosa cristalina total y de conservar intactos otros componentes de la fibra como la hemicelulosa (Córdova, 2005).

Modificaciones Enzimáticas

Los tratamientos enzimáticos conducen a incrementos en el contenido de la fibra soluble. Las fuentes de fibra modificadas enzimáticamente muestran menor capacidad de retención de agua, lo cual puede ser ventajoso con fines tecnológicos. Además, este tipo de fibra tiene una textura más suave, lo cual facilita su uso en la formulación de productos (Córdova, 2005).

Modificaciones por Medio de Extrusión

El salvado de trigo suele someterse a un proceso de extrusión a alta temperatura, en el que se aplica un esfuerzo de cizalla alto en un extrusor de contra-rotación con doble tornillo, modificando la estructura del salvado para obtener una mejor molienda posterior. Adicionalmente, este tipo de extrusor permite que el almidón presente de forma natural en el salvado, pueda cubrir el material ligno-celulósico. Después de la

molienda, el salvado modificado tiene una apreciación sensorial aceptable, con ausencia de arenosidad, una mayor capacidad de retención de agua y propiedades de textura que son compatibles con una amplia variedad de productos (Dreher, 1999). El incremento de la velocidad del tornillo del extrusor aumenta el contenido en fibra soluble y en almidón susceptible de la acción enzimática en el caso de trigo entero y en salvado de trigo. Además, las moléculas ramificadas son más susceptibles al esfuerzo de cizalla durante la extrusión que la celulosa (Córdova, 2005).

Proceso de Extrusión y su Impacto en la Calidad del Alimento

La cocción por extrusión (alta temperatura/corto tiempo) es una técnica que se introdujo en 1930 en las industrias de cereales. Hoy en día este proceso se utiliza ampliamente, debido a la naturaleza de esta técnica, con la participación de alta temperatura, presión y fuerzas de cizallamiento, la matriz del alimento se somete a cambios químicos (gelatinización de las moléculas de almidón, entrecruzamiento de proteínas) y la producción de sabor que puede ser inducidos por la reacción de Maillard (Richardson, 2001).

Muchos alimentos populares a base de cereales (bocadillos, cereales listos para comer y pastas) son producidas por el proceso de extrusión. Los extrudidos tienen características físicas y químicas diferentes a las del alimento original. Estas diferencias dependen de los parámetros de extrusión (aporte de energía, tiempo de residencia, tipo de extrusor usado) y de las propiedades físicas y químicas de la materia prima (humedad, grasa y contenido de fibra) (Rebello y Schaich, 1999). El

proceso de extrusión puede resultar en la fragmentación de proteínas, almidones, polisacáridos y polisacáridos no almidonosos, creando moléculas reactivas las cuales tal vez pueden formar nuevas uniones que podrían resultar en un potencial aumento para la salud (Kahlon et al., 2006).

La extrusión mejora la calidad nutricional de los alimentos, mejora la digestibilidad de algunos nutrientes, la solubilización de la fibra e inactiva algunos factores antinutricionales (Vernaza et al., 2009).

Diversos estudios con alimentos extrudidos que contienen salvado de trigo demuestran que estos bajan los niveles de colesterol en sangre (Meshcheriakova y col., 1995). Kahlon et al., (1998) extruyeron salvado de trigo a baja energía mecánica específica, el cual redujo significativa los niveles de colesterol en hamsters comparado con salvado de trigo no extrudido. El salvado de trigo en general no baja los niveles de colesterol, en muchos estudios el salvado de trigo se usa como un control para evaluar la disminución del colesterol con otros cereales (Kahlon et al., 2006). Las anteriores investigaciones demuestran que la extrusión bajo condiciones apropiadas podría mejorar el potencial hipocolesterolémico de los ingredientes alimenticios.

La naturaleza termomecánica del proceso de extrusión tiene el potencial de causar una redistribución de los componentes de la fibra soluble e insoluble a favor de la primera. Esto tendería a mejorarlas propiedades hipocolesterolémicas de la fibra. Varias investigaciones muestran un incremento significativo en el contenido de fibra dietética soluble en salvado de trigo extrudido (Wang et al., 1993; Gualberto et al.,

1997). Aparte de la mejora en la funcionalidad y perfil de la fibra dietética debido al tratamiento térmico/mecánico de los ingredientes fibrosos, las características sensoriales del producto final pudieran verse afectadas positivamente (Gajula et al., 2008).

Aspectos de Ingeniería de un Extrusor de Alimentos

Existen varias descripciones de extrusores, desde el punto de vista de ingeniería, una extrusor es una bomba. Existen extrusores de un solo tornillo y extrusores de doble tornillo, éstos últimos pueden ser mejores en comparación con un arrastre de la bomba. Los siguientes aspectos hacen a los extrusores particularmente interesantes para el procesamiento de productos alimenticios:

a) El extrusor es un intercambiador de calor

b) Los perfiles de presión y temperatura de transformación de la materia al pasar por el extrusor pueden (dentro de ciertos límites) ser elegidos por la variación del diseño del tornillo y las condiciones de funcionamiento.

c) El grado de mezcla y corte impuesto en el material son parámetros que pueden ser influenciados por la combinación apropiada del diseño del tornillo, de matrices y los parámetros de funcionamiento.

d) Debido a la acumulación de presión en el extrusor, la formación del producto final es relativamente fácil (Mercier et al., 1989).

Entre algunos atributos por los cuales la extrusión es muy utilizada, se encuentran los siguientes: a) su versatilidad, al combinar los ingredientes y las condiciones de

operación del extrusor es posible procesar una amplia variedad de productos, b) costos reducidos, debido a los requerimientos de espacio por unidad de producción, c) Elevada productividad, al presentarse como un sistema de procesamiento continuo su capacidad de producción incrementa, d) productos de alta calidad microbiológica y nutricional, al emplear temperaturas altas en periodos cortos de tiempo (HTST por sus siglas en inglés), se minimiza el peligro microbiológico, así como también la degradación de algunos nutrientes y se mejora la digestibilidad (por la pregelatinización del almidón y desnaturalización de las proteínas), e) se pueden obtener diferentes formas y figuras del producto al utilizar distintos dados, f) Ausencia de material de desecho, al no generar productos contaminantes se reducen los costos de operación para el tratamiento de efluentes contaminantes (Galicia, 2005).

Componentes Básicos del Extrusor de un Solo Tornillo

Mecanismo de Alimentación

Este consta de una tolva y un tornillo (aspas) de alimentación donde se deposita la materia prima. El objetivo de esta parte del extrusor es dosificar el material que entra a procesamiento manteniendo un flujo constante para obtener un producto homogéneo (Serna-Saldívar, 1996).

Tornillo

En este componente se distinguen como características principales: diámetro del tornillo, profundidad entre la base del tornillo y el interior del cañón. Los factores relacionados con el diseño de la rosca en el tornillo que dictaminan la cantidad de esfuerzo mecánico generado son: a) la distancia ente alabes de la

rosca; entre más profundos menos esfuerzo mecánico, c) distancia entre el álabe y la pared interna del cañón; una distancia menor restringe el flujo negativo, por lo tanto incrementaría la presión dentro del cañón; d) presencia de pernos y canales perpendiculares a los álabes que incrementan el tiempo de retención y fricción (Serna-Saldívar, 1996, Mercier et al., 1989).

Cañón o barril del extrusor

Cilindro donde se realiza el mezclado, corte, compresión e incremento de temperatura del producto que se está procesando. El material impulsado por el rotor (tornillo) tiende a deslizarse a través del cañón, para regular este deslizamiento se le agregan obstrucciones al cañón, que pueden ser ranuras con bordes filosos y pernos (Serna-Saldívar, 1996).

A lo largo del cilindro Harper (1981) distingue tres secciones: la sección de alimentación, la sección de compresión y la sección de alta presión que a continuación se describen:

Sección de alimentación

Está caracterizada por pasos de la hélice o álabes profundos, los cuales fácilmente aceptan los ingredientes crudos y los transportan hacia la salida del extrusor. Durante el transporte, los materiales son transformados en una masa continua, el aire es expedito y los espacios vacíos son eliminados, haciendo que los álabes se llenen completamente (Harper, 1981).

Sección de compresión

Los ingredientes húmedos son convertidos en una masa termoplástica por la gelatinización del almidón y la hidratación de la proteína. La zona de compresión es usualmente caracterizada por una disminución en la altura de los álabes, los cuales reducen el área de sección transversal del tornillo para el flujo. Esto incrementa la relación de esfuerzo cortante y la energía mecánica suministrada al alimento, lo cual resulta en un aumento en la temperatura (Harper, 1981).

Sección de alta presión

También llamado de cocimiento, que es donde el flujo, la presión, compresión y velocidad de corte son altos. Esta zona se caracteriza por tener una altura mucho menor que los álabes que en la zona de compresión. La masa termoplástica se transforma en una masa plástica, prácticamente un líquido. Como resultado de la conversión de la energía térmica, la acción de corte en esta zona homogeniza y adiciona más calor a la mezcla. Esta zona es la más importante del extrusor. Su función es recibir el material comprimido, homogenizarlo y hacerlo pasar a través del dado o boquilla a presión constante. Al final se encuentra la boquilla o dado, que tiene como función principal dar la forma y el tamaño deseado al producto extrudido (Harper, 1981).

Dado o boquilla

Componente que moldea el producto final, y de forma indirecta restringe el paso del flujo; lo que genera un incremento en la presión en la zona de cocción, puede tener

formas variadas (circulares, cuadradas, rectangulares, entre otras) dependiendo de la forma requerida (Serna-Saldívar, 1996).

Funcionamiento Básico del Extrusor de un Solo Tornillo

Todo proceso de extrusión incluye una premezcla de los ingredientes, los cuales son alimentados por medio de un sistema horizontal o vertical, generalmente integrado a un sistema de premezcla o preacondicionador. El material alimentado, una vez dentro de la boca del extrusor, fluye a través del tornillo que gira dentro del cañón. El cañón está generalmente provisto de varias secciones capaces de ser calentadas o enfriadas con vapor, bandas eléctricas, agua, aire y/o refrigerantes. La pared interna del cañón puede ser lisa, rayada en forma de espiral. La parte fundamental del extrusor es el tornillo (s), el cual tiene la función de hacer fluir el material de alimentación y sobretodo de propiciar los cambios deseados mediante el esfuerzo mecánico y fricción (Ananthan et al., 1996). El sistema de dado o matriz tiene como función primordial formar el material plástico o cocido que corre a través del extrusor. Finalmente, el material formado que fluye del extrusor, es cortado por medio de un sistema de navajas simples o múltiples, las cuales giran a ciertas revoluciones a varios milímetros de la salida del dado (Mercier et al., 1989).

Efecto del Proceso de Extrusión en el Contenido de Fibra Dietética

El proceso de extrusión es la única forma entre otros procesos con calor, en que el material es sujeto a un intenso esfuerzo de cizalla, este esfuerzo en el extrusor es capaz de romper enlaces covalentes en biopolímeros (Asp et al., 1989).

Aunque la elevada presión, alta temperatura y el intenso esfuerzo mecánico aplicado durante el proceso obviamente alteran las propiedades físicas y químicas de los productos extrudidos, los cambios aún no han sido bien definidos (Wang et al., 1993). Existen varios estudios en los cuales se ha evaluado el efecto del proceso de extrusión, a continuación se presenta algunos:

Gualberto et al., (1997) estudiaron el efecto del proceso de extrusión en el contenido de fibra dietética soluble e insoluble en salvado de trigo, arroz y de avena. Para esto utilizaron diferentes velocidades de rotación del tornillo: 225, 305 y 450 rpm. Encontraron que el contenido de fibra dietética Insoluble (FDI) disminuye durante el proceso de extrusión para el salvado de avena y de arroz, mientras que para el salvado de trigo no se obtuvieron diferencias significativas en el contenido de FDI entre el salvado extrudido y el que no fue extrudido. El contenido de fibra dietética soluble (FDS) incrementó en los tres tipos de salvado al ser extrudidos especialmente bajo las condiciones más críticas del proceso. En general, atribuyen el incremento de FDS a una redistribución de la FDI debido al incremento de la solubilidad.

Kahlon et al., (2006) realizaron un estudio para observar el efecto del proceso de extrusión sobre el contenido de fibra dietética de salvado de trigo y relacionarlo con las propiedades hipocolesterolemicas en hamsters. Utilizando cinco niveles de energía mecánica específica (SME) siendo estos de 0.120, 0.177, 0.234, 0.291, 0.358 kWh/kg con un incremento de la temperatura a lo largo de las secciones del extrusor (80 a 130°C). Los resultados muestran que a todos los niveles de SME utilizados se incrementó el contenido de fibra dietética total e insoluble (FDT 4.0 % y

FDI 3.04%) comparado con el salvado de trigo no extrudido, mientras que la FDS también incrementa pero muestra un mayor aumento (1.06%) conforme aumenta el nivel de energía mecánica. Además, encontraron que el contenido de colesterol en plasma en los hamsters fue menor en todos los tratamientos que se sometieron a extrusión.

Índice Glucémico

El índice glucémico (IG) es un concepto desarrollado para caracterizar el potencial incremento de la glucosa en sangre que ocasionan los carbohidratos en los alimentos (Chibbar et al., 2010). El IG es un valor que describe el incremento de la glucosa en sangre seguida por la ingesta de un alimento que contenga carbohidratos comparado con la hiperglucemia inducida por el consumo de una carga equivalente de un alimentos estándar, además permite clasificar a los alimentos en base a la velocidad de liberación y absorción de carbohidratos (Magaletta et al., 2010; Rizkalla et al., 2002). El concepto fue desarrollado en la Universidad de Toronto con el fin de determinar cuáles alimentos son apropiados para el consumo de personas con diabetes (Jenkins et al., 1981).

El índice glucémico fue definido como el incremento bajo el área de la curva de respuesta de la glucosa en sangre provocada para 50 g de carbohidratos disponibles de una porción de alimento de referencia tomada de la misma persona. Generalmente alimentos con bajo índice glucémico se define como el que contiene un valor de IG <55, alimentos con índice glucémico medio son lo que tienen un valor

de IG entre 56-69 y alimentos con alto índice glucémico son los que tienen un IG ≥ 70 (Magaletta et al., 2010).

El incremento en la incidencia de enfermedades como obesidad y los desórdenes metabólicos asociados tales como la diabetes tipo 2, enfermedades cardiovasculares y diversos tipos de cáncer en tracto gastrointestinal, han causado un incremento en el interés en la intervención para prevenir y en algunos casos tratar dichos desórdenes metabólicos. Varios estudios han indicado que dietas con bajo IG pueden reducir el riesgo de enfermedades cardiovasculares, diabetes y algunos tipos de cáncer (Wong y Jenkins, 2007).

La mayoría de los efectos benéficos de las dietas con bajo IG han sido asociados el tipo de carbohidrato y la velocidad de digestión y absorción en el tracto gastrointestinal. La fermentación de los carbohidratos no digeribles por la microbiota en el colon produce AGCC, gases (CO_2 , CH_4 , H_2) y calor (Topping y Clifton, 2001; Chibbar et al., 2010; Wong y Jenkins, 2007).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización para la Alimentación y la Agricultura de las Naciones Unidas (FAO) recomiendan dietas basadas en alimentos con IG bajo para reducir el riesgo de enfermedades del corazón, diabetes y obesidad (FAO/WHO 1998; WHO, 2003).

El procedimiento in vivo recomendado por FAO/OMS requiere múltiples sujetos de prueba (al menos siete) en tres días separados. Las muestras de sangre son dibujadas en diversos momentos de cada prueba y se construyen curvas de glucosa

en sangre para la muestra y se analizan contra las curvas de glucosa en sangre de un alimento de referencia (FAO/WHO, 1998).

Debido al trabajo y el tiempo que involucra un examen IG en vivo, a que el costo de cada prueba es alto, típicamente algunos miles de dólares por muestra, así como también que los sujetos humanos necesitan ser reclutados y examinados, el protocolo de la prueba toma algunos días para poder completarse; el tiempo esperado para obtener resultados retrasa el ciclo de desarrollo de nuevos productos. Por todo esto se han desarrollado nuevos métodos *in vitro* para estimar el valor de IG en los alimentos (Magaletta et al., 2010).

Varios procedimientos *in vitro* han sido propuestos para evaluar la velocidad de hidrólisis del almidón considerada como un predictor de los efectos fisiológicos de un alimento en particular. Sin embargo, existen diferencias marcadas, la preparación de las muestras es diferente en cada método en particular. Los puntos en el tiempo para establecer una buena relación con los datos *in vivo* son también diferentes de un método a otro (Goñi et al., 1997).

