



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**TENDENCIAS EN EL DESARROLLO DE PANIFICACIÓN  
LIBRE DE GLUTEN**

**TRABAJO MONOGRÁFICO DE ACTUALIZACIÓN  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
QUÍMICA DE ALIMENTOS**

**PRESENTA**

**MARÍA TERESA CARMONA TLASECA**



CDMX

2021



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** M. en C. LUCÍA CORNEJO BARRERA

**VOCAL:** M. en C. ARGELIA SÁNCHEZ CHINCHILLAS

**SECRETARIO:** M en C. TANIA GÓMEZ SIERRA

**1er. SUPLENTE:** I. A. JANELI SOLIS GARFIAS

**2° SUPLENTE:** Q. A. JESSICA IVETTE MÁRQUEZ ZETINA

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

Biblioteca del edificio "A" de la Facultad de Química, UNAM.

**ASESOR DEL TEMA:**

---

M. en C. ARGELIA SÁNCHEZ CHINCHILLAS

**SUSTENTANTE:**

---

MARÍA TERESA CARMONA TLASECA

<b>Índice</b>	<b>Página</b>
Abreviaturas	i
Índice de tablas	iii
Índice de figuras	iv
1. Introducción	1
2. Objetivos	3
2.1 Objetivo general	3
2.2 Objetivos particulares	3
3. Desarrollo del tema	4
3.1 Enfermedades y trastornos de la salud asociados con la ingesta de gluten.	4
3.1.1 Enfermedad celiaca (EC)	4
3.1.2 Sensibilidad al gluten no celiaca (SGNC)	6
3.1.3 Alergia al trigo (AT)	7
3.1.4 Otras Enfermedades Relacionadas con la Ingesta de Gluten	8
3.1.4.1 Trastorno del espectro autista (TEA)	8
3.1.4.2 Trastorno de déficit de atención e hiperactividad (TDHA)	8
3.1.4.3 Dermatitis herpetiforme (DH)	9
3.2 Situación actual y perspectivas de crecimiento del mercado LG	10
3.2.1 Norteamérica	14
3.2.2 Europa	15
3.2.3 Latinoamérica	17
3.2.4 Asia Pacífico	17
3.3 Fuentes de harina LG	18
3.3.1 Cereales	19
3.3.1.1 Maíz	19
3.3.1.2 Arroz	20
3.3.1.3 Sorgo	21
3.3.1.4 Teff	24
3.3.1.5 Mijo	27
3.3.2 Pseudocereales	29
3.3.2.1 Amaranto	29
3.3.2.2 Quinoa	30
3.3.2.3 Chía	32
3.3.2.4 Trigo Sarraceno (alforfón)	34
3.3.3 Otras Fuentes	37
3.3.3.1 Leguminosas	37
3.3.3.2 Almidones	39
3.4 Aditivos y coadyuvantes tecnológicos usados en la panificación LG	44
3.4.1 Hidrocoloides	44
3.4.2 Enzimas	53
3.4.2.1 Transglutaminasa	53

3.4.2.2 Glucosa oxidasa	56
3.4.2.3 Ciclodextrina glicosiltransferasa	58
3.4.2.4 $\alpha$ -Amilasas	59
3.4.3 Aislados de proteínas	61
3.4.3.1 Aislados proteínicos de cereales	62
3.4.3.2 Proteína de origen lácteo	64
3.4.3.3 Proteínas de suero	65
3.4.3.4 Caseína	65
3.4.3.5 Proteína de huevo	66
4. Conclusiones	68
5. Bibliografía	69

## **Abreviaturas**

AAE: Anticuerpo antiendomiso

AAF: Association des Amidonniers et Féculiers (Asociación Europea de la Industria del Almidón)

AAG: Anticuerpo antigliadina

AAL: Ácido alfa linolénico

AGPI: Ácidos grasos poliinsaturados

AR: Almidón resistente

AT: Alergia al trigo

AtTG: Antitransglutaminasa tisular

Aw: Actividad acuosa

BU: Brabender Units (Unidades Brabender)