Índice Glucémico de los Carbohidratos

Cuando un alimento o comida contiene carbohidratos se digiere la glucosa, se absorbe, elevándose su concentración en sangre, y alcanzando un máximo entre 20 y 30 minutos de su ingestión. Tras este "pico" van disminuyendo los niveles sanguíneos, para llegar después de 90 a 120 minutos, a su nivel de ayuno, lo que es debido a la captación y utilización de la glucosa, mediado en gran parte por la insulina. Los distintos alimentos hidrocarbonados y los diversos azúcares,

individualmente considerados, dan lugar a curvas y áreas que son diferentes, las cuales se pueden comparar entre sí. Esta es la base del índice glucémico (IG) de un alimento conteniendo carbohidratos, el cual viene dado por la fórmula:

$$\text{IG} = \frac{\text{Área glucémica del alimento de prueba}}{\text{Área glucémica del alimento de referencia}}$$

El alimento de referencia ha sido habitualmente la propia glucosa, administrada en una cantidad de 50g, dando una curva que se tomaba arbitrariamente como IG 100. Frente a ella se comparaba el área de un alimento de prueba conteniendo una cantidad equimolar de carbohidrato disponible. El índice glucémico puede verse afectado y a veces profundamente, por diversos aspectos ligados al alimento, además de la variabilidad de la respuesta individual. Así destacaríamos los siguientes (Mataix, 2010):

- a) Constitución química de los carbohidratos. Esto se ve claramente en el caso de azúcares, en donde se comprueba que el mayor o menor índice glucémico va a depender de la cantidad de glucosa en su molécula.
- b) Presencia de otros alimentos. El IG se obtiene ingiriendo un solo alimento, pero si este se encuentra dentro de una comida mixta como única fuente de carbohidrato, el IG es distinto y generalmente, menor.
- c) Otros constituyentes del alimento. Destaca, la fibra, siendo el efecto distinto si es soluble (lo disminuye), que si no lo es.

- d) Grado de masticación y procesamiento gástrico, que entre otras cosas influye en la velocidad de vaciamiento gástrico.
- e) Constitución del alimento, que afecta la localización del hidrato de carbono en el mismo y por tanto su digestión y posterior absorción.
- f) Tipo de hidrato de carbono, de tal modo que la amilopectina se digiere más rápidamente que la amilosa.
- g) Digestibilidad del almidón. El almidón de un alimento que no ha sufrido ningún tipo de cocinado tiene un menor IG que cuando ha sufrido cocción.
- h) Grado de maduración de las frutas.
- i) Tipo de cocinado, que permite por ejemplo una distinta accesibilidad del sistema enzimático al hidrato de carbono.
- j) También puede afectar al IG la presencia de mayor o menor cantidad de grasa.

La mayoría de estos factores son determinantes de una distinta funcionalidad digestiva, afectando bien a fenómenos motores como la clave del vaciamiento gástrico, bien a fenómenos de ataque digestivo y así mismo al propio proceso de absorción y respecto a éste, más que al grado de absorción de la glucosa resultante del proceso digestivo, a la velocidad de absorción de la glucosa, que es lo que afecta a los niveles postprandiales de la misma (Mataix, 2010).

Definición de Galleta

La galleta es el producto elaborado con harina de trigo, avena, centeno, harinas integrales, azúcar, grasa vegetal y/o aceites comestibles, agentes leudantes, sal yodada; adicionados o no de ingredientes y aditivos alimenticios autorizados por la Secretaría de Salud, los que se someten a un proceso de amasado, moldeado y horneado (SCFI, 1983).

Las galletas son los productos de panadería más populares, consumidas casi en todos los niveles de la sociedad. Esto se debe principalmente a que son productos que no requieren una preparación previa para consumirlos, presentan una buena calidad nutricional y se encuentran disponibles en diferentes variedades y precios accesibles (Sudha et al., 2005).

Características de la Harina para Galleta

Las harinas empleadas en la elaboración de galletas dulces se prefieren con una baja absorción de agua, bajo contenido de proteína y un gluten débil (Serna-Saldivar, 1996). Las galletas pueden ser elaboradas de cualquier tipo de harina de trigo (suave o fuerte) las cuales cambian las propiedades funcionales de la masa. La expansión, forma, color, sabor, textura y la vida de anaquel de los productos horneados son el resultado de factores como: el grado de dureza impartido por el tipo de harina, la consistencia de la masa, retención de humedad e ingredientes que propician endurecimiento (Minor, 1966).

Las reacciones fisicoquímicas y bioquímicas en las masas para galletas durante el horneado son muy complejas, incluyen desnaturalización de proteína, pérdida de la

estructura granular del almidón, derretido de la grasa, reacciones de Maillard, expansión de la masa por evaporación del agua, producción y expansión térmica de los gases. La expansión es un evento relevante en la formación de la textura, es un límite para las propiedades reológicas de la masa, el cual depende del comportamiento y las interacciones de sus componentes (Chevallier y col., 2002).

Tres cambios importantes se pueden definir durante el horneado: (i) un aumento en el grosor de la galleta con la producción de gases y la vaporización química del agua; (ii) una disminución del peso del producto debido a la sequedad; y (iii) el bronceado de la superficie de la galleta, se debe al oscurecimiento no enzimático (reacciones del Maillard) implicando la interacción de azúcares reductores con las proteínas, pero también posiblemente a la dextrinización del almidón y caramelización del azúcar (Chevallier y col., 2002).

Se ha desarrollado una variedad de galletas, en las cuales se busca incrementar el contenido de fibra dietética utilizando distintos ingredientes y se ha logrado obtener buenos resultados en calidad del producto final (Artz et al., 1990; Sudha et al., 2005; Larrea et al., 2010; Zucco et al., 2011).

El salvado de trigo y las galletas al ser ampliamente aceptados y consumidos en muchos países pueden ser el vehículo adecuado para mejorar la calidad nutricional de los alimentos. Algunos investigadores reportan que en la elaboración de las galletas es una buena forma de utilizar harinas compuestas, y con esto mejorar la calidad nutricional de las galletas (Zucco et al., 2011).

HIPÓTESIS

El tratamiento termo-mecánico que sufre el salvado de trigo mediante el proceso de extrusión mejorará las propiedades funcionales del mismo al agregarlo a la formulación para elaborar galletas, así como los parámetros de calidad de las galletas y se reducirá el valor de su índice glucémico.

OBJETIVOS

Objetivo General

Determinar el efecto de la incorporación de salvado de trigo extrudido a la formulación para elaborar galletas y su impacto en las características fisicoquímicas e índice glucémico in vitro.

Objetivos Particulares

- 1) Determinar el efecto de tres diferentes perfiles de temperatura y contenidos de humedad sobre el salvado de trigo durante el proceso de extrusión.
- 2) Dilucidar el efecto del salvado de trigo extrudido con dos diferentes tamaños de partícula sobre los parámetros físicos de las galletas.
- 3) Determinar el impacto del proceso de extrusión sobre el contenido de fibra dietética soluble, insoluble y total en las galletas.
- 4) Estimar el valor del índice glucémico de las galletas elaboradas con el salvado de trigo extrudido.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia Prima

Se utilizó harina de trigo y salvado de trigo donado por el Molino la Fama, S.A. de C.V. Manteca vegetal (marca INCA), azúcar (marca Zulka), bicarbonato de sodio (marca Arm & Hammer), sal (marca mar de Cortés) y dextrosa grado reactivo se obtuvieron del mercado local.

Acondicionamiento

Al salvado de trigo se le adicionó agua destilada y se homogenizó mezclándolo por 20 min en un equipo acondicionador marca Chopin (Modelo París, Francia) hasta obtener un contenido total de humedad de 15, 23 y 31%. El salvado de trigo se colocó en bolsas de polietileno y se refrigeró por 12 horas para asegurar el equilibrio de la humedad (reposo 1) y posteriormente a temperatura ambiente (antes de ser extrudidos).

Proceso de Extrusión

El proceso de extrusión se realizó en un extrusor de un solo tornillo (Marca Brabender Instruments, Modelo E 19/25 D, Inc. NJ USA). Bajo las siguientes condiciones: tres perfiles de temperatura 1) 60, 75, 85 y 100°C, 2) 60, 80, 100 y 120°C; 3) 60, 85, 110 y 140°C; así mismo se tuvieron tres valores de humedad 15, 23 y 31%, la velocidad del tornillo permaneció constante (100 rpm), con una velocidad de alimentación de 50 rpm. El diámetro del tornillo es de 20 mm, la longitud al

diámetro 25:1, una razón de compresión nominal 2:1 y una apertura del dado de 3 mm. Los parámetros del proceso de extrusión se seleccionaron en base a trabajos previos (Wang et al., 1993; Gajula et al., 2008; Ruíz-Bernal, 2008).

Lotes de 0.5 kg de salvado de trigo acondicionados se depositaron en la tolva de alimentación del extrusor. Se ajustó el número de tornillo (no. 2), las temperaturas de las cuatro zonas del extrusor, velocidad del tornillo y velocidad de alimentación con los parámetros anteriormente mencionados. Posteriormente al proceso de extrusión, los extrudidos se colectaron en charolas de aluminio perforadas y subsecuentemente el material se sometió a un proceso de secado en un horno de convección de aire a 60°C durante 3 horas. Finalmente, todos los extrudidos se sometieron a una molienda y tamizado teniendo dos fracciones por cada tratamiento de extrusión, una fracción gruesa (>0.28 mm) y otra fina (<0.28 mm) utilizando un molino marca Braun Modelo KSM 2. Cada una de las muestras extrudidas y molidas se almacenó en doble bolsa de plástico a una temperatura de 5°C hasta ser analizadas.

Mezclas de Harina

Se elaboró una mezcla de harina con salvado de trigo extrudido molido mediante la sustitución del 30% del porcentaje total de la harina de trigo por el salvado de trigo extrudido molido, resultando una mezcla con 70% harina de trigo suave y 30% de salvado de trigo extrudido, se obtuvieron dos mezcla distintas por cada extrudido (una para fracción gruesa y otra para la fina), una vez elaboradas las mezclas se procedió a homogenizarlas utilizando una mezcladora (Kitchen Aid Mod MK 4555

WH St Joseph Michigan USA), las mezclas de harinas se colocaron en bolsas de polietileno y se refrigeraron (4°C) hasta su utilización.

Así mismo se elaboraron tres galletas control, una con salvado de trigo no extrudido fracción gruesa, otra galleta control con salvado de trigo no extrudido fracción fina y la otra con el 100% harina de trigo blanca. Los valores de sustitución de la mezcla de harina fueron seleccionados en base a investigaciones previamente reportadas (Vratanina y Zabik, 1978; Jeltema et al., 1983; Gajula et al., 2008).

Análisis Químico

Se llevaron a cabo las siguientes determinaciones para la materia prima y las galletas: contenido de humedad (método 44-40), contenido de proteína (método microkjeldahl 46-13), contenido de ceniza (método 08-03), de acuerdo a metodología oficial AACC (2001), así como la determinación de fibra dietética soluble, insoluble y total (método 985.29) de acuerdo a la AOAC (1997).

Evaluación Físicoquímica de los Extrudidos

A los extrudidos de salvado de trigo obtenidos, una vez secos y fríos se les realizaron las siguientes determinaciones:

Índice de Absorción de Agua

Se realizó utilizando el método de Anderson et al., (1969), el valor es expresado como g de agua/g de muestra seca, con la siguiente ecuación:

$$IAA = \frac{(\text{peso del gel} - \text{peso de la muestra en base seca} - \text{peso del material solubilizado})}{\text{Peso de la muestra en base seca}}$$

Índice de Expansión

La expansión seccional fue determinada como la razón entre el diámetro del extrudido y el diámetro del dado, se utilizaron diez muestras de cada extrudido, las cuales fueron medidas con un micrómetro digital para obtener el diámetro y el porcentaje de expansión se obtuvo al aplicar la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de Expansión} = \text{diámetro del extrudido} / \text{diámetro del dado} \times 100$$

Densidad

La densidad de los extrudidos fue calculada con el peso del extrudido, asumiendo una forma cilíndrica (Alvarez-Martínez et al., 1988).

$$\text{Densidad} = 4 m / \pi D^2 L$$

Donde m es el peso del extrudido de longitud L y diámetro D. Diez piezas fueron tomadas al azar y se determinó la media.

Elaboración y Evaluación Física de las Galletas

Las galletas elaboradas con el salvado de trigo extrudido fracción gruesa y fracción fina, así como las galletas control fueron realizadas y evaluadas de acuerdo al método 10-50D (AACC, 2001). Brevemente, se mezclaron los ingredientes secos (grasa, azúcar, sal y bicarbonato de sodio) durante tres minutos en una mezcladora

Kitchen Aid Mod MK 4555 WH (St Joseph Michigan USA), se agrega la solución de dextrosa y el agua se mezclan 1 minuto. Enseguida se agregó la harina y se mezcló por dos minutos. Una vez obtenida la masa se roló a una abertura de 7 mm y se cortaron con un molde de 6 cm de diámetro interno. Por último el horneado se realiza a una temperatura de 205°C por 10 minutos. Después de horneadas las galletas se dejaron enfriar 30 minutos y se procedió a evaluar la galleta. Se determina el valor del diámetro, el grosor y el factor de expansión de las galletas siguiendo el mismo método oficial.

La ciudad de Hermosillo, Sonora se encuentra a 282 m sobre el nivel del mar y su presión barométrica es de 1013.58 milibares. Bajo estas condiciones los factores de corrección utilizados para evaluar el diámetro fue de 0.997, para el grosor de 1.004 y para el factor de expansión fue de 0.994.

Determinación de Color

La evaluación del color se llevó a cabo por colorimetría de triestímulo utilizando un colorímetro Minolta CR-10. Se registraron tres parámetros: L, a y b, el valor de L igual a 100 es blanco y 0 es negro, un valor de +a es rojo y -a es verde, mientras que una +b es para el color amarillo y el -b es azul. Los resultados se expresaron como los valores promedio de 5 galletas.

Determinación de Textura

La firmeza de las galletas se midió por el método de punción, mediante un Texturómetro Instron (Universal Testing Machine, modelo 4465) bajo las siguientes

condiciones: a) velocidad del cabezal 100 mm/min, b) un punzón de 8 mm de diámetro, c) celda de carga de 500 kgf, donde la variable respuesta al corte se reporta en Nw/cm^2 para cada medición. Dichas mediciones se efectuaron por triplicado.

Estimación del Índice Glucémico de las Galletas

Esta determinación se realizó en las galletas que presentaron diferencias significativas en una prueba de contrastes entre las galletas elaboradas con salvado de trigo extrudido comparadas con la galleta 100% harina de trigo y las galletas elaboradas con salvado de trigo sin extrudir fracción gruesa y fina. Para determinar este valor se realizaron las siguientes determinaciones:

Almidón Disponible

Se utilizó la metodología propuesta por Holm et al., (1986). Se suspendieron en 20 mL de agua destilada 50 mg de muestra en base seca y se agitó constantemente durante 10 minutos. Se le adicionaron 100 μL de α -amilasa termoestable y se colocó en agua en ebullición por 20 minutos; se dejó enfriar y el contenido fue transferido a un matraz aforado de 100 mL. Se colocó en un tubo, 1 mL de solución reguladora de acetato de sodio pH 4.75. Se le adicionaron 25 μL de la solución de amilogucosidasa. Se tomó una alícuota de 500 μL y se incubó durante 30 minutos a 60°C con agitación constante. La solución anterior se aforó en un matraz de 10 mL. Se determinó la cantidad de glucosa liberada por digestión enzimática, mediante incubación con un sistema de glucosa/oxidasa peroxidasa (GOD-POD).

Tasa de Hidrólisis *in vitro*

La tasa de hidrólisis *in vitro* se determinó usando el método propuesto por Holm et al., (1985). Se pesaron 500 mg de almidón potencialmente disponible, que fueron dispersados en 50 mL de regulador de fosfatos en un vaso de precipitado, que posteriormente se colocaron en un baño a 37°C. Durante los primeros 5 minutos y antes de agregar la enzima se tomaron alícuotas de 200 µL de la muestra (con la finalidad de marcar el tiempo cero). Las cuales fueron puestas en tubos que contenían 800 µL de agua destilada y 1 mL del reactivo de ácido dinitrosalisílico. Posteriormente a intervalos de 30 segundos se agregaron a cada uno de los vasos 1 mL de la solución enzimática (amilasa pancreática), incubándose a 37°C con agitación constante. A tiempos intermedios: 15, 30, 45, 60, 75 y 90 minutos, se tomaron alícuotas de 200 µL, que se agregaron a tubos que contenían 800 µL de agua destilada y 1 mL del reactivo de ácido dinitrosalisílico. Después los tubos se colocaron en ebullición por 15 minutos, se dejaron enfriar para agregarles 15 mL de agua destilada. Se agitaron y se determinó la densidad óptica a 530 nm. Previamente se preparó una curva tipo de maltosa para poder calcular los azúcares reductores que se reportan como equivalentes de maltosa.

Estimación del índice Glucémico (IGe)

La estimación del índice glucémico se calculó usando la ecuación propuesta por Goñi et al., (1997): $IGe = 39.71 + 0.549 \times (IH_{90})$

Dónde: IH_{90} = Índice de hidrólisis a los 90 minutos.

Diseño Experimental y Análisis Estadístico

El trabajo se encuentra dividido en dos etapas existiendo para cada una de ellas un diseño de experimentos distinto, teniendo así: para el proceso de extrusión del salvado de trigo (etapa 1) se planteó un diseño experimental completamente al azar con dos repeticiones (Tabla 2). Los tratamientos están en un arreglo factorial con dos factores y tres niveles en cada factor:

- Perfil de temperatura: Perfil 1(60, 75, 85 y 100°C),
Perfil 2 (60, 80, 100 y 120°C) ó
Perfil 3 (60, 85, 110 y 140°C).
- Contenido de humedad: 15, 23 ó 31%

Se realizó un análisis de varianza para detectar las diferencias entre perfiles de temperatura (PT), contenido de humedad (H) y la interacción entre perfiles y humedad (PT*H). Los análisis de varianza que resultaron significativos se les realizó la prueba de medias de Tukey ($p < 0.05$).

El diseño experimental utilizado en las galletas elaboradas con salvado de trigo extrudido (etapa 2) fue un diseño completamente al azar con seis repeticiones (Tabla 3) donde los tratamientos se encuentran en un arreglo factorial con tres factores:

- Contenido de Humedad (3 niveles): 15, 23 ó 31%
- Perfil de temperatura (3 niveles): Perfil 1, Perfil 2 ó Perfil 3
- Fracción (2 niveles): SG ó SF

Tabla 2. Tratamientos experimentales para el proceso de extrusión

Tratamientos	Temperatura (°C)	Humedad (%)
1	Perfil 1	15
2	(60,75, 85 y 100)	23
3		31
4	Perfil 2	15
5	(60, 80, 100 y 120)	23
6		31
7	Perfil 3	15
8	(60, 85, 110 y 140)	23
9		31

Tabla 3. Tratamientos experimentales para la elaboración de las galletas

Tratamientos	Temperatura (°C)	Humedad (%)	Fracción
1	Perfil 1	15	SG
2	(60, 75, 85 y 100)	15	SF
3		23	SG
4		23	SF
5		31	SG
6		31	SF
7	Perfil 2	15	SG
8	(60, 80, 100 y 120)	15	SF
9		23	SG
10		23	SF
11		31	SG
12		31	SF
13	Perfil 3	15	SG
14	(60, 85, 110 y 140)	15	SF
15		23	SG
16		23	SF
17		31	SG
18		31	SF

Se llevó a cabo un análisis de varianza para detectar las diferencias entre contenido de humedad (H), perfiles de temperatura (PT), fracción de molienda del salvado de trigo extrudido (F) y la interacción entre estos tres (PT*H, PT*F, F*H, PT*H*F). A los análisis de varianza que resultaron significativos se les realizó la prueba de medias de Tukey ($p < 0.05$).

Para conocer si existieron diferencias significativas entre los resultados de las galletas elaboradas con el salvado de trigo extrudido con las dos fracciones de molienda (fina y gruesa) y las galletas control (galleta 100% harina de trigo blanca, galleta salvado de trigo sin extrudir fracción gruesa y galleta salvado de trigo sin extrudir fracción fina), se realizó una prueba de contrastes ($p < 0.05$). Las galletas que presentaron resultados significativos fueron seleccionadas para continuar con el análisis de fibra dietética soluble, insoluble y total así como con la predicción de su índice glucémico. A dichas galletas se les realizó un análisis de varianza para detectar diferencias significativas entre ellas, así como una prueba de medias de Tukey ($p < 0.05$).

Todos estos análisis fueron realizados en el paquete estadístico JMP versión 5.0.1 (SAS, 2001).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis Químico de las Materias Primas

En la Tabla 3 se muestran los resultados del análisis químico de las materias primas utilizadas. El contenido de humedad de las muestras se observa que no existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre ambas, presentando el salvado de trigo un valor de 11.02% mientras que la harina de trigo un 11.27%. Los resultados anteriores pueden deberse al proceso de acondicionamiento del grano del trigo previo a la molienda en el cual pudieran haber utilizado menor cantidad de agua que la que normalmente se utiliza haciendo con esto que la humedad del salvado sea semejante a la de la harina, así como también pudiera deberse al manejo y almacenamiento del grano de trigo y de la harina. Chung et al., (2010) reportan un contenido de humedad para harina de trigo fuerte americano de 10.7 a 12%, dependiendo de la velocidad de molienda del grano.

En lo que respecta al contenido de proteína se observan diferencias significativas entre el salvado de trigo y la harina de trigo, siendo el salvado el que presenta el mayor contenido de proteína, el cual es un valor muy cercano al valor reportado por Sudha et al., (2005) siendo un contenido de proteína de 13.12%, mientras que la harina de trigo presenta un valor de 10.23% de proteína siendo este un valor que se encuentra cercano al rango de proteína que presentan las harinas de trigo suave de 8.5-9% (Pedersen et al., 2004).

Tabla 4. Análisis Químico de las Materias Primas¹

Muestra	Humedad (%)	Proteína (%)	Cenizas (%)
Harina de Trigo	11.27 ^a	10.23 ^b	0.73 ^b
Salvado de Trigo	11.02 ^a	14.72 ^a	4.09 ^a

¹Los valores son promedio de tres determinaciones. Dentro de una columna, valores con diferente letra son significativamente diferentes ($p < 0.05$).

Uthayakumaran et al., (2003) caracterizaron dos líneas de trigo canadienses reportando un contenido de proteína entre 13.6-17.1%. La diferencia que existe entre estos resultados y los reportados, pudieran deberse a factores como la variedad de trigo, condiciones agronómicas y climatológicas de siembra y cosecha, tipos de suelo, eficiencia del proceso de molienda, entre otros. Por último el contenido de cenizas presenta diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las materias primas, el salvado de trigo contiene el mayor valor con 4.09%, mientras que la harina contiene un 0.73%, lo cual concuerda con lo citado por Manley (1983) quien reporta que cualquier tipo de salvado contiene más sustancia mineral que las otras fracciones de la molienda.

Análisis Físicoquímicos de los Extrudidos de Salvado de Trigo

Índice de Absorción de Agua (IAA) de los Extrudidos

En la Tabla 5 se presenta el ANDEVA del efecto del perfil de temperatura (PT), contenido de humedad (H) y la interacción (PT*H) durante el proceso de extrusión sobre las características físicoquímicas de los extrudidos de salvado de trigo. Primeramente en lo referente a los resultados del índice de absorción de agua de los extrudidos de salvado de trigo, se observa un efecto altamente significativo ($p < 0.01$) de los factores que se manejaron durante el proceso de extrusión, contenido de humedad (H) y perfil de temperatura (PT), así como también de la interacción de dichos factores (PT*H). En la Figura 1 se presentan los resultados de la interacción entre los perfiles de temperatura y el contenido humedad para el IAA, se aprecia

Tabla 5. Análisis de Varianza, Valor de F, del efecto del perfil de temperatura y contenido de humedad sobre el Índice de absorción de agua, rango de expansión, densidad y determinación de color (L, a y b) de los extrudidos de salvado de trigo.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Valor de F					
		IAA ¹	Índice de Expansión	Densidad	L	a	b
Perfil de Temperatura (PT)	2	21.85 ⁴	12.37 ^{**}	42.85 ^{**}	12.83NS ²	4.93 ³	0.35 NS
Contenido de Humedad (H)	2	78.90 ^{**}	1002.84 ^{**}	9.11 ^{**}	108.23 ^{**}	50.63 ^{**}	45.43 ^{**}
PT*H	4	20.11 ^{**}	92.58 ^{**}	34.54 ^{**}	5.38 ^{**}	62.94 ^{**}	13.53 ^{**}
Error	7						
Total	15						

¹IAA = Índice de absorción de agua

²NS = No significativo a un nivel de p = 0.05 (p > 0.05)

³* = Significativo a un nivel de p = 0.05 (p < 0.05)

⁴** = Significativo a un nivel de p = 0.01 (p < 0.01)

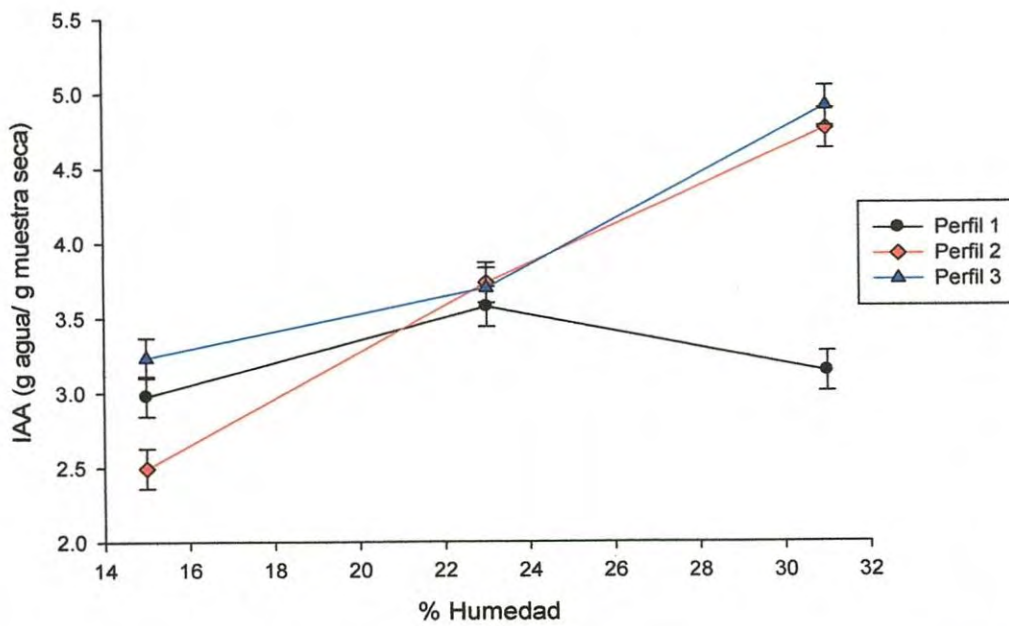


Figura 1. Efecto del perfil de temperatura y el contenido de humedad sobre el índice de absorción de agua de los extrudidos de salvado de trigo.

que en los mayores perfiles de temperatura (2 y 3) el IAA incremento así como también al aumentar el contenido de humedad, siendo así que los tratamientos con el perfil 2 y 3 con 31% de humedad presentan los mayores valores de IAA con 4.91 y 4.76 (g agua/g muestra seca), respectivamente sin ser significativamente diferentes entre ellos.

Ralet et al., (1990) reportaron que el tratamiento térmico incrementa la velocidad inicial de absorción de agua. Una posible explicación para esto pudiera ser que dependiendo de la intensidad del tratamiento de extrusión este cause una interrupción de las estructuras y por lo tanto se crean poros donde el agua puede penetrar, sin embargo tratamientos muy drásticos pudieran inducir colapso de dicha estructura, lo cual llevaría a disminuir el IAA.

Los resultados obtenidos concuerdan con lo publicado por Gutkoski y El-Dash (2000) así como también por Gupta et al., (2008), atribuyendo estos últimos investigadores este efecto a que el agua actúa como un plastificante durante el proceso de extrusión, lo cual resulta en una mayor capacidad de absorción de agua.

Índice de Expansión de los Extrudidos

En los resultados sobre el índice de expansión de los extrudidos de salvado de trigo se encontró un efecto altamente significativo ($p < 0.01$) de ambos factores (perfiles de temperatura y contenido de humedad) durante el proceso de extrusión, así como una interacción doble (PT*H) altamente significativa (Tabla 5). En la Figura 2 se presentan los resultados del efecto del porcentaje de humedad sobre el rango de expansión de los tratamientos. Se observa que al aumentar el contenido de humedad

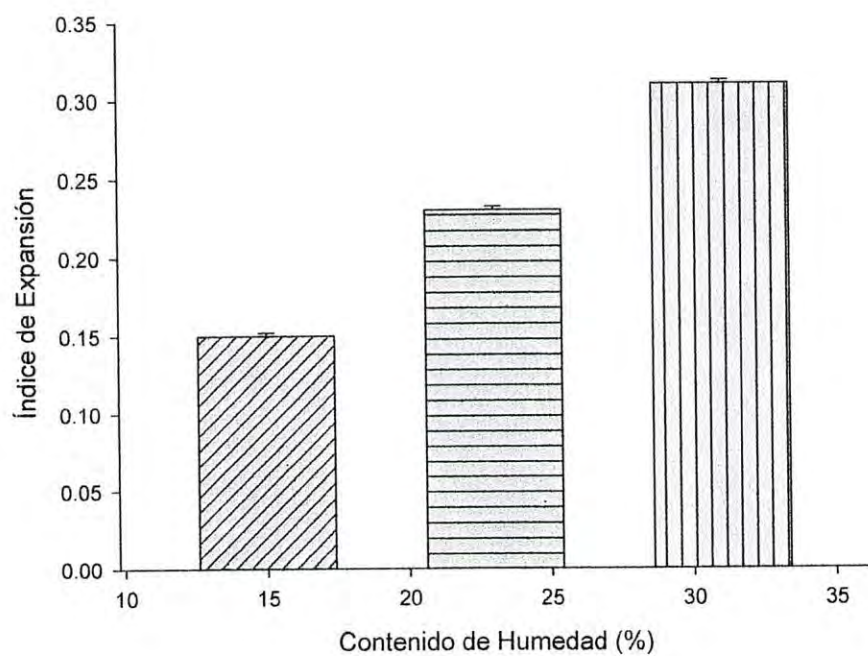


Figura 2. Efecto del contenido de humedad del proceso de extrusión sobre el índice de expansión de los extrudidos de salvado de trigo.

disminuye el índice de expansión, esto pudiera deberse a un debilitamiento de la estructura del extrudido, la cual depende de la viscosidad.

Carrasco-Valencia et al., (2009) reportan una disminución en la expansión de extrudidos de harina y salvado de Kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*) al incrementar el contenido de humedad. La expansión de los cereales extrudidos depende del grado de gelatinización del almidón (mayor expansión indica mayor grado de gelatinización). Anton et al., (2009) elaboraron botanas extrudidas agregando distintos porcentajes de harinas de frijol (15, 30 y 45 %) a almidón de maíz, y encontraron que la expansión de estas botanas disminuía al incrementar el contenido de harina de frijol en ellas. Concluyen que esto puede deberse a disminuir la cantidad de almidón de maíz y al mismo tiempo aumentar la concentración de proteína y fibra a través de la adición de harina de frijol, por lo tanto esta menor expansión se debe a que la fibra puede romper la pared celular y evitar que las burbujas de aire logren una máxima expansión.

La Figura 3 presenta el efecto de los perfiles de temperatura sobre el índice de expansión. Se observa que al incrementar el perfil de temperatura el índice de expansión aumenta, no existiendo diferencias significativas entre el perfil 2 y 3.

La expansión es altamente dependiente de la composición química de los materiales usados y de las transformaciones de estos constituyentes durante el proceso. Durante la extrusión cuando el extrudido sale del dado, repentinamente pasa de una zona de alta presión hacia la presión atmosférica. Ese cambio en la presión causa una evaporación de la humedad interna y de la presión de vapor del agua, con lo

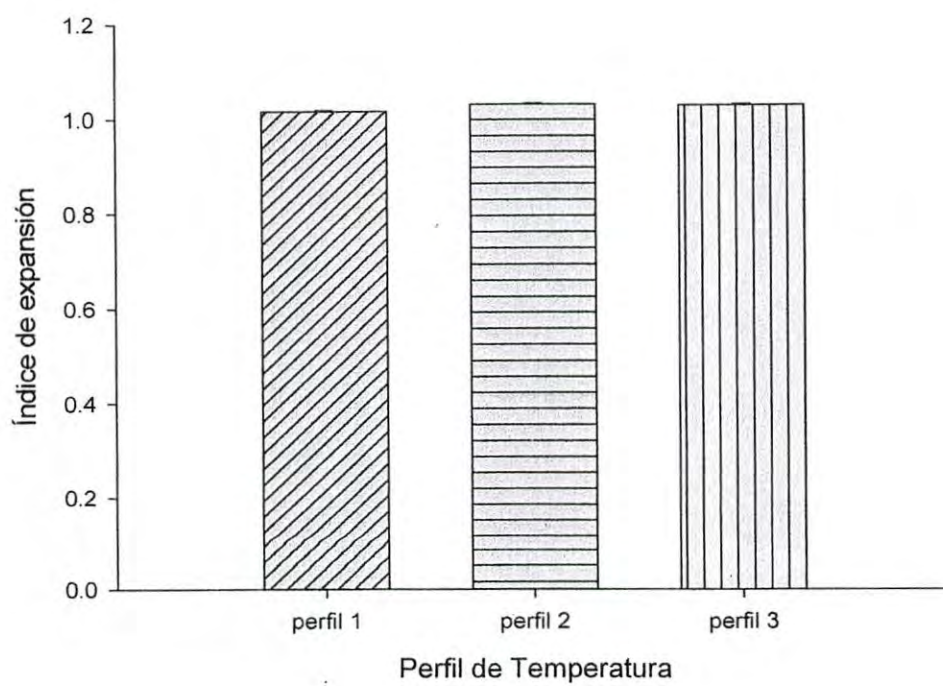


Figura 3. Efecto del perfil de temperatura del proceso de extrusión sobre el índice de expansión de los extrudidos de salvado de trigo.

cual se forman burbujas en el extrudido fundido, permitiendo así la expansión del extrudido (Gupta et al., 2008; Ayadi et al., 2011).