BUSD: Billones de dólares

CGTasa: Ciclodextrina glicosiltransferasa

CMC: Carboximetilcelulosa

Da: Daltones

DH: Dermatitis herpetiforme

EC: Enfermedad celiaca

EO: Europa occidental

FAO: Food and Agriculture Organization (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura)

FDI: Fibra dietética insoluble

FDS: Fibra dietética soluble

FDT: Fibra dietética total

g: gramo

GG: Goma guar

GO: Glucosa oxidasa

GRAS: Generally recognized as safe (Generalmente reconocido como seguro)

GX: Goma xantana

HPMC: Hidroxipropilmetilcelulosa

IDR: Ingesta diaria recomendada  
IgA: Inmunoglobulina A  
IgE: Anticuerpo inmunoglobulina E  
IgG: Inmunoglobulina G  
Kg: Kilogramo  
LG: Libre de gluten  
MANU: Maltogenic amylase novo units (Unidades de amilosa novo maltogénica)  
MC: Metilcelulosa  
mg: miligramo  
mL: Mililitro  
mm: milímetro  
MT: Millones de toneladas  
MUSD: Millones de dólares  
OMS: Organización Mundial de la Salud  
PDCAAS: Protein digestibility corrected amino acid score (Calificación química corregida por digestibilidad proteínica)  
rad: radianes  
s: Segundos  
SGNC: Sensibilidad al gluten no celiaca  
TCAC: Tasa de crecimiento anual compuesta  
TEA: Trastorno del espectro autista  
T<sub>g</sub>: Temperatura de transición vítrea  
TGasa: Transglutaminasa  
TIU: Trypsin inhibitor units (unidades inhibidoras de tripsina)  
TPA: Texture Profile Analysis (Análisis de perfil de textura)  
U: Unidad de enzima  
VB: Valor biológico  
WPC: Whey protein concentrate (Concentrado de proteína de suero)  
µm: micrómetro

<b>Índice de tablas</b>	<b>Página</b>
Tabla 1. Manifestaciones clínicas de la EC	5
Tabla 2. Ventas de Alimentos para usos especiales en el Mundo	10
Tabla 3. Ventas por categoría de productos en Norteamérica	14
Tabla 4. Ventas por categoría de productos en EE.UU.	15
Tabla 5. Ventas por categoría de productos en Europa (Alemania, Reino Unido, Francia y EO)	15
Tabla 6. Ventas de Productos LG en Europa (Alemania, Francia, Reino Unido y EO)	16
Tabla 7. Tendencia de Mercado de Alimentos LG en Europa	16
Tabla 8. Composición proximal de algunos granos LG comparados vs trigo	19
Tabla 9. Macroelementos, aminoácidos y composición de ácidos grasos del grano de teff comparado con maíz, sorgo, trigo y arroz	25
Tabla 10. Contenido de nutrientes inorgánicos del grano de teff comparado con otros cereales	26
Tabla 11. Composición nutrimental de mijo y otros cereales	28
Tabla 12. Comparación de la composición de la harina de trigo sarraceno vs cereales de uso común y pseudocereales	36

<b>Índice de figuras</b>	<b>Página</b>
Figura 1. Publicación de patentes sobre gluten	12
Figura 2. Lanzamiento de nuevos productos y nuevas formulaciones con la alegación “Gluten free”, desde enero 2015 hasta diciembre 2019	13
Figura 3. Lanzamiento de productos LG a nivel mundial, de 2009 a 2019	13
Figura 4. Lanzamiento de nuevos productos de panificación con la alegación “Gluten free”, desde enero 2011 hasta diciembre 2019	17
Figura 5. Reacciones catalizadas por TGasa	54
Figura 6. Reacción de catalización por GO	57
Figura 7. Mecanismo de reacción de CGTasa	59
Figura 8. Reacción de $\alpha$ -amilasa	60
Figura 9. Diferentes fuentes de proteínas LG para el desarrollo de productos LG	62

## 1. Introducción

El término de gluten tiene diferentes aproximaciones dependiendo de la disciplina (bioquímica, tecnología de los alimentos y nutrición). La definición más apropiada para la intolerancia al gluten es la proporcionada por la Comisión Europea en la que "el gluten significa una fracción de proteína de trigo, centeno, cebada, avena o sus variedades híbridas y derivados de los mismos, que algunas personas no toleran y que es insoluble en agua y solución de cloruro sódico 0.5 M" (Diario Oficial de la Federación Europea, 2009).