Densidad de los Extrudidos

Los resultados de la densidad de los extrudidos de salvado de trigo, muestran una influencia significativa del contenido de humedad (H) y de los perfiles de temperatura (PT) del proceso de extrusión, así como por la interacción de ambos (PT*H) (Tabla 5). En la figura 4 se presenta el efecto del contenido de humedad sobre la densidad de los extrudidos de salvado de trigo. Se observa que al incrementar el contenido de humedad (23 y 31%) del salvado de trigo, se presenta un incremento de la densidad de los extrudidos, sin existir diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$) entre ellos.

Generalmente el índice de expansión de los extrudidos esta inversamente relacionado con la densidad; Ayadi et al., (2011) concluyen que la densidad depende del contenido de almidón, de la evaporación del vapor de agua y de las propiedades de flujo de la masa fundida. A medida que la gelatinización incrementa, el volumen de los productos extrudidos incrementa y la densidad disminuye (Gupta et al., 2008).

Wang et al., (1993) reportan que el proceso de extrusión incrementa la densidad de extrudidos de salvado de trigo pero disminuye en extrudidos elaborados a partir de trigo entero. Al incrementar el contenido de fibra así como el de proteína en una botana extrudida a base de almidón de maíz se encontró que la densidad de los extrudidos incrementaba (Anton et al., 2009).

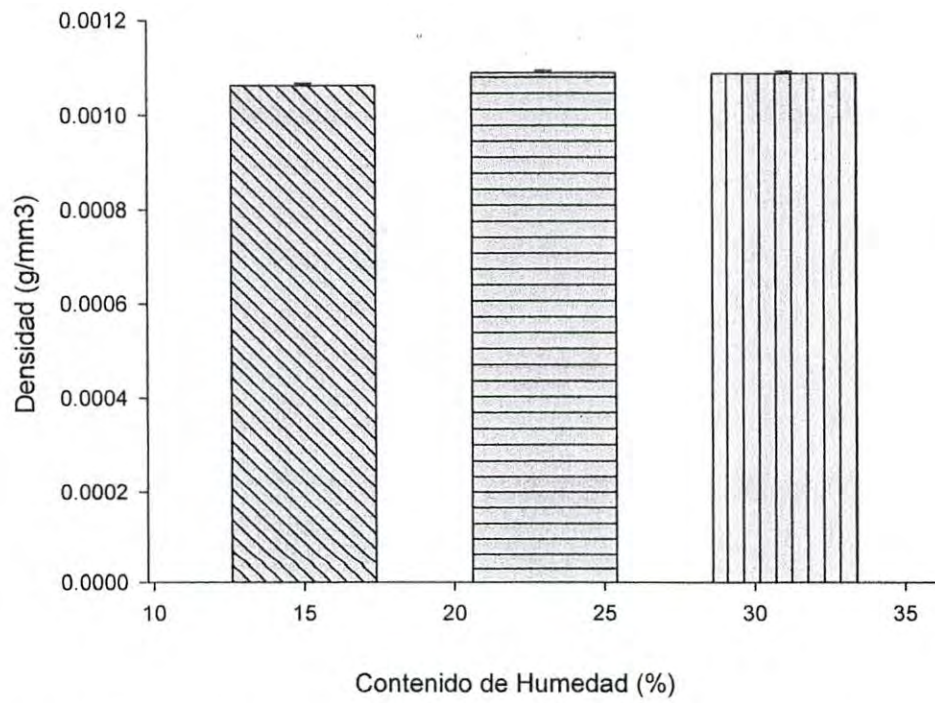


Figura 4. Efecto del contenido de humedad (%) del proceso de extrusión sobre la densidad de los extrudidos de salvado de trigo.

Determinación de Color de los Extrudidos: L, a y b

Los resultados del color de los extrudidos específicamente del parámetro luminosidad (L) muestran que el efecto de la interacción PT*H fue estadísticamente significativo ($p < 0.01$), sin embargo, no fue así para el caso del perfil de temperatura individualmente (Tabla 5). En la Figura 5 se presenta el efecto de dicha interacción y se observa que al aumentar el perfil de temperatura e incrementar el contenido de humedad, el valor de L disminuye haciendo más oscuros a los extrudidos. Lo anterior concuerda con lo reportado por Gutkoski y El-Dash (2000), quienes analizaron productos extrudidos de avena integral reportando que L disminuye con el incremento en el contenido de humedad así como al aumentar la temperatura de extrusión.

Sin embargo, otros investigadores han reportado lo contrario, Gupta et al., (2008), quienes trabajaron con extrudidos de harina de cebada encontraron que al disminuir el contenido de humedad se reduce el valor de L en los extrudidos, concluyendo que estas condiciones favorecen las reacciones de Maillard. Estas diferencias se atribuyen a la distinta composición de las materias primas, las harinas contienen mayor almidón comparadas con el salvado de trigo.

En lo que respecta a los parámetros a y b del color de los extrudidos, se encontró que para "a" se presentó un efecto significativo ($p < 0.05$) de ambos factores (PT y H) así como de la interacción de estos factores (PT*H) (Tabla 5), sin embargo para el parámetro b el PT no presentó diferencias significativas ($p < 0.05$) solamente el contenido de humedad mostró diferencias significativas.

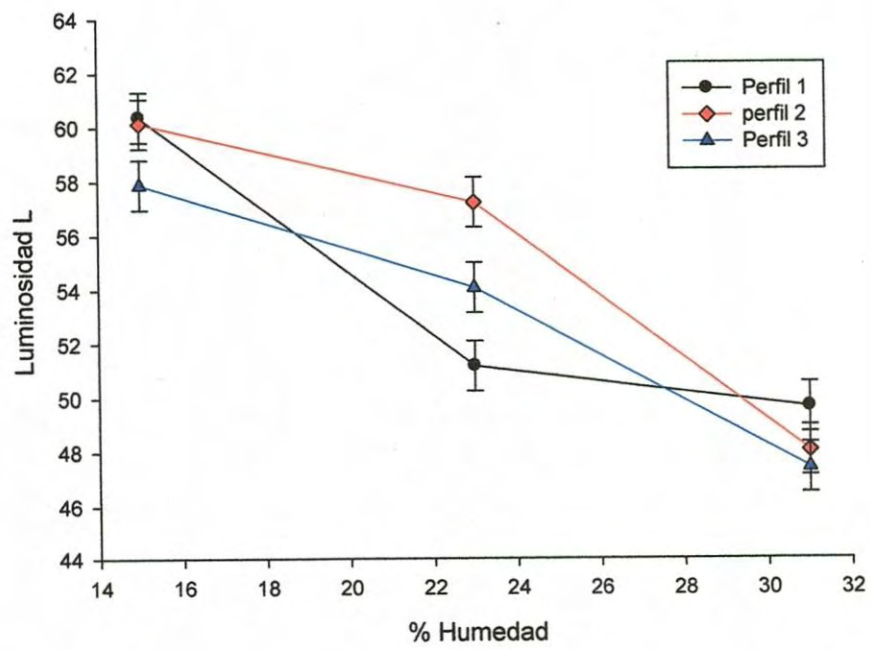


Figura 5. Efecto del perfil de temperatura y el contenido de humedad del proceso de extrusión sobre la luminosidad (L) de los extrudidos.

En la Figura 6 se presenta el efecto del contenido de humedad del proceso de extrusión sobre el parámetro b del color de los extrudidos de salvado de trigo. Se observa que el valor de b disminuye al incrementar el contenido de humedad en el salvado de trigo a extrudir, mientras que el mayor valor se obtienen con el 23% de humedad sin ser estadísticamente diferente del 15% de humedad.

Gutkoski y El-Dash, (2000) reportaron en extrudidos de avena un incrementó tanto para a (rojo) como para b (amarillo) cuando trabajaron con altos niveles de humedad y temperatura, mientras se produjo una disminución para estos parámetros cuando el contenido de humedad y las temperaturas disminuían. Estas diferencias con la presente investigación pudieran deberse primeramente a las distintas materias primas utilizadas así como a las diferentes condiciones del proceso de extrusión.

En extrudidos a base de arroz con un diferentes porcentajes de cebada (10-30%) se encontró que un alto contenido de humedad en el material a extrudir causa que el producto extrudido presente bajos valores de a, mientras presenta mayor luminosidad (Gupta et al., 2008).

Parámetros Físicos de las Galletas Elaboradas con Salvado de Trigo Extrudido con Dos Fracciones de Molienda

Los resultados de las pruebas físicas realizadas en las galletas elaboradas con las dos fracciones de molienda del salvado de trigo extrudido fracción fina y gruesa se presentan a continuación:

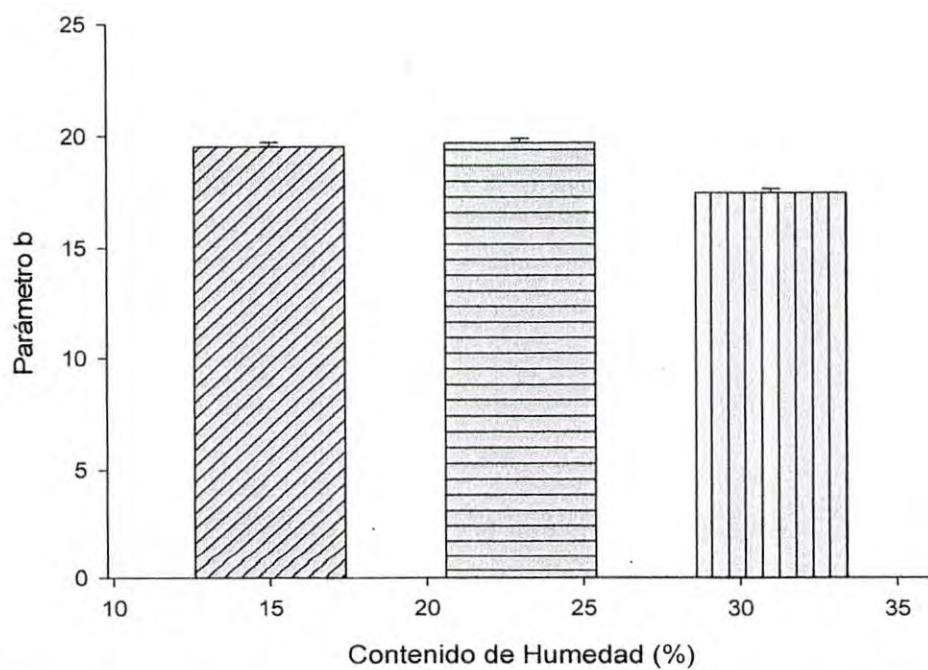


Figura 6. Efecto del contenido de humedad (%) del proceso de extrusión sobre el parámetro de color b de los extrudidos de salvado de trigo.

Determinación de Color: L, a y b

En la Tabla 6 se presenta el ANDEVA del efecto del perfil de temperatura, contenido de humedad y fracción de molienda (grueso y fino) del salvado de trigo extrudido, sobre el valor de L, a, b, diámetro, grosor, factor de expansión y firmeza de las galletas elaboradas con el salvado de trigo extrudido molido.

Se encontró que para el color de las galletas, el parámetro L presenta un efecto significativo del perfil de temperatura, contenido de humedad y fracción de molienda (PT, H y F), así como de sus interacciones (PT*H, PT*F, H*F), existiendo además una triple interacción (PT*H*F) altamente significativa ($P < 0.01$) (Tabla 6). En la Figura 7 se observa el efecto de la interacción entre el perfil de temperatura del proceso de extrusión y la fracción de molienda fina y gruesa sobre el parámetro L. La fracción fina presenta los mayores valores de L, así como el perfil 2 presenta mayores valores para L, mientras que la fracción gruesa tiene menores valores para L, siendo estas galletas más oscuras comparadas con las galletas elaboradas con la fracción fina. El mejor valor de L lo presentó la fracción fina en el perfil 2 de temperatura.

Las diferencias de color entre las distintas galletas con las dos fracciones de molienda pudieran deberse a que en la fracción fina se encontraba mayor cantidad de endospermo comparada con la fracción gruesa, el cual aporta un color más claro.

Zucco et al., (2011) elaboraron galletas suplementadas con harina de leguminosas con diferentes tamaño de partícula y no encontraron diferencias significativas en el color de estas galletas.

Tabla 6. Análisis de Varianza, valor de F, del efecto del perfil de temperatura, contenido de humedad, y fracción de molienda del salvado de trigo extrudido sobre el valor de L, a, b, diámetro, grosor, factor de expansión y firmeza de las galletas elaboradas con el salvado de trigo extrudido molido.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Valor de F						
		L	a	b	Diámetro	Grosor	Factor Expansión	Fuerza máxima
Perfil de Temperatura (PT)	2	130.82 ^{**2}	92.42 ^{**}	163.19 ^{**}	138.93 ^{**}	41.19 ^{**}	363.50 ^{**}	688.74 ^{**}
Contenido de Humedad (H)	2	7.60 ^{**}	157.11 ^{**}	60.91 ^{**}	212.86 ^{**}	42.24 ^{**}	743.63 ^{**}	163.71 ^{**}
Fracción (F)	1	380.36 ^{**}	45.35 ^{**}	457.70 ^{**}	2451.76 ^{**}	231.13 ^{**}	4238.63 ^{**}	1247.09 ^{**}
H*F	2	12.66 ^{**}	18.59 ^{**}	26.25 ^{**}	200.10 ^{**}	21.30 ^{**}	573.97 ^{**}	485.24 ^{**}
PT*F	2	4.38 ^{**}	23.09 ^{**}	15.69 ^{**}	52.14 ^{**}	39.18 ^{**}	294.58 ^{**}	277.33 ^{**}
PT*H	4	10.39 ^{**}	41.08 ^{**}	49.11 ^{**}	155.91 ^{**}	9.73 ^{**}	256.20 ^{**}	148.64 ^{**}
PT*H*F	4	17.95 ^{**}	9.79 ^{**}	22.41 ^{**}	17.79 ^{**}	1.31NS ¹	50.96 ^{**}	187.53 ^{**}
Error	16							
Total	33							

¹NS = No significativo a un nivel de p = 0.05 (p > 0.05)

²** = Significativo a un nivel de p = 0.01 (p < 0.01)

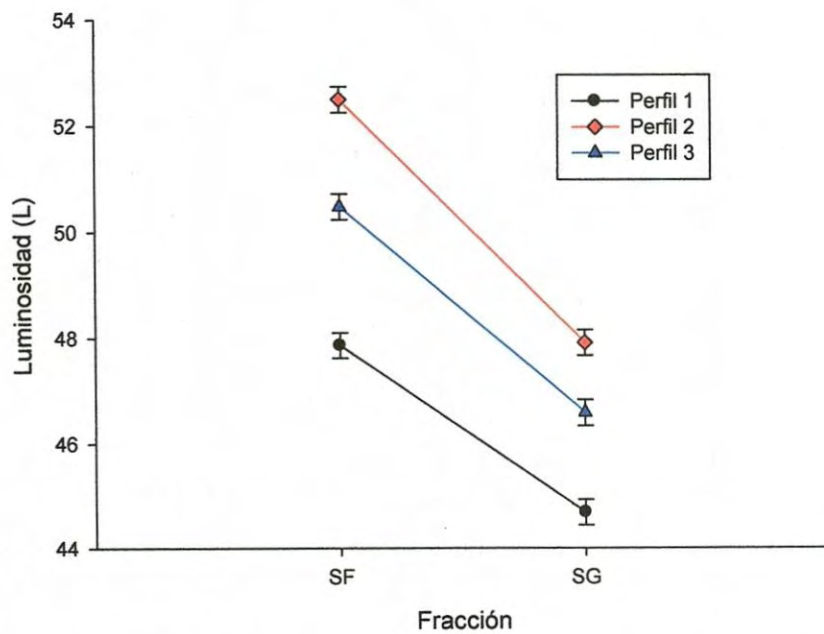


Figura 7. Efecto del perfil de temperatura y la fracción de molienda del salvado de trigo extrudido sobre el parámetro luminosidad (L).

Con respecto a los parámetros a y b (rojizo y amarillo) de las galletas elaboradas con salvado de trigo extrudido fracción gruesa y fina, se encontró que para ambos parámetros existe un efecto significativo de cada uno de los factores analizados (PT, H y F), así como de las interacciones de estos (PT*H, PT*F, H*F y PT*H*F) obteniéndose una triple interacción altamente significativa ($p < 0.01$) (Tabla 6).

En la Figura 8 se presenta el efecto del perfil de temperatura y el contenido de humedad utilizado en el proceso de extrusión del salvado de trigo sobre el parámetro b. Se observa un incremento en este valor a medida que aumenta el perfil de temperatura, así como también se ve esto en el contenido de humedad de 23%, mientras que para el 31% de humedad no existieron diferencias significativas en ninguno de los tres perfiles de temperatura. La combinación de perfil 3 de temperatura con un 23% de humedad presentó el mayor valor de b siendo estas galletas las que muestran una mayor tendencia al color amarillo dorado. Esto pudiera deberse no solo al efecto significativo de los factores utilizados durante el proceso de extrusión (PT, H y F) sino también al proceso de horneado de la galleta.

El color de la superficie de la galleta se genera durante el proceso de horneado posiblemente debido al encafecimiento no enzimático (reacciones de Maillard) entre azúcares reductores y aminoácidos, pero también posiblemente a la dextrinización del almidón y la caramelización del azúcar (Chevallier et al. 2000).

Han et al., (2008), reportan que al incrementar el contenido de humedad arriba del 30%, el valor promedio de b (amarillo) disminuye ligeramente, esto en pasteles de avena elaborados a partir de extrudidos de avena.

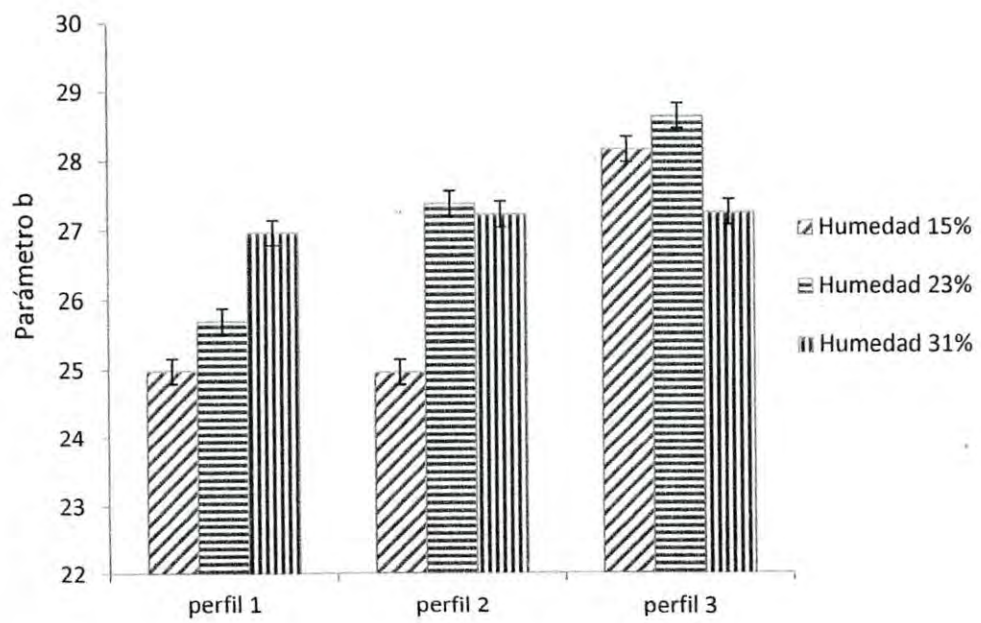


Figura 8. Efecto del perfil de temperatura y el contenido de humedad (%) del salvado de trigo extrudido sobre el color (parámetro b) de las galletas elaboradas.

Determinación de las Medidas Físicas: Diámetro, Grosor y Factor de Expansión de las Galletas

En lo referente al diámetro de las galletas, el cual es un factor muy importante de calidad y principal parámetro de aceptación por parte de los consumidores, se observó que los factores perfil de temperatura, contenido de humedad y fracción de molienda, así como las interacciones entre estos PT*H, PT*F, F*H y PT*F*H, presentaron un efecto altamente significativo ($P < 0.01$) sobre el diámetro de las galletas (Tabla 6).

En la Figura 9 se presenta el efecto del perfil de temperatura y contenido de humedad sobre el diámetro de las galletas. Se observa que para el perfil 1 y 2 de temperatura la tendencia es aumentar el diámetro de la galleta al incrementar el contenido de humedad, obteniéndose el mayor valor en el perfil 1 con 31% de humedad, mientras que para el perfil 3 de temperatura, el diámetro disminuyó a partir del 23% de humedad y no fue significativamente diferente con el valor del 31% de humedad. A Mayores contenidos de humedad pueden significar en mayor cantidad de agua disponible para formación de jarabe con el azúcar de la formulación, lo cual favorece la expansión de la galleta (Fuhr, 1962), por lo tanto significa mayor diámetro en las galletas.

Los resultados obtenidos demuestran que al aumentar el contenido de humedad el diámetro de la galleta tiende a incrementar. Con respecto al perfil de temperatura el menor valor de diámetro (64.90 mm) corresponde al perfil 2, mientras el mayor valor de diámetro (85.65 mm) corresponde al perfil 1.

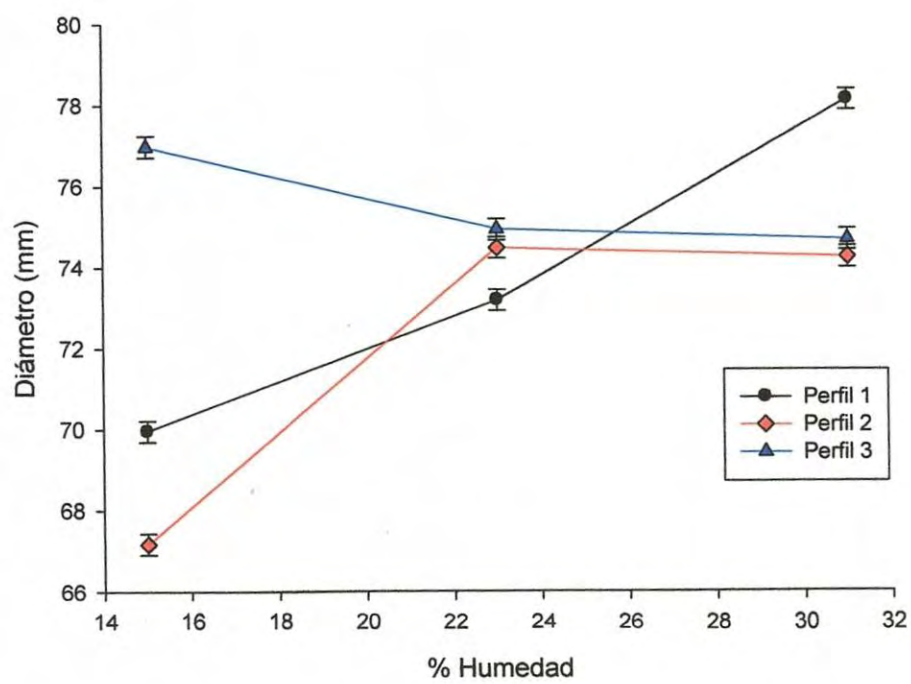


Figura 9. Efecto del perfil de temperatura y contenido de humedad del salvado de trigo extrudido sobre el diámetro de las galletas.

En la Figura 10 se presenta el efecto de la fracción de molienda y el contenido de humedad sobre el diámetro de la galleta elaborada con el salvado de trigo extrudido. Se observa que en la fracción gruesa, a medida que incrementa el contenido de humedad el diámetro aumenta, lo cual pudiera deberse a que existe mayor cantidad de agua libre, disponible para la expansión de la galleta. Dentro de los valores de diámetro, se observa que las galletas con la fracción gruesa de salvado de trigo extrudido presentan mayor valor de diámetro.

Gaines y Donelson (1985) reportan que al disminuir el tamaño de partícula de harina integral decrece el diámetro de la galleta, lo cual atribuyen al incremento de la absorción de agua en la superficie ampliada debido a la molienda continua. Esto resulta en una menor agua disponible, causando que aumente la viscosidad de la masa y exista una menor expansión de la galleta durante el horneado. Así mismo Gujral et al., (2003) y Guttieri et al., (2011) reportan que harinas con mayor tamaño de partículas (gruesas) producen galletas con diámetros mayores.

Zucco et al., (2011) reportan en galletas adicionadas con harinas de leguminosas con diferentes tamaños de partícula, que el diámetro de las galletas disminuye al reducirse el tamaño de partícula, atribuyendo esto al almidón dañado, el cual tiene un gran efecto en la absorción de agua de la harina. Alto niveles de almidón dañado pueden conducir a diámetros pequeños debido a la absorción de grandes cantidades de agua lo cual incrementa la viscosidad de la masa, en partículas más pequeñas es de esperarse que contengan altos niveles de almidón dañado comparado con las partículas más gruesas.

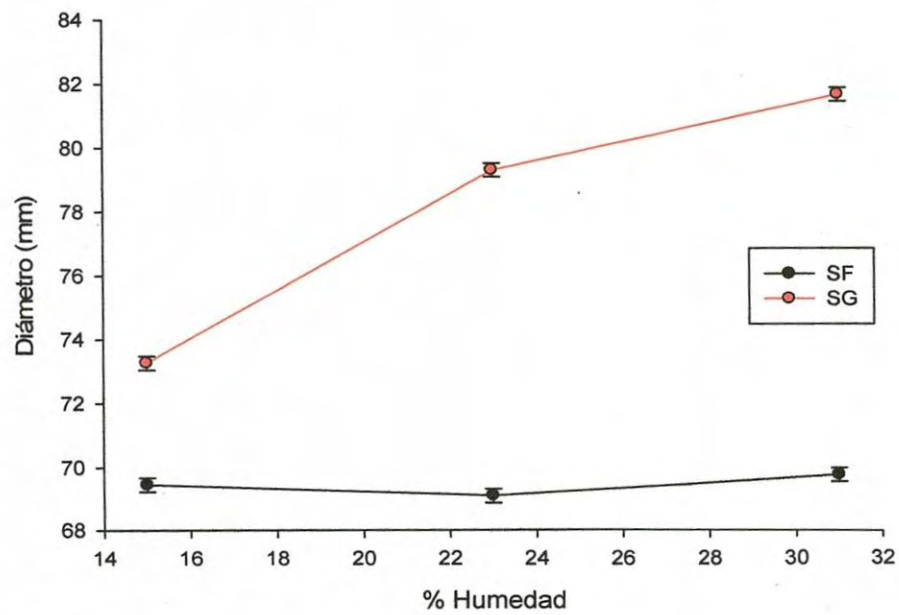


Figura 10. Efecto de la fracción de molienda (SF: salvado fracción fina y SG: salvado fracción gruesa) y el contenido de humedad del salvado de trigo extrudido sobre el diámetro de la galleta.

Mediante la prueba de contrastes realizada a los resultados del diámetro de las galletas, se determinó la existencia de diferencias significativas en las mismas al ser comparadas con la galleta 100% harina de trigo blanca (C0) ($p < 0.05$). Mientras que al comparar las galletas con salvado de trigo extrudido con las galletas con salvado de trigo sin extrudir fracción gruesa (C1) y fracción fina (C2), se presentó que en cuanto a las galletas con la fracción gruesa existe una diferencia altamente significativa ($p < 0.01$). Sin embargo, al comparar las galletas de la fracción fina con su contraparte sin extrudir (C2) se observó que solamente existen diferencias significativas ($p < 0.05$) con la galleta 14 fracción fina, presentando esta última un mejor valor de diámetro (75 mm).

Mediante las diferencias significativas observadas en la prueba de contrastes entre las galletas elaboradas con salvado de trigo extrudido y molido en una fracción gruesa y una fracción fina y las galletas con salvado de trigo sin extrudir fracción gruesa y fina, se observa que ciertas galletas mejoraron su valor de diámetro al ser comparadas con estas últimas galletas, siendo la galleta 5 con 85.65 mm la que presenta el mayor valor de diámetro, seguida por la galleta 11 con 80.58 mm. Para la fracción fina solamente la galleta 14 presenta diferencias significativas así como mejor valor de diámetro respecto a su galleta con salvado de trigo sin extrudir con 75 mm de diámetro.

El efecto del proceso de extrusión así como de sus condiciones sobre este parámetro de calidad aún no se encuentra bien documentado y/o estudiado, varios investigadores reportan una posible fragmentación u otro tipo de descomposición de

celulosa y lignina (capaces de absorber grandes cantidades de agua) debido al proceso de extrusión (Gajula et al., 2008; Vasanthan et al., 2001; Ralet et al., 1990; Asp et al., 1986), es así que pudiera quedar mayor cantidad de agua libre disponible para disolver el azúcar y obtener así una expansión mayor en las galletas elaboradas con el salvado de trigo extrudido.

El grosor en las galletas elaboradas con salvado de trigo extrudido fracción gruesa y fina presenta una relación inversamente proporcional al valor del diámetro de las galletas. Es así que la galleta 2 presenta el mayor valor con 25.72 mm, mientras que la galleta 5 muestra el menor valor de grosor con 16.33 mm, seguida de la galleta 11 con un valor de 19.16 mm siendo estas dos últimas galletas las que muestran mayores valores de diámetros.

La relación D/G permite obtener el llamado factor de expansión de las galletas. Como es de esperarse las galletas con los mayores valores de diámetro obtuvieron mejores valores de expansión, presentándose así un valor de 5.24 para la galleta 5 siendo este el mayor valor de expansión, mientras el valor mínimo lo presentó la galleta 2 con un valor de 2.63 cuya relación diámetro menor y mayor grosor definieron un menor factor de expansión.

Huerta-Hernández (2007) reportó parámetros físicos de una galleta elaborada con harina de trigo fuerte, obteniendo los siguientes resultados para el diámetro un valor de 7.11 cm, grosor de 1.11 cm y una relación D/G de 6.40.

Sudha et al., (2005) reportaron valores de diámetro, grosor y relación D/G en galletas elaboradas con harina de trigo blanca y galletas con 30% de salvado de trigo en su

formulación. Ellos encontraron que la galleta control presentó un diámetro de 5.53 cm, grosor de 0.60 cm y una relación D/G de 0.83 cm; mientras que la galleta elaborada con 30% de salvado de trigo midió un diámetro de 5.34 cm, grosor de 0.68 cm y una relación D/G de 0.75 cm. Como se puede observar, los resultados presentados muestran que los parámetros evaluados en las galletas se vieron afectados negativamente con la adición de salvado de trigo ya que se provocó una disminución del diámetro y del factor de expansión, así como un incremento del grosor de esta galleta con 30% de salvado de trigo, bajo las condiciones de su experimento.

En esta investigación este decremento en los parámetros físicos de las galletas se observó en las galletas donde se utilizó el salvado de trigo sin extrudir fracción gruesa y fina, mientras que al utilizar salvado de trigo extrudido (bajo las condiciones anteriormente especificadas) fracción gruesa y fina en las galletas se obtuvieron mayores valores para diámetro y factor de expansión. Las diferencias entre los resultados de ambas investigaciones, pudieran deberse primeramente a las materias primas utilizadas en la formulación, a la utilización de salvado de trigo sometido al proceso de extrusión, a las distintas fracciones de molienda del salvado de trigo extrudido, así como el método de preparación de las galletas, equipo utilizado durante la elaboración de las galletas y el método empleado para realizar las mediciones físicas de las galletas.

Fuerza Máxima de Ruptura de las Galletas

La fuerza máxima de ruptura de las galletas fue afectada por los factores perfil de temperatura (PT), contenido de humedad (H), fracción (F) y sus interacciones dobles (PT*H, PT*F, F*H) presentándose además una triple interacción (PT*F*H) muy significativa ($p < 0.01$) (Tabla 6).

En la Figura 11 se presenta el efecto del perfil de temperatura y la fracción sobre la firmeza de la galleta. Se observa que en los perfiles 1 y 2 se presentan mayores valores de fuerza de ruptura en las galletas, siendo la combinación de perfil 2 y fracción fina la que presenta el mayor valor. La fracción fina presenta los mayores valores de fuerza máxima en todas las galletas, mientras que el perfil 3 no presenta diferencias significativas entre ambas fracciones. Siendo estas galletas las que presentan valores menores de firmeza. Altan et al., (2007) reportan que a temperaturas superiores aumentan la dextrinización y ocurre un debilitamiento de la estructura propuesta, la cual depende de la viscosidad y la elasticidad, posiblemente disminuyendo con esto su firmeza.

En la Figura 12 se presenta el efecto de la fracción y el contenido de humedad sobre la fuerza máxima de la galleta. Se observa que la fracción fina presenta una tendencia a incrementar su firmeza hasta llegar al 23% y después disminuye en 31%, mientras que para la fracción gruesa la tendencia es contraria al aumentar el porcentaje de humedad la firmeza disminuye, en general se presentan mayores valores de firmeza para las galletas con la fracción fina.