En las últimas décadas, el gluten ha generado una gran atención debido al creciente número de pacientes diagnosticados con intolerancia a esta fracción proteínica, relativo a la mejora de la sensibilidad de los métodos de detección y la creciente conciencia de la existencia de la enfermedad (Rossell *et al.*, 2014).

La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2012), indica que las intolerancias y alergias alimentarias (la enfermedad celíaca, alergia al trigo, intolerancia al gluten, lactosa y otras sensibilidades alimenticias) afectan del 3 al 4% de la población mundial y, en el caso de los celíacos, entre el 1 y 2% de la población (Carmona, 2013).

Para los individuos con enfermedad celíaca, dermatitis herpetiforme, ataxia de gluten, alergias al trigo y sensibilidad al gluten, el segmento de mercado de los alimentos libres de gluten (LG) es importante para ayudar en su apego de una dieta estricta LG. A pesar del crecimiento del mercado LG, los individuos con enfermedad celíaca aún tienen problemas para encontrar productos de este tipo, debido a los altos precios, variedad y la disponibilidad limitada, así como a las características sensoriales (do Nascimento *et al.*, 2014).

A pesar de los considerables avances logrados en la comprensión y la mejora de los sistemas LG mediante la evaluación de diferentes ingredientes, aditivos y tecnologías durante las últimas dos décadas, el desarrollo de productos LG sigue

siendo un reto tecnológico debido a la función de gluten en productos a base de cereales.

Una gama de formulaciones de pan LG se han desarrollado mediante el uso de harinas de arroz y maíz, que a menudo se combinan con almidones de papa, maíz o tapioca como harinas base, ya que son ingredientes ampliamente disponibles y baratos, de sabor y aroma suaves. Sin embargo, estas harinas y almidones tienen un potencial mínimo de estructura-construcción y, por lo tanto, se utilizan con frecuencia junto con proteínas, hidrocoloides y otros aditivos para mejorar las propiedades físicas, aceptación y vida útil de los panes LG. Estas harinas y almidones LG generalmente no son enriquecidos, y tampoco lo son los productos resultantes en comparación con sus contrapartes a base de trigo.

Por lo tanto, este tipo de productos pueden llevar a deficiencias nutricionales en micronutrientes, proteínas y fibra dietética. Es por ello que mejorar la calidad nutricional de los productos LG es indispensable en la investigación y el desarrollo. Es un desafío concomitante la mejora de las propiedades tecnológicas y sensoriales, ya que no hay materia prima única, ingredientes o aditivos que puedan reemplazar totalmente la funcionalidad del gluten (Capriles *et al.*, 2016).

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

Exponer un panorama general sobre la tendencia del desarrollo de productos de panificación libre de gluten para establecer una necesidad del mercado y desarrollar retos tecnológicos para la industria alimentaria.

### **2.2 Objetivos particulares**

- Describir las principales enfermedades y trastornos a la salud asociados con la ingesta de gluten que representan el mercado base de los productos libres de gluten.
- Analizar el crecimiento del mercado de productos de panificación libres de gluten en los últimos años a nivel mundial como respuesta.
- Especificar las principales fuentes de cereales, aditivos e ingredientes funcionales que se emplean como sustitutos de gluten en productos de panificación para analizar su desempeño con base en sus propiedades funcionales.

### **3. Desarrollo del tema**

#### **3.1 Enfermedades y trastornos de la salud asociados con la ingesta de gluten.**

Actualmente los trastornos relacionados con la ingesta de gluten representan un gran reto para su correcto diagnóstico ya que engloban enfermedades con sintomatología similar que pueden tener diversas complicaciones y consecuencias afectando a la salud.

Los trastornos principales detectados con mayor frecuencia son: Enfermedad Celiaca (EC), sensibilidad al gluten no celiaca (SGNC) y alergia al trigo (AT).

##### **3.1.1 Enfermedad celiaca (EC)**

La enfermedad celiaca (EC), esprue celiaco o enteropatía sensible es una enfermedad que se caracteriza por absorción intestinal deficiente secundaria a la inflamación crónica y atrofia de la mucosa del intestino delgado causada por la exposición al gluten de la dieta, que afecta a individuos genéticamente predispuestos. Existen dos situaciones predominantes para su aparición: la predisposición genética y el contacto con el antígeno (gluten y proteínas relacionadas) (Cobos et al., 2017). La prevalencia de la EC es del 1% de la población. Sin embargo, únicamente están diagnosticados 1 de cada 7-10 del total de los afectados, constituyendo el “iceberg celiaco” donde la punta es representada por el grupo más pequeño (casos diagnosticados) y el resto que es el grupo mayoritario, permanece debajo del agua. La EC es más frecuente en mujeres que en hombres con una proporción de 4 a 1 (Vaquero *et al.*, 2015).

La EC tiene una estrecha relación con otros padecimientos autoinmunitarios como la enfermedad tiroidea autoinmunitaria, síndrome de Sjögren, cirrosis biliar primaria y diabetes mellitus tipo 1, entre otras. Además, esta enfermedad se caracteriza por la producción de autoanticuerpos altamente sensibles y específicos, como los anticuerpos antigliadina (AAG), antiendomiso (AAE) y antitransglutaminasa tisular (AtTG) (Rubio *et al.*, 2013).

Tabla 1. Manifestaciones clínicas de la EC.

Hallazgos comunes o típicos	Hallazgos poco comunes, atípicos o infrecuentes	Afecciones asociadas	Complicaciones
<p>Adultos</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Anemia por deficiencia de hierro</li> <li>- Diarrea</li> </ul> <p>Niños</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Diarrea</li> <li>- Distensión abdominal</li> <li>- Retardo en el crecimiento</li> </ul>	<p>Características generales</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Estatura baja</li> <li>- Pubertad tardía</li> </ul> <p>Características gastrointestinales</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Estomatitis aftosa recurrente</li> <li>- Dolor abdominal recurrente</li> <li>- Esteatorrea</li> </ul> <p>Características extraintestinales</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Anemia por deficiencia de ácido fólico</li> <li>- Osteopenia y osteoporosis</li> <li>- Hipoplasia del esmalte dental</li> <li>- Deficiencia de vitamina K</li> <li>- Hipertransaminasemia                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Trombocitosis</li> <li>- Artralgias</li> <li>- Polineuropatía                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ataxia</li> <li>- Epilepsia</li> <li>- Infertilidad</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>- Abortos recurrentes                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ansiedad y depresión</li> </ul> </li> <li>- Queratosis folicular                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Alopecia</li> </ul> </li> </ul>	<p>Asociaciones establecidas</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dermatitis herpetiforme</li> <li>- Deficiencia de IgG A</li> <li>- Diabetes mellitus tipo 1</li> <li>- Enfermedad tiroidea autoinmunitaria</li> <li>- Síndrome de Sjögren</li> <li>- Colitis microscópica</li> <li>- Artritis reumatoide</li> <li>- Síndrome de Down</li> <li>- Nefropatía por IgA</li> </ul> <p>Asociaciones posibles</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Enfermedad cardiaca congénita</li> <li>- Pericarditis recurrente</li> <li>- Sarcoidosis</li> <li>- Fibrosis quística</li> <li>- Hemosiderosis pulmonar</li> <li>- Enfermedad inflamatoria intestinal                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Hepatitis autoinmune</li> <li>- Cirrosis biliar primaria</li> </ul> </li> <li>- Enfermedad de Addison</li> <li>- Lupus eritematoso sistémico                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Vasculitis</li> <li>- Polimiositis</li> </ul> </li> <li>- Miastenia gravis</li> <li>- Esquizofrenia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- EC resistente</li> <li>- Enteropatía asociada con linfoma de células T</li> <li>- Carcinoma de orofaringe, esófago e intestino delgado</li> <li>- Yeyunoileitis ulcerativa</li> <li>- Esprue colagenoso</li> </ul>

FUENTE (Cobos *et al.*, 2017).