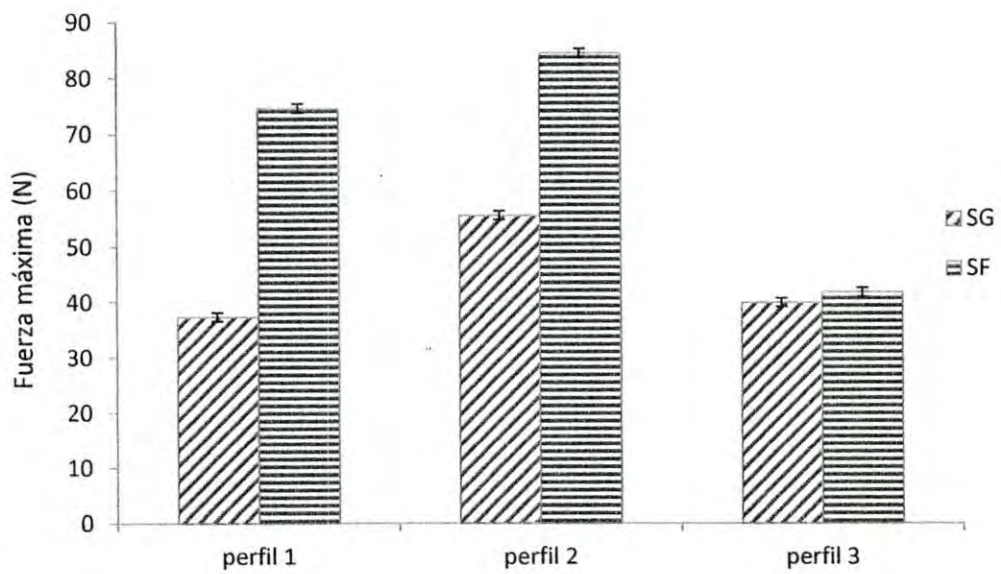


Figura 11. Efecto de la fracción de molienda (SF: salvado fracción fina y SG: salvado fracción gruesa) y el perfil de temperatura del salvado de trigo extrudido sobre la fuerza máxima de ruptura de la galleta.

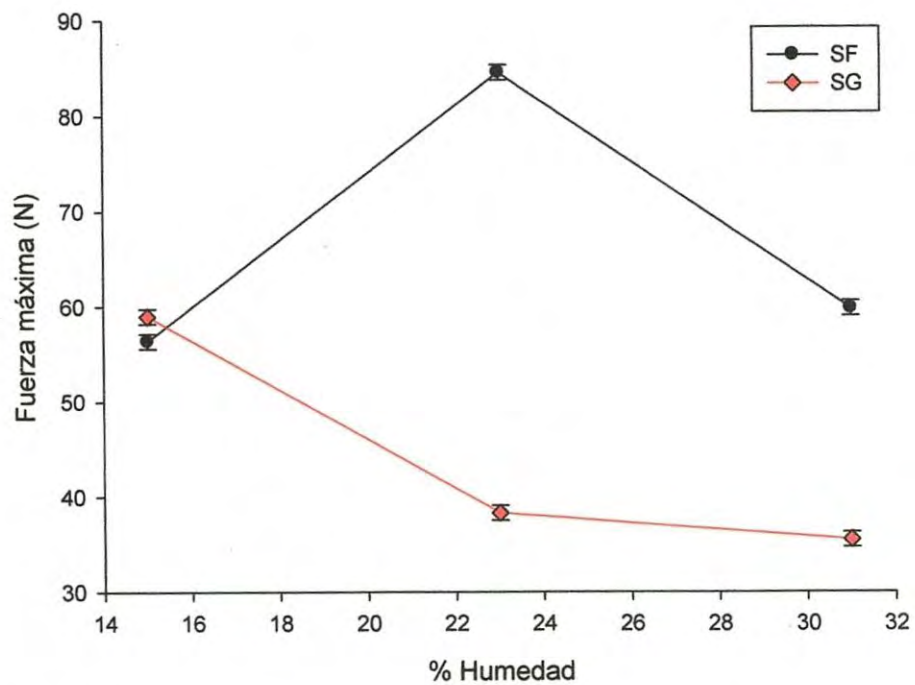


Figura 12. Efecto de la fracción de molienda (SF: salvado fracción fina y SG: salvado fracción gruesa) y el contenido de humedad del salvado de trigo extrudido sobre la fuerza máxima de ruptura de las galletas.

Zucco et al., (2011) reportan que el grado de molienda tiene un efecto significativo en la dureza de la galleta, la incorporación de partículas y/o harinas finas incrementan la dureza de la galleta comparada con fracciones gruesas. La diferencia entre tamaños de partícula de las harinas puede influenciar la asociación entre las proteínas y el almidón resultando en galletas con dureza variada.

Parámetros Químicos de las Galletas Elaboradas

Determinación de Fibra Dietética de las Galletas

De acuerdo al análisis estadístico, se presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre cada una de las galletas, así como en cada una de las fibras, insoluble, soluble y total. En la Tabla 7 se presentan los contenidos de fibra dietética insoluble (FDI), soluble (FDS) y total (FDT) de las galletas elaboradas con salvado de trigo extrudido molido (fracción gruesa y fina) que presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) en las pruebas de contrastes donde las variables respuesta fueron el diámetro y la fuerza máxima de ruptura, siendo estas galletas las siguientes: galleta 5 salvado de trigo extrudido fracción gruesa (Galleta 5 SGE), galleta 11 salvado de trigo extrudido fracción gruesa (Galleta 11 SGE) y la galleta 14 salvado de trigo extrudido fracción fina (Galleta 14 SFE).

Se observa que para los tres tipos de fibra dietética la galleta 5 (SGE) presenta el valor mayor de éstas siendo 9.85, 6.88 y 16.73%, respectivamente, no existiendo diferencias significativas con la galleta 11 (SGE).

Tabla 7. Contenido de Fibra Dietética Insoluble, Soluble y Total en las Galletas¹

Galletas	FDI	FDS	FDT
	(%)		
C0 ²	3.38 ^d	5.15 ^c	8.53 ^e
C1 ³	8.82 ^b	6.03 ^b	14.83 ^b
C2 ⁴	6.07 ^c	5.08 ^c	11.16 ^d
Galleta 5 (SGE)	9.85 ^a	6.88 ^a	16.73 ^a
Galleta 11 (SGE)	9.49 ^{ab}	6.23 ^{ab}	15.73 ^{ab}
Galleta 14 (SFE)	6.84 ^c	5.92 ^b	12.76 ^c

¹Los valores son promedio de tres determinaciones. Dentro de una columna, valores con diferente letra son significativamente diferentes ($p < 0.05$).

²Galleta 100% harina blanca, ³ Galleta sin extrudir fracción gruesa, ⁴ Galleta sin extrudir fracción fina
Abreviaturas, FDI (Fibra dietética insoluble), FDS (Fibra dietética soluble), FDT (Fibra dietética total),
SGE (Salvado de trigo extrudido fracción gruesa), SFE (Salvado de trigo extrudido fracción fina).

Mientras el menor valor corresponde a la galleta C0 (100% harina de trigo) con 3.38, 5.15 y 8.53% para cada una de los tipos de fibra dietética, lo cual es de esperarse debido a su formulación con únicamente harina de trigo blanca.

Se presenta un mayor contenido de FDI, FDS y FDT en las galletas elaboradas con el salvado de trigo fracción gruesa. Esto pudiera deberse a que la composición química de dicha fracción, conformada principalmente por el pericarpio (celulosa, lignina y arabinoxilanos), componentes mayoritarios de la fracción insoluble. Por su parte el aumento en la fracción soluble usualmente se atribuye a la fracción insoluble, la cual debido al proceso de extrusión sufre una fragmentación y el incremento de FDT se atribuye a la formación de almidón resistente debido al proceso de extrusión, el cual se cuantifica como fibra dietética (Gajula et al., 2008).

Se observa que las galletas elaboradas con salvado de trigo sometido al proceso de extrusión presentan un incremento en el contenido de FDI, FDS y FDT al compararlas con sus respectivos controles. Esto demuestra un efecto del proceso de extrusión sobre el contenido de fibra dietética. Dicho incremento se encuentra para FDI entre 50% y 65%, comparadas con la galleta C0, mientras que al cotejar con el C1 y C2 se presentó un incremento de 10.5% y 11.3%, respectivamente. Para FDS el incremento fue de 16% a 25% al comparar con C0, y de 12.3% y 14.2% al contrastar con C1 y C2 respectivamente. El aumento en FDT comparada con C0 se encontró entre 44% y 49%, mientras que respecto a C1 y C2 incremento 11.4% y 12.5%, respectivamente.

Wang et al. (1993) sometieron salvado de trigo a extrusión reportando que a partir de este proceso la fibra dietética soluble incrementó significativamente en los extrudidos (2.53%), sin embargo ellos encontraron una disminución para el contenido de fibra dietética total así como para la fracción insoluble de la fibra. Kahlon et al., (2006) realizaron un estudio para observar el efecto del proceso de extrusión sobre el contenido de fibra dietética de salvado de trigo y relacionarlo con las propiedades hipocolesterolémicas. Sus resultados muestran que a todos los niveles manejados en su investigación se incrementó el contenido de fibra dietética total e insoluble (FDS 1.06%, FDI 3.04% y FDT 4.0%) comparado con el salvado de trigo no extrudido.

Se conoce que varios tipos de tratamientos térmicos, tales como el cocinado, autoclave, el horneado y tratamientos mecánicos como la molienda fina, además de los tratamientos termomecánicos tales como la extrusión, pueden cambiar las características fisicoquímicas, mejorando así la funcionalidad de los ingredientes fibrosos, entre los que se encuentran el salvado de trigo. Existen pocas bases científicas para explicar lo anterior, entre estas se tiene, que los tratamientos que experimentan la harina de trigo y el salvado ya sean mecánicos, térmicos o termomecánicos llevan a una redistribución de una parte de la fibra dietética insoluble a la fracción de la fibra soluble haciendo que ésta incremente (Vasanthan et al., 2001; Gajula et al., 2008).

Este incremento puede ser debido a la fragmentación u otro tipo de descomposición de la celulosa y lignina (principales componentes de la fibra insoluble), resultado del

proceso al que fue sometido el producto (Gajula et al., 2008). Ralet et al., (1990) reportan que durante el proceso de extrusión se produce solubilización de ciertos componentes de la fibra, siendo los principales componentes solubilizados por la extrusión: xilosa, glucosa y arabinosa; así también encontraron que la relación xilosa:arabinosa en la fibra soluble incrementa después de la extrusión indicando una solubilización preferencial de los arabinoxilanos ligeramente ramificados.

En salvado de trigo se ha encontrado que el tratamiento térmico origina un incremento en el contenido de fibra dietética total, el cual no es debido a una nueva síntesis, sino más bien a la formación de un complejo fibra-proteína que es resistente al calentamiento y por lo tanto se cuantifica como fibra dietética (Caprez et al., 1986, Dhingra et al., 2011). También se sugiere la formación adicional de fibra dietética a partir de componentes como el almidón, siendo este el llamado almidón resistente debido al proceso de extrusión (Vasanthan et al., 2001; Gajula et al., 2008).

Cambios similares en el perfil de fibra dietética de varios productos extrudidos han sido reportados. El contenido de FDS incrementa debido al proceso de extrusión en harina de trigo (Wang et al., 1993), salvado de trigo (Ralet et al., 1990; Gualberto et al., 1997; Dhingra et al., 2011), avena (Zhang et al., 2011), cáscaras de papa (Camire et al., 1997), guisantes (Chopra et al., 2009).

Estimación del Índice Glucémico en las Galletas

En los resultados referentes a la estimación del índice glucémico de las galletas, estos se presentan en la Tabla 8. Se observa que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre ellas, primeramente la galleta C0 (100% harina blanca) presenta

Tabla 8. Estimación del Índice Glucémico (IGe) de las Galletas.¹

Galleta	IGe (%)
C0 ²	80.16 ^a
C1 ³	72.63 ^e
C2 ⁴	74.96 ^d
Galleta 5 (SGE)	75.38 ^c
Galleta 11 (SGE)	68.54 ^f
Galleta 14 (SFE)	76.25 ^b

¹Los valores son promedio de tres determinaciones. Dentro de una columna, valores con diferente letra son significativamente diferentes ($p < 0.05$).

²Galleta 100% harina blanca, ³Galleta sin extrudir fracción gruesa, ⁴Galleta sin extrudir fracción fina
Abreviaturas IGe (Índice glucémico estimado), SGE (Salvado de trigo extrudido fracción gruesa), SFE (Salvado de trigo extrudido fracción fina).

el mayor valor de índice glucémico con 80.16%, lo cual es de esperarse al estar elaborada solamente con harina de trigo blanca, así esta galleta tiene mayor cantidad de almidón, lo cual también concuerda con lo reportado en la literatura (Sánchez-Pardo et al., 2007; Osorio-Díaz et al., 2008).

La digestibilidad de los carbohidratos principalmente del almidón es altamente influenciada por el tipo de éste y depende de las características fisicoquímicas del almidón como lo son el estado físico, la naturaleza de la forma cristalina en el gránulo de almidón y la relación amilosa-amilopectina, así como también del procesamiento al que se somete el mismo, principalmente si este conduce a la retrogradación (Sandhu y Lim, 2008, Englyst et al., 1992).

Además, la digestión de los carbohidratos cambia con la presencia de otros componentes del alimento, por ejemplo los lípidos pueden formar un complejo con el almidón disminuyendo su digestibilidad (Hoover y Zhou, 2003).

Al comparar las galletas con salvado de trigo sin extrudir fracción gruesa (C1) y la de fracción fina (C2), se observan diferencias significativas ($p < 0.05$) entre ellas. Siendo la galleta C2 la que presenta mayor valor de IG, este resultado indica que el tamaño de partícula tiene un efecto sobre el valor de índice glucémico de las galletas, obteniéndose menor valor (72.63%) en la fracción gruesa de la molienda del salvado de trigo extrudido.

Así se ha reportado que la digestión del almidón puede ser obstruida por los componentes de la fibra dietética como celulosa, hemicelulosa y lignina, que impiden

el acceso de las enzimas digestivas (Hernández-Uribe, 2008; Nishimune et al., 1991).

El tamaño de partícula de la fibra dietética también afecta de manera importante la digestión enzimática del almidón, ya que el contacto entre el sustrato y la enzima decrece a medida que el tamaño de los componentes de la fibra incrementan, así también dificulta el acceso de la enzima debido a un impedimento estérico (Sandhu y Lim, 2008).

En lo que respecta a las galletas elaboradas con salvado de trigo extrudido, se observa que las galletas 5 SGE y la galleta 14 SFE presentaron un valor de estimación del IG de 75.38% y 76.25%, respectivamente; siendo estos valores menores al compararse con el C0, sin embargo, al cotejarse con las galletas con salvado de trigo sin extrudir (C1 y C2) son estas últimas las que presentaron menores valores. Sin embargo, la galleta 11 SGE presenta el menor valor de IG (68.54%) al compararse con el resto de las galletas. Esto pudiera deberse a las condiciones del proceso de extrusión al cual se sometió el salvado de trigo, siendo el perfil 2 de temperatura (60, 80, 100 y 120°C) y 31% de contenido de humedad, así como también a la fracción gruesa de molienda del salvado de trigo.

Estos resultados indican que tanto el proceso de extrusión como el tamaño de partícula del salvado de trigo presentan un efecto significativo sobre el índice glucémico de las galletas, y parecen indicar que entre mayor es la intensidad de la extrusión se disminuye el índice glucémico.

Reducir el IG es de particular interés en los productos a base de cereales, los cuales son de gran consumo. Sus principales ingredientes (azúcar y harina) así como el proceso de horneado pueden influenciar la respuesta glucémica. Sin embargo, el papel tecnológico de estos ingredientes en este grupo de alimentos dificulta el desarrollo de productos con bajo IG (Ackenberg et al., 1998; Angioloni y Collar, 2010).

De acuerdo a la clasificación de los alimentos en base a su índice glucémico, casi todas las galletas excepto la galleta 11 (SGE) pertenecen a los llamados alimentos con alto IG, mientras la galleta 11 SGE queda clasificada dentro de los alimentos con IG medio. En general, los productos de panificación al ser ricos en azúcar y harina pertenecen a la categoría de alimentos con alto índice glucémico (Fardet et al., 2006). Sin embargo, parece ser que debido a las condiciones del proceso de extrusión y tamaño de partícula del salvado de trigo adicionado a la galleta 11 SGE se produjo una disminución de su IG.

Se ha demostrado en trabajos previos que es posible disminuir el IG de productos a base de cereales mezclando harina con otros tipos de granos así como agregando fibra y almidón resistente (Baixauli et al., 2008; Fuentes-Zaragoza et al., 2010; Matos y Rosell, 2011). Esto último pudiera ser la causa de la reducción del IG de la galleta 11 SGE, la inclusión del salvado de trigo extrudido fracción gruesa y la formación de almidón resistente debido al proceso de extrusión.