Su espectro clínico es muy amplio, y si bien las manifestaciones gastrointestinales pueden ser las más evidentes, existen manifestaciones extraintestinales que indican la existencia de la EC (Tabla 1). Estos casos con manifestaciones atípicas, potenciales o latentes son los que se encuentran sin diagnosticar.

En su forma típica, afecta a lactantes y preescolares y se hace aparente justo después de la ablactación con la introducción de cereales en la dieta, en la mayoría de los casos a los seis meses. Es común que el niño muestre incapacidad para ganar peso, anemia, anorexia, distensión abdominal y datos de deficiencias vitamínicas debido al síndrome de absorción intestinal deficiente condicionado por la atrofia de las vellosidades intestinales (Sotelo *et al.*, 2013).

Los pacientes en los que se retrasa el diagnóstico tienen retardo en el crecimiento, talla baja, anemia por deficiencia de hierro y en casos extremos raquitismo. Algunas manifestaciones atípicas de esta enfermedad son la hipertransaminasemia, estomatitis aftosa recurrente, artralgias, defectos del esmalte dental y trastornos de la conducta, como depresión y problemas de aprendizaje (Remes, 2008).

En los adolescentes y adultos las manifestaciones suelen ser más atípicas, con síntomas vagos e inespecíficos que parecen no tener relación con problemas del aparato digestivo. Aunque varias enfermedades se han asociado con la EC, la más común es la dermatitis herpetiforme. La mayoría de los pacientes con dermatitis herpetiforme tienen alteraciones histológicas en la mucosa del intestino delgado compatibles con EC, aunque las manifestaciones clínicas son menos evidentes (Cobos *et al.*, 2017).

### **3.1.2 Sensibilidad al gluten no celiaca (SGNC)**

La SGNC es una afección mal definida que agrupa a personas con síntomas similares a los del síndrome de intestino irritable y que carecen de los marcadores serológicos y de la predisposición genética característica de la EC. De acuerdo con el consenso de Oslo, el término SGNC implica síntomas gastrointestinales que son precipitados por la ingesta de gluten en sujetos a los que se les ha excluido el diagnóstico de EC mediante serología e histología. Esta afección, a diferencia de la enfermedad EC, se visualiza como una enfermedad sintomática en la que no existe

ningún riesgo y ninguna complicación; sin embargo, se desconoce cuál es el efecto de la exclusión del gluten de la dieta a largo plazo en estos pacientes. Parece ser más frecuente (6% de la población) que la EC y aunque se desconocen los mecanismos fisiopatológicos, se han descrito alteraciones en la permeabilidad intestinal y producción de interleucinas y otras citosinas que sugieren, a diferencia de lo demostrado en personas con EC, la participación preponderante de la inmunidad innata (Cobos *et al.*, 2017).

La SGNC presenta síntomas intestinales (96% pacientes) y extraintestinales (97%). Los principales síntomas intestinales son dolor abdominal y gases, seguido por la diarrea y el estreñimiento. En cuanto a los síntomas extraintestinales, el más común es la “mente nublada”, descrita como una sensación de letargo y vista borrosa que ocurre después de consumir comidas que contienen gluten, seguido por fatiga, dolor de cabeza, dolor de piernas y brazos, depresión, ansiedad y anemia (Volta *et al.*, 2012).

Hay varias estrategias nutricionales y farmacológicas, diferentes a la dieta LG, que se han estudiado para paliar los síntomas de la EC que pueden ser viables para el tratamiento de la SGNC y permiten proteger frente al consumo accidental de gluten en la dieta. Estas estrategias se pueden clasificar en tres líneas de investigación: la modificación de la fracción tóxica de los cereales, la modulación de la permeabilidad intestinal y la modulación de la respuesta inmune (Reig Otero, 2015).

### **3.1.3 Alergia al trigo (AT)**

La AT es una afección menos frecuente (0.1% de la población mundial) y se caracteriza por una respuesta de hipersensibilidad mediada por el anticuerpo inmunoglobulina E (IgE) que se distingue por la aparición de síntomas gastrointestinales, manifestaciones dermatológicas y sistémicas que, incluso, pudieran ser desencadenadas por otros componentes del trigo diferentes al gluten. Como en todas las alergias, la sensibilización antigénica ocurre desde el nacimiento

y la fisiopatológica radica en reacciones cruzadas entre alérgenos, basófilos y mastocitos mediadas por IgE (Cobos *et al.*, 2017).