Bello-Pérez et al., (2006) elaboraron tortillas de maíz con masa preparadas con diferentes métodos (masa elaborada en el laboratorio, masa comercial y harina de

maíz nixtamalizada, así como masa con hidrocoloides), manejando tres tiempos de almacenamiento diferentes (24, 48 y 72 h). Ellos analizaron el contenido de almidón resistente y realizaron la predicción del IG de las tortillas, reportando un incremento en el almidón resistente debido al tiempo de almacenamiento, un patrón que se relaciona con el fenómeno de retrogradación del almidón, en lo que se refiere a la predicción del índice glucémico de las tortillas, encontraron que los resultados entre las tortillas variaron dependiendo del método usado para preparar la masa y la tortilla. La tortilla elaborada con masa comercial y la que contenía hidrocoloides presentaron los valores más bajos. Sin embargo, en un estudio realizado en arroz blanco cocinado con hidrocoloides se presentó un incremento del IG del mismo con la adición de hidrocoloides (Chung et al., 2007). Estos resultados pueden deberse a las diferencias en el origen botánico del almidón, características fisicoquímicas, procesamiento, tratamiento posterior, uso de los hidrocoloides, así como diferencias en el método de predicción del IG.

Ferrer-Mairal et al., (2011), mediante análisis *in vitro* e *in vivo* realizaron la estimación del IG de panes y muffins, a éste último le realizó una sustitución del porcentaje de harina de trigo por una mezcla de almidón resistente, dextrina y harina de lenteja, en cambio en los panes la sustitución parcial de la harina de trigo fue por almidón resistente y dextrinas. Se encontró una disminución tanto *in vitro* como *in vivo* del IG en los panes y muffins elaborados con la mezcla de sustitución de la harina de trigo correspondiente. Cabe mencionar que todos los resultados *in vitro* del IG fueron valores más elevados.

Juárez-García et al., (2006) utilizaron harina de plátano para disminuir el índice glucémico de panes, logrando con esto un pan con un IG estimado de 64.3 comparado con un pan control (78.8), así también incrementaron la cantidad de almidón resistente en los panes.

CONCLUSIONES

1. Las distintas condiciones del proceso de extrusión utilizadas presentaron un efecto significativo sobre las características fisicoquímicas del salvado de trigo. Se presenta un incremento del IAA y una disminución del valor de luminosidad (L) en los extrudidos de salvado de trigo al procesarse bajo los mayores perfiles de temperatura y con mayor contenido de humedad.
La expansión de los extrudidos de salvado de trigo incrementa con los perfiles de temperatura más elevados y con el menor contenido de humedad durante el proceso de extrusión.
2. En las galletas elaboradas con salvado de trigo extrudido fracción gruesa y fina los factores perfil de temperatura, contenido de humedad y fracción de molienda presentan un efecto significativo sobre el diámetro, valor de L y fuerza máxima de ruptura.
3. Las galletas elaboradas con salvado de trigo extrudido fracción gruesa y mayor contenido de humedad presentan los mejores valores de diámetro y menor fuerza de ruptura.
4. El contenido de FDI, FDS y FDT de las galletas se ve incrementado en las galletas elaboradas con salvado de trigo extrudido, demostrando que bajo las condiciones de esta investigación se puede mejorar el contenido de fibra dietética en las galletas y obtener mayores beneficios para la salud de los consumidores.
5. El índice glucémico estimado (IGe) de las galletas se disminuyó debido a la inclusión del salvado de trigo extrudido bajo el perfil 2 de temperatura y 31%

de humedad fracción gruesa, siendo así la galleta 11 SGE la de menor valor de IGe, estas condiciones permitieron reducir el valor de IGe y obtener así una galleta que permita un mejor control glucémico e insulinémico en los consumidores.

RECOMENDACIONES

1. Realizar modificaciones en la formulación para elaborar galletas utilizada en esta investigación con el objetivo de reducir la cantidad de azúcar utilizada y agregar otro tipo fuente de fibra dietética. Todo esto buscando una mayor disminución del valor del índice glucémico estimado de las galletas así como su aceptación por parte de los consumidores.
2. Realizar análisis reológicos a las masas elaboradas con salvado de trigo extrudido fracción gruesa y fina, así como también a las masas con salvado de trigo sin extrudir con el objetivo de conocer las propiedades viscoelásticas de las masas.

REFERENCIAS

- AACC. (2001). *Approved methods of the AACC*. (9th ed.) American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN. EUA.
- Ackerberg, A., Liljeberg, H. y Björck, I. (1998). Effects of amylose/amylopectin ratio and baking conditions on resistant starch formation and glycaemic indices. *J. Cereal Sci.* 28(1):71-80.
- Aldoori, W.H., Giovannuci, E.L., Rocket, H.R., Sampson, L., Rimm, E.B. y Willet, W.C. (1998). A prospective study of dietary fiber types and symptomatic diverticular disease in men. *J. Nutr.* 128:714-719.
- Altan, A., McCarthy, K.L. y Maskan, M. (2007). Evaluation of snack foods from barley-tomato pomace blends by extrusion processing. *J. of Food Engineering.* 84:231-242.
- Alvarez-Martínez, L., kondury, K.P. y Harper, J.M. (1988). A general model for expansión of extruded products. *J. of Food Sci.* 53:609-615.
- Ananthan, N. K., Avtar, S.S. y Milford, A. H. (1996). Physical and molecular properties of re-extruded starches as affected by extruder screw configuration. *J. of Food. Sci.* 91(8):596-600.
- Anderson, N. E. y Clydesdale, F. M. (1980). Analysis of the dietary fiber content of a standard wheat bran. *J. of Food Sci.* 45:336.
- Anderson, R.A., Conway, H.F., Pfeife, F.F. y Griffin, J.E.L. (1969). Gelatinization of corn grits by roll-and extrusion-cooking. *Cereal Sci. Today* 14:4-7, 11-12.

- Angioloni, A. y Collar, C. (2010). Physicochemical and nutritional properties of reduced-caloric density high-fibre breads. *LWT-Food Sci. Technol.* 44(3):747-758.
- Annison, G. y Topping, D.L. (1994). The role of resistant starch: chemical structure vs physiological function. *Annual review of nutrition.* 14:297-320.
- Antoine, C., Peyron, S., Mabilhe, F., Lapiere, C., Bouchet, B., Abecassis, J.L. y Rouau, X. (2003). Individual contribution of grain outer layers and their cell wall structure to the mechanical properties of wheat bran. *J. Agric. Food Chem.* 51:2026-2033.
- Anton, A.A., Fulcher, R.G. y Arntfield, S.D. (2009). Physical and nutritional impact of fortification of corn starch-based extruded snacks with common bean (*Phaseolus vulgaris*, L.) flour: Effects of bean addition and extrusion cooking. *Food chem.* 113:989-996.
- Anwarul, H., Shams-Ud, D., y Anwarul, H. (2002). The effect of aqueous extracted wheat bran on the baking quality of biscuit. *Int. J. of Food Sci. and Technol.* 37:453-462.
- AOAC. (1997). *Official Methods of Analysis of AOAC.* (16th ed.) Vol. I, Sec. 12.1.07, Method 960.52.
- Arias-García, R.M.E., Chávez, A.E., Nájera, R.N., Morales, de L. J., Pedroza, I.R., Salazar, Z.A. y Durán, de B.C. (2007). *Condiciones de Operación de Extrusores de Tornillo Simple para Mezclas de Harina de Trigo. Parte I: Pruebas de Laboratorio.* Tecnol. Ciencia Ed. (IMIQ). 22(2):53-66.
- Art, W.E, Warren, C.C., mohring, A.E. y Villota, R. (1990). Incorporation of corn fiber into sugar snap cookies. *Cereal Chem.* 67(3):303-305.
- Asp, N.G., Björck, I. y Nyman, M. in *Nahrungsfasern Dietary fibres.* (1986). Eds. Amado, R. y Schweizer, T. Academic Press, London. Pp: 177-179.

- Athayde, U.A.M., Correia, J.M., Arraes, M.G., Ribeiro, M. T. y Machado, S. H. (2009). Formulation and Physicochemical and Sensorial Evaluation of Biscuit-Type Cookies Supplemented with Fruit Powders. *Plant Foods Hum Nutr.* 64:153-159.
- Ayadi, F.Y., Muthukumarappan, K., Rosentrater, K. y Brown, M.L. (2011). Twin-screw extrusion processing of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) feeds using various levels of corn-based distillers dried grains with solubles (DDGS). *Cereal Chem.* 88(4):363-374.
- Badui, S. D. (1993). *Química de los Alimentos.* (3 ed). México: Ed. Pearson.
- Baixaui, R., Salvador, A., Martínez-Cervera, S. y Fiszman, S.M. (2008). Distinctive sensory features introduced by resistant starch in baked products. *LWT-Food Sci. Technol.* 41(10):1927-1933.
- Baker, D., Norris, K. H. y Li, B. W. (1979). *Food Fiber Analysis: Advances in Methodology: Dietary Fibers: Chemistry and Nutrition.* G. E. Inglett, Ed. Academic Press, Inc. London, England.
- Bello-Pérez, L.A., Rendón-Villalobos, J.R., Agama-Acevedo, E. e Islas-Hernández, J.J. (2006). In vitro starch digestibility of tortillas elaborated by different masa preparation procedures. *Cereal Chem.* 83(2):188-193.
- Björck, I.M., Granfeldt, Y., Liljeberg, H., Tovar, J. y Asp, N.G. (1994). Food properties affecting the digestion and absorption of carbohydrates. *American J. of Clin. Nutr.* 59:699S-705S.
- Björck, I. (1996). *Starch: Nutritional Aspects.* Cap 11. In: Carbohydrates in Food. Charlotte-Eliasson, A. Ed. University of Lund, Sweden. Marcel Dekker, Inc., New York.

- Camire, M.E., Violette, D., Dougherty, M.P. y McLaughlin, M.A. (1997). Potato peel dietary fiber composition: effects of peeling and extrusion cooking processes. *J. Agric. Food Chem.* 45(4):1404-1408.
- Caprez, A., Arrigoni, E., Amado, R. y Neukom, H.J. (1986). Influence of different type of thermal treatment on the chemical composition and physical properties of wheat bran. *J. of Cereal Sci.* 4:233-239.
- Carrasco-Valencia, R.R., Acevedo, D.A., Icochea, A.J.C. y Kaillo, H. (2009). Chemical and functional characterization of kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*) grain, extrudate and bran. *Plant Foods Hum. Nutr.* 64:94-101.
- Chevallier, S., Colonna, P.A., Della Valle, G. y Lourdin, D. (2000). Contribution of major ingredients during baking of biscuits dough systems. *J. of Cereal Science.* 3:241-252.
- Chevallier, S., Della Valle, G., Colonna, P., Broyant, B. y Trystram, G. (2002). Structural and chemical modifications of short dough during baking. *J. Food Sci.* 35:1-10.
- Chibbar, R.N., Ambigaipalan, P. y Hoover, R. (2010). Molecular diversity in pulse seed and complex carbohydrates and its role in human nutrition and health. *Cereal Chem.* 87(4):342-352.
- Chopra, H., Udipi, S.A. y Ghugre, P. (2009). Dietary fibre content of selected legumes: varietal differences and effect of processing. *J. Food Sci. Technol.* 46(3):266-269.
- Chung, H.J., Liu, Q. y Lim, S.T. (2007). Texture and in vitro digestibility of white rice cooked with hydrocolloids. *Cereal Chem.* 84(3): 246-249.
- Chung, H.J., Shin, D.H. y Lim, S.T. (2008). In vitro starch digestibility and estimated glycemic index of chemically modified corn starches. *Food Research Int.* 41: 579-585.

- Chung, Y.S., Han, H.S., Lee, W.S. y Rhee, C. (2010). Physicochemical and bread-making properties of air flow pulverized wheat and corn flours. *Food Sci. Biotechnol.* 19(6): 1529-1535.
- Collins, H.M., Burton, R.A., Topping, D.L., Liao, M.L., Bacic, A. y Fincher, G.B. (2010). Variability in fine structures of noncellulosic cell wall polysaccharides from cereal grain: potential importance in human health and nutrition. *Cereal Chem.* 87(4):272-282.
- Córdova, S. A. (2005). *Caracterización Relacionada con la Textura de Suspensiones de Fibras Alimentarias.* (Tesis inédita de Doctorado). Departamento de Tecnología de Alimentos. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- Cummings, J.H. y Stephen, A.M. (2007). Carbohydrate terminology and classification. *Eur J. Clin. Nutr.* 61:S5-S18.
- De Vries, J. W. (1996). Total dietary fiber in the 90's. Analytical progress. *Medallion Laboratories.* 14:1.
- Dhingra, D., Michael, M., Rajput, H. y Patil, R.T. (2011). Dietary fibre in foods: a review. *J. of Food Sci. Technol.* 49(3):255-266.
- Dreher, M. (1999). *Food sources and uses of dietary fiber.* In: *Complex carbohydrates in foods.* Ed. Cho, S.S., Prosky, L., y Dreher, M., Marcel Dekker, Inc. Basel. pp. 327-366.
- Englyst, H.N, Kingman, S.M. y Cummings, J.H. (1992). Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. *Eur. J. Clin. Nutr.* 46(2):S33-S50.
- Englyst, K.N., Liu, S. y Englyst, H.N. (2007). Nutritional characterization and measurement of dietary carbohydrates. *Eur J. clin. Nutr.* 61:S19-S39.

- Escudero, E. y González, P. (2006). La fibra dietética. *Nutr. Hosp.* 21:61-72.
- Falcón, V. M., Romero, B. A., Yáñez, F. G., Núñez, O. V. y Barrón-Hoyos, J. (2007). Contenido de β -glucanos en cereales comerciales para desayuno altos en fibra. *BIOtecnia*. 9:35-41.
- Fardet, A., Leenhardt, F., Lioger, D., Scalbert, A. y Remesy, C. (2006). Parameters controlling the glyceamic response to breads. *Nutr. Res. Rev.* 19(1):18-25.
- FAO/WHO. (1998). *Carbohydrates in Human Nutrition*. Food and Nutrition Paper 66. FAO: Rome.
- Ferrer-Mairal, A., Peñalva-Lapuente, C., Iglesia, I., Urtasun, L., De Miguel-Etayo, P., Remón, S., Cortés, E. y Moreno, L.A. (2011). In vitro and in vivo assessment of the glycemic index of bakery products: Influence of the reformulation of ingredients. *Eur. J. Nutr.* Recuperado de <http://www.springerlink.com/content/jv5056p0984241w2/fulltext.pdf>
- Frei, M., Siddhuraju, P. y Becker, K. (2003). Studies on the in vitro starch digestibility and glycemic index of six different indigenous rice cultivars from the Philippines. *Food Chemistry*. 83:395-402.
- Fuentes-Zaragoza, E., Riquelme-Navarrete, M.J., Sánchez-Zapata, E. y Perez-Alvarez, J.A. (2010). Resistant starch as functional ingredient: a review. *Food Res. Int.* 43(4):931-942.
- Fuhr, R. (1962). Cookie Spread: its effects on production and quality. *Bakers Digest*. 36:56-62.
- Gaines, C.S. y Donelson, J.R. (1985). Influence of certain flour quality parameters and postmilling treatments of size of angel food and high-ratio white. *Cereal Chem.* 62:60-63.

- Galicia, G.T. (2005). *Producción y Evaluación de la Calidad de Harinas Nixtamalizadas Obtenidas de Maíz de Calidad Proteica, Utilizando el Proceso de Extrusión y Técnicas de Optimización*. (Tesis inédita de Maestría). Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos. Universidad de Sonora.
- Gajula, H., Alavi, S., Adhikari, K. y Herald, T. (2008). Precooked bran-enriched wheat flour using extrusion: dietary fiber profile and sensory characteristics. *J. of Food Sci.* 73:s173-s179.
- Goñi, I., García-Alonso, A. y Saura-Calixto, F. (1997). A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index. *Nutrition Research.* 17: 427-437.
- Gualberto, D.G., Bergman, C.J., Kazemzadeh, M. y Weber, C.W. (1997). Effect of extrusion processing on the soluble and insoluble fiber, and phytic acid contents of cereal bran. *Plant Foods for Hum. Nutr.* 51: 187-198.
- Gujral, H.S., Mehta, S., Samra, I.S. y Goyal, P. (2003). Effect of wheat bran, coarse wheat flour, and rice flour on the instrumental texture of cookies. *Int. J. of Food Properties.* 6(2):329-340.
- Gupta, M., Bawa, A.S. y Semwall, A.D. (2008). Effect of barley flour on development of rice-based extruded snack. *Cereal Chem.* 85(2): 115-122.
- Gutierrez, M.J., Souza, E.J. y Sneller, C. (2011). Laboratory milling method for whole grain soft wheat flour evaluation. *Cereal Chem.* 88(1):1-5
- Gutkoski, L.C. y El-Dash, A.A. (2000). Effect of extrusion process variables on physical and chemical properties of extruded oat products. *Plant Foods for Hum. Nutr.* 54: 315-125.
- Han, L., Huff, H.E. y Hsieh, F. (2008). Productions of oat cakes from extruded pellets. *Cereal Chem.* 85(4):522-529.