La AT constituye una alergia alimentaria o reacciones de hipersensibilidad alimentaria que se produce por un desequilibrio entre una reacción alérgica y los mecanismos de tolerancia. Estas reacciones se originan mediante un mecanismo inmunitario y comprenden las formas mediadas por IgE y las mediadas por inmunocomplejos o respuesta inmunitaria celular (Vaquero *et al.*, 2015).

### **3.1.4 Otras Enfermedades Relacionadas con la Ingesta de Gluten**

#### **3.1.4.1 Trastorno del espectro autista (TEA)**

El TEA, o ASD (por sus siglas en inglés), es un conjunto de trastornos complejos del neurodesarrollo, caracterizado por impedimentos sociales, dificultades en la comunicación, y patrones de conducta estereotípicos, restringidos y repetitivos. Entre ellos se enmarcan el autismo y el síndrome de Asperger. Se calcula que 1 de cada 2000 nacidos o 0,05% sufrirán TEA, siendo cuatro veces más prevalente en varones. El tratamiento ideal combina las terapias e intervenciones conductuales educativas. Millward *et al.*, (2008) ha sugerido que los péptidos del gluten y la caseína pueden tener un papel en los orígenes del autismo y que la fisiología y la psicología del trastorno pueden ser explicadas por la excesiva actividad opioide vinculada a dichos péptidos. Catassi *et al.*, en 2013, trabajaron en esta misma línea, sugiriendo una relación entre la SGNC y los trastornos neuropsiquiátricos, entre ellos el autismo.

#### **3.1.4.2 Trastorno de déficit de atención e hiperactividad (TDHA)**

El TDHA es un trastorno, de origen neurobiológico, de inicio en la infancia que comprende un patrón persistente de conductas de desatención, hiperactividad e impulsividad. Se considera que el trastorno está presente cuando estas conductas tienen mayor frecuencia e intensidad de lo que es habitual según la edad y el desarrollo de la persona, y tales manifestaciones interfieren de forma significativa en el rendimiento escolar o laboral, y en sus actividades cotidianas. A nivel mundial, se estima que entre el 3 y el 7% de los niños en edad escolar pueden estar afectados

(Tremblay *et al.*, 2019). El TDHA tiene tres síntomas nucleares que son: falta de atención, hiperactividad e impulsividad. La forma más eficaz de tratar el TDHA consiste en combinar la terapia conductual y la farmacológica (metilfenidato o atomoxetina), acompañada de una intervención psicopedagógica (TDAH y tú, 2019). Tras varias sospechas en investigación básica y revisiones, se comprobó en un estudio, como una dieta LG durante 6 meses mejoró los síntomas del TDHA. En el estudio de Jackson *et al.*, (2011), se observó cómo la mayoría de los pacientes (74%), prefirió seguir una dieta LG debido a un alivio significativo de su sintomatología.

#### **3.1.4.3 Dermatitis herpetiforme (DH)**

La DH, también conocida como enfermedad de Duhring, es una erupción cutánea extremadamente pruriginosa compuesta de protuberancias y ampollas o vesículas que aparecen usualmente en los codos, las rodillas, la espalda y los glúteos. En la mayoría de los casos, la erupción es del mismo tamaño y forma en ambos lados. La erupción es crónica, lo que significa que continúa durante un período de tiempo prolongado. Se desconoce su causa; sin embargo, la DH a menudo está asociada con la enfermedad celíaca (Federación de Asociaciones de Celiacos de España, 2019). Se presenta con una frecuencia de 10 a 39 por cada 100.000 personas, siendo menos frecuente en niños (Carballido *et al.*, 2013). En más del 90% de los casos, se halla presente una lesión de la mucosa intestinal semejante a la que presentan los pacientes celíacos. Su curso clínico incluye remisiones y reagudizaciones, coincidiendo éstas con la exposición al gluten. Este trastorno se puede tratar con antibiótico. Asimismo, se recomienda una dieta LG con el fin de controlar la enfermedad. Los resultados de Patinen *et al.* (1995) muestran que el suero de IgA-AAG, es adecuado para la vigilancia del tratamiento de una dieta LG en pacientes con DH. En el estudio de Kilander *et al.*, (1985), la morfología intestinal mejoró, y los niveles de anticuerpos antigliadina (IgA e IgG) disminuyeron después de un tratamiento con una dieta LG durante un periodo de 16-36 meses. Ljunghall *et al.*, (1983), ya demostraron anteriormente, que la eliminación del gluten de la dieta de los pacientes con DH tiene una influencia importante en la aparición de anticuerpos tanto para reticulina como para gluten. En 1976, Heading *et al.*, ya

indicaron que el tratamiento con una dieta LG podría resultar beneficioso para la mayoría de los pacientes con DH, no sólo para corregir la anomalía intestinal, sino también para minimizar la dosis de los fármacos necesarios para el control de las lesiones de la piel (San Mauro *et al.*, 2014).

### 3.2 Situación actual y perspectivas de crecimiento del mercado LG

La intolerancia a algún componente de un alimento es cada vez más frecuente a nivel mundial, lo que ha derivado en un aumento sostenido de la demanda de productos “libres de”, convirtiendo a estos productos especiales en una oportunidad de negocio interesante para las empresas procesadoras de alimentos.

Analistas de Mintel indican que el 82% de los consumidores que comen productos LG, no han sido diagnosticados como celíacos o intolerantes. Esta cifra incluye el 44% de los consumidores que aún sin haber sido diagnosticados, llevan una dieta LG por otros motivos (el 25% de los cuales es para perder peso). En este mismo artículo, los analistas indican que muchos consumidores continúan pensando que una dieta LG es más saludable y ayuda a perder peso, aunque no existan evidencias científicas que lo comprueben (Carmona, 2013).

Tabla 2. Ventas de Alimentos para usos especiales en el Mundo (MUSD).

Región geográfica	2012	2013	2014	2015
Mundo	9.972,9	10.943,8	12.034,4	13.402,1
Norteamérica*	3.953,4	4.138,6	4.327,0	4.505,0
Europa Occidental	2.743,5	2.860,4	2.974,4	3.086,0
Latinoamérica	1.569,0	2.060,0	2.658,0	3.537,0
Europa del Este	964,7	1.100,4	1.251,5	1.405,8
Asía Pacífico	365,1	389,1	415,5	445,0
Australasia**	212,9	226,2	239,8	253,6
Medio Oriente y África	164,3	169,1	168,2	169,7

\*Considera EE.UU. Y Canadá. \*\*Australia, Nueva Zelanda y Melanesia.

FUENTE: Carmona, 2013

En el año 2012 las ventas a nivel mundial de productos relacionados con intolerancias alimentarias y productos para diabéticos fueron de 9,973 millones de

dólares (MUSD). Las proyecciones para 2015 indicaban que esta cifra podría llegar a 13,402 MUSD (Tabla 2). Este aumento se explica por el número cada vez mayor de consumidores que deben seguir algún tipo de dieta especial, sumado a aquellos que siguen las tendencias de una dieta más saludable (Carmona, 2013).

El mayor mercado en ventas de este tipo de alimentos dirigidos actualmente es la región de Norteamérica (EE.UU. y Canadá), donde en 2012 se alcanzaron 3,953 MUSD, correspondientes a 40% de las ventas totales en el mundo (Tabla 2). De este valor total, Estados Unidos concentra el 95%, con 3,775 MUSD, y 178 MUSD en Canadá. El segundo lugar en importancia lo ocupa Europa Occidental, con 2.744 MUSD, correspondientes a 28% de las ventas globales. Los tres principales mercados en esta región son: Alemania (32.5%); Reino Unido (7.1%) y Francia (5%). Respecto a los precios de los productos “libres de”, hay que destacar que son más caros que los alimentos convencionales, situación importante para los consumidores que tienen que considerar un gasto extra por no tener otra opción en su dieta (Carmona, 2013).