- Harper, J.M. (1981). *Extrusion of Foods*. Vol. I. CRC Press. Boca Raton, FL.
- Hernández-Uribe, J.P. (2008). *Tortilla de maíz pigmentado: digestibilidad del almidón, aspectos fisicoquímicos y moleculares*. (Tesis inédita de Doctorado). Centro de desarrollo de productos bióticos. Instituto Politécnico Nacional. Yautepec, Morelos, México.
- Holm, J., Asp, N.G., Sjöberg, L.B. y Lundquist, I. (1985). Starch availability in vitro and in vivo after flaking, steam-cooking and popping of wheat. *J. of Cereal Sci.* 3:193-206.
- Holm, J., Björck, I., Drews, A. y Asp, N.G. (1986). A rapid method for the analysis of starch. *Starch/Starke*. 38:224-226.
- Hoover, R. y Zhou, Y. (2003). In vitro and in vivo hydrolysis of legume starch α -amylase and resistant starch formation in legumes - A review. *Carbohydr. Polym.* 54:401-417.
- Hoseney, R. C. (1991). *Principios de Ciencia y Tecnología de los Cereales*. Editorial ACRIBIA, S. A. Zaragoza, España.
- Huerta, H. J. (2007). *Relación del diámetro de la galleta con las características físicas, químicas y reológicas de las harinas de trigo suave, fuerte y una mezcla de ambas*. (Tesis inédita de Maestría). Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos. Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora, México.
- Izydorczyk, K. y Dexter, J.D. (2008). Barley glucans and arabinoxylans: molecular structure, physicochemical properties, and uses in food products—a review. *Food Res. Int.* 41:850–868.
- Jeltema, M. A., Zabik, M. E. y Thiel, L. J. (1983). Prediction of cookie quality from dietary fiber components. *Cereal Chem.* 60:227-230.

- Jenkins, D.J.A., Wolever, T.M.S. y Taylor, R.H. (1981). Glycemic index of foods: Aphysiological basis for carbohydrate exchange. *American J. clin. Nutr.* 34:362-366.
- Jenkins, D.J.A., Leeds, A.R., Grasull, A.M., Cochet, B. y Albert, K.G.M. (1997). Decrease in post prandial insulin and glucose concentration by guar and pectin. *Annals of Internal Medicine.* 86:20-23.
- Juárez-García, E., agama-Acevedo, E., Sáyago-Ayerdi, S.G., Rodríguez-Ambriz, S.I. y Bello-Pérez, L.A. (2006). Composition, digestibility and application in breadmaking of banana flour. *Plant Foods for Hum. Nutr.* 61:131-137.
- Kahlon, T. S., Edwards, R. H. y Chow, F. I. (1998). Effect of extrusion on hypocholesterolemic properties of rice, oat, corn, and wheat bran diets in hamsters. *Cereal Chem.* 75:897-903.
- Kahlon, T.S., Berrios, J.de J., Smith, G.E. y Pan, J.L. (2006). Extrusion conditions modify hypocholesterolemic properties of wheat bran fed to hamsters. *Cereal Chem.* 83(2): 152-156.
- Klopfenstein, C. F. (1988). The role of cereal B-glucans in nutrition and health. *Cereal Food World.* 33:883-886.
- Larrea, M.A., Martínez-Bustos, F. y Chang, K.Y. (2010). The effect of extruded orange pulp on enzymatic hydrolysis of starch and glucose retardation index. *Food Bioprocess Technol.* 3:684-692.
- Le Leu, R. K. L., Hu, Y., Brown, I., y Young, G.P. (2009). Effect of high amylose maize starches on colonic fermentation and apoptotic response to DNA-damage in the colon of rats. *Nutr. Metab.* 6:11.
- Lee, S., Inglett G.E. y Carriere, C.J. (2004). Effect of Nutrim oat bran and flaxseed on rheological properties of cakes. *Cereal Chem.* 81:637-642.

- Lehmann, U. y Robin, F. (2007). Slowly digestible starch – Its structure and health implications: A review. *Trends in Food Science and Technology*. 18:346-355.
- Li, J.H., Vasanthan, T., Hoover, R., y Roosnagel, B.G. (2004). Starch from hull-less barley: V. In vitro susceptibility of waxy, normal, and high-amylose starches towards hydrolysis by alpha-amylases and amyloglucosidase. *Food Chem.* 84:621-632.
- Lineback, D. (1999). *The Chemistry of complex carbohydrates. In: Complex carbohydrates in foods*. Ed. Cho, S.S., Prosky, L., y Dreher, M., Marcel Dekker, Inc. Basel. pp. 115-129.
- Magaletta, R.L., DiCataldo, S.N., Liu, D., Li, H.L., Borwankar, R. y Martini, M.C. (2010). In vitro Method Predicting Glycemic Index of Foods Using Simulated Digestion and an Artificial Neural Network. *Cereal Chem.* 87(4):363-369.
- Manley, D. (1983). *Tecnología de la Industria Galletera: Galletas, Crackers y Otros Horneados*. Zaragoza, España: Ed. Acribia.
- Mataix, V. J. (2010). *Tratado de Nutrición y Alimentación. Vol. II Situaciones Fisiológicas y Patológicas*. (2 ed.) Madrid, España: Ed. Editorial OCEANO/ergon.
- Matos, S. M.E. y Rosell, M. C. (2011). Chemical composition and starch digestibility of different gluten-free breads. *Plant Foods Hum. Nutr.* 66:224-230.
- Meister, K. (1996). *Dietary fiber*. A special report by the American council on science and health. December 1996.
- Mercier, C., Linko, P. y Harper, J.M. (1989). *Extrusion Cooking*. American Association of Cereal Chemists, INC. St. Paul, Minnesota, USA.

- Meshcheriakova, V.A., plotnikova, O.A., latsyshina, T.A., Sharafetdinov, K.H. y Lisina, T.N. (1995). New extrusion products in diet therapy of diseases of internal organs. *Vopr Pitan.* 5:31-33.
- Minor, G. K. (1966). Functional characteristics of cookie flour. *Baker Digest* .40:70-76.
- Nishimune, R., Yakushiji, T., Taguchi, S., Konishi, Y., Nakahara, S., Ichikawa, T. y Kunita, N. (1991). Glycemic response and fiber content of some foods. *American J. of Clinical Nutr.* 54:414-419.
- Noort, M.J.W., Van Haaster, D., Hemery, Y., Schols, H.A. y Hamer, R.J. (2010). The effect of particle size of wheat bran fractions on bread quality- Evidence for fibre- protein interactions. *J. of Cereal Sci.* 52:59-64.
- Osorio-Díaz, P., Agama-Acevedo, E., Mendoza-Vinalay, M., Tovar, J. y Bello-Pérez, L.A. (2008). Pasta added with chickpea flour: Chemical composition, in vitro digestibility and predicted glycemic index. *Cienc. Tecnol. Aliment.* 6(1):6-12.
- Park, J.T. y Rollings, J. E. (1994). Effects of substrate branching characteristics on kinetics of enzymatic depolymerization of mixed linear and branched polysaccharides. I. Amylose/amolipectin α -amylolysis. *Biotechnol. Bioeng.* 44:792-800.
- Pedersen, I., Kaack, K., Bergsoe, N. y Adler-Nissen, J. (2004). Rheological properties of biscuit dough from different cultivars and relationship to baking characteristics. *J. of Cereal Sci.* 39:37-46.
- Pomeranz, Y. (1988). *Wheat: Chemistry and Technology*. American Association of Cereal Chemists. Inc. St Paul Minnesota. USA.
- Quaglia, G. (1991). *Ciencia y Tecnología de la Panificación*. (2 ed.). Zaragoza, España: Ed. Acribia.

- Queenan, K. L., Stewart, M.L., Smith, K. N., Thomas, W., Fulcher, G. R, y Slavin, J. L. (2007). Concentrated oat β -glucan, a fermentable fiber, lowers serum cholesterol in hypercholesterolemic adults in a randomized controlled trial. *Nutritional J.* 6:6.
- Ralet, M.C., Thibault, J.F. y Del valle, G. (1990). Influence of extrusión-cooking on the physical-chemical properties of wheat bran. *J. of Cereal Sci.* 11:249-259.
- Rayas, D. P. y Romero B. L. (2008). Fibra a Base de Frutas, Vegetales y Cereales: Función de Salud. *Revista Mexicana de Agronegocios.* 23:613-621.
- Rebello, C. A. y Schaich, K. M. (1999). Extrusion chemistry of wheat flour proteins: II. sulfhydryl-disulfide content and protein structural changes. *Cereal Chem.* 76(5):756–763.
- Rendón-Villalobos, J.R., Bello-Pérez, L.A., Osorio-Díaz, P., Tovar, J. y Paredes-López, O. (2002). Effect of storage time on in vitro digestibility and resistant starch content of nixtamal, masa and tortilla. *Cereal Chem.* 79:340-344.
- Richardson, P. (2001). *Thermal Technologies in Food Processing.* CRC Press. Woodhead Publishing Limited Cambridge England.
- Rizkalla, S.W., Bellisle, F. y Slama, G. (2002). Health benefits of low glycaemic index foods, such as pulses, in diabetic patients and healthy individuals. *Brit. J. Nutr.* 88:S255-S262.
- Robert, P., Jamme, F., Barron, C., Bouchet, B., Saulnier, L., Dumas, P. y Guillon, F. (2011). Change in wall composition of transfer and aleurone cells during wheat grain development. *Planta.* 233:393-406.
- Rosell, C.M., Santos, E. y Collar, C. (2006). Mixing properties of fibre-enriched wheat bread doughs: A Response Surface Methodology Study. *Eur Food Res Technol.* 223: 333–340.

- Ruiz-Bernal, J.A. (2008). *Obtención y Caracterización Física y Química de un Producto a Base de Salvado de Trigo por el Proceso de Extrusión*. (Tesis inédita de Licenciatura). Departamento de Ciencias Químico Biológicas. Hermosillo, Sonora, México.
- Sajilata, M.C., Singhal, R.S. y Kulkarni, P.R. (2006). Resistant starch- A review. *Comprehensives Reviews in Food Safety*. 5:1-17.
- Sánchez-Pardo, M.E., Ortiz-Moreno, A., Mora-Escobedo, R. y Necochea-Mondragón, H. (2007). In vitro starch digestibility and predicted glycemic index of microwaved and conventionally baked pound cake. *Plant Foods Hum. Nutr.* 62(3):99-105.
- Sandhu, K.S. y Lim, S.T. (2008). Digestibility of legumes starches as influenced by their physical and structural properties. *Carbohydr. Polym.* 71:245-252.
- SAS Institute Inc. (2001). JMP: A Business Unit of SAS Versión 5.0.1 by Statistical Analysis system, Institute Inc. Cary. NC. USA.
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SCFI). (1983). Dirección General de Normas. Norma NMX-F-006-1983.
- Seguchi, M., Tabara, A., Fukawa, I., Ono, H., Kumashiro, C., Yoshino, Y., Kusunose, C., Yamane, G. (2007). Effects of size of cellulose granules on dough rheology, microscopy, and breadmaking properties. *J. Food Sci.* 72 (2) E79-E84.
- Serna-Saldívar, R. O. (1996). *Química, Almacenamiento e Industrialización de los Cereales*. AGT Editor, S. A. México, D. F.
- Slavin, J. (2010). Whole grains and digestive health. *Cereal Chem.* 87(4):292-296.
- Sloan, A.E. (2006). Top 10 functional foods. *Food Technol.* 4, 23-40.

- Stanyon, P. y Costello, C. (1990). Effects of wheat bran and polydextrose on the sensory characteristics of biscuits. *Cereal Chem.* 67:545-547.
- Sudha, M. L., Vetrmani, R. y Leelavathi K. (2005). Influence of fibre from different cereals on the rheological characteristics of wheat flour dough and on biscuit quality. *Food. Chem.* 2007:1365-1370.
- Swennen, K., Courtin, C.M., Lindemans, G.C.J. y Delcour, J.A. (2006). Large-scale production and characterisation of wheat bran arabinoxylooligosaccharides. *J. Sci. Food. Agric.* 86:1722-1731.
- Themeier, H., Hollmann, J., Neese, U. y Lindhauer, M.G. (2005). Structural and morphological factors influencing the quantification of resistant starch II in starches of different botanical origin. *Carbohydr. Polym.* 61:72-79.
- Topping, D.L. y Clifton, P.M. (2001). Short chain fatty acids and human colonic function: roles of resistant starch and non-starch polysaccharides. *Physiol. Rev.* 81:1032-1054.
- Tovar, J., Björck, I.M. y Asp, N.G. (1990). Analytical and nutritional implications of limited enzymatic availability of starch in cooked red kidney beans. *J. of Agric. and Food Chem.* 38:488-493.
- Trowell, H. (1972). Dietary fiber and coronary heart disease. *Eur. Stud. Clin. Biol.* 17:345-349.
- Trowell, H. (1976). Definition of dietary fiber and hypotheses that it is a protective factor in certain diseases. *American J. Clin. Nutr.* 29:417-427.
- Tungland, B. C. y Meyer, D. (2002). Nondigestible oligo and polysaccharides (dietary fibre): their physiology and role in human health and food. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 1:73-92.

- Uthayakumaran, S., Lukow, O.M., Jordan, M.C. y Cloutier, S. (2003). Development of genetically modified wheat to assess its dough functional properties. *Molecular Breeding*. 11:249-258.
- Van Craeyveld, V., Dornez, E., Holopainen, U., Selinheimo, E., Poutanen, K., Delcour, J.A. y Courtin, C. (2010). Wheat bran AX properties and choice of xylanase affect enzymic production of wheat bran-derived arabinoxylan-oligosaccharides. *Cereal Chem.* 87(4): 283-291.
- Vasanthan, T., Gaosong, J., Yeung, J. y Li J. (2001). Dietary fiber profile of barley flour as affected by extrusion cooking. *Food Chem.* 77:35-40.
- Vernaza, G., Matsuura, F.C.A., Chang, Y.K. y Steel, C.J. (2009). Effect of some extrusion variables on residual quantity of cyanogenic compounds in an organic breakfast cereal containing passion fruit fiber. *Cereal Chem.* 86(3):302-306.
- Vratanina, D. L. y Zabik, M. E. (1978). Dietary fiber sources for baked products: bran in sugar-snap cookies. *J. of Food Sci.* 43:1590-1594.
- Wang, W.M., Klopfestein, C.F. y Ponte, J.G. (1993). Effects of twin-screw extrusion on the physical properties of fiber dietary and other components of whole wheat and wheat bran and on the baking quality of the wheat bran. *Cereal Chem.* 70(6):707-711.
- Wang, J., Rosell, C.M., y Barber, C.B. (2002). Effect of the Addition of Different Fibres on Wheat Dough Performance and Bread Quality. *Food Chem.* 79:221-226.
- Wrigley, C.W. (2009). *Wheat: chemistry and technology*. Chapter I Wheat: A Unique Grain for the World. Editors: Khan, K. y Shewry, P.R. Fourth edition. Food Science Australia and Wheat CRC, North Ryde (Sydney), NSW, Australia. Pp: 1-17.

- WHO. (2003). *Diet, nutrition and the prevention of chronic diseases*. World Health Organization Technical Series 916. WHO: Geneva, Switzerland.
- Wong, J.M.W. y Jenkins, D.J.A. (2007). Carbohydrate digestibility and metabolic effects. *J. Nutr.* 137:2539S-2546S.
- Zia-ur, R., Salariya, A.M. y Zafar, S.I. (2001). Effect of processing on available carbohydrate content and starch digestibility of kidney beans (*Phaseolus vulgaris L.*). *Food Chem.* 73:351-355.
- Zhang, D. y Moore W.R. (1997). Effect of wheat bran particle size on dough rheological properties. *J. of Sci Food Agric.* 74:490-496.
- Zhang, G. y Hamaker, B.R. (2009). Slowly digestible starch: concept, mechanism and proposed extended glycemic index. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 49:852-867.
- Zhang, G. y Hamaker, B.R. (2010). Cereal carbohydrates and colon health. *Cereal Chem.* 87(4):331-341.
- Zhang, M., Bai, X. y Zhang, Z. (2011). Extrusion process improves the functionality of soluble dietary fiber in oat bran. *J. of Cereal Sci.* 54(1):98-103.
- Zucco, F., Borsuk, Y. y Arntfield, S.D. (2011). Physical and nutritional evaluation of wheat cookies supplement with pulse flours of different particle sizes. *LWT-Food Sci. and Technol.* 44:2070-2076.