Según un informe de *marketsandmarkets*, el mercado de los productos LG se estima en 4.63 billones de dólares (BUSD) para 2015 y se prevé una tasa anual de crecimiento compuesto del 10.4% hasta alcanzar los 7.59 BUSD en 2020. La región donde se proyecta un rápido crecimiento es Europa debido a la preocupación de los consumidores por la salud; salud digestiva, control de peso y valores nutricionales entre otras (Marketsandmarkets, 2015).

El mercado está bien desarrollado en Estados Unidos y Europa debido a la significativa conciencia acerca de la necesidad de limitar la ingesta de gluten en la dieta y controlar los riesgos en la aparición de la enfermedad celíaca. El creciente número de celíacos y pacientes que no toleran el gluten ha incrementado la demanda de los productos LG, los cuales han ido ganando mercado a través de fuertes iniciativas de presencia y gubernamentales al por menor en estas regiones. Una de las principales limitaciones del mercado de productos LG es una falta de conocimiento en el desarrollo de regiones como Asia, el Pacífico y América Latina. Un gran número de consumidores no están tan conscientes de la diferencia entre la

alergia y la intolerancia, además de que muchos de ellos están mal diagnosticados o no diagnosticados, ya sea en su totalidad para la EC (Vidal N. , 2015).

La tendencia creciente en el mercado de los productos LG se visualiza en el incremento del registro de patentes (principal país Estados Unidos seguido de China, Figura 1) y de lanzamiento de nuevos productos al mercado (liderado por Brasil y Estados Unidos en segundo lugar, Figura 2).

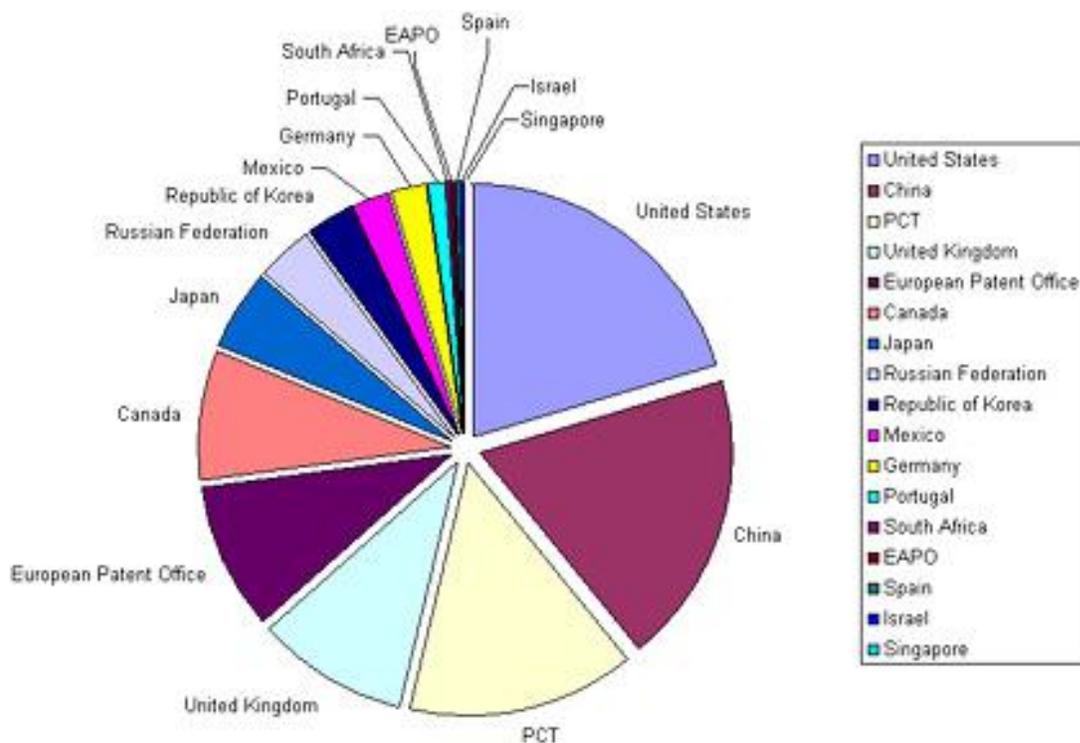


Figura 1. Publicación de patentes sobre gluten (Vidal N., 2015).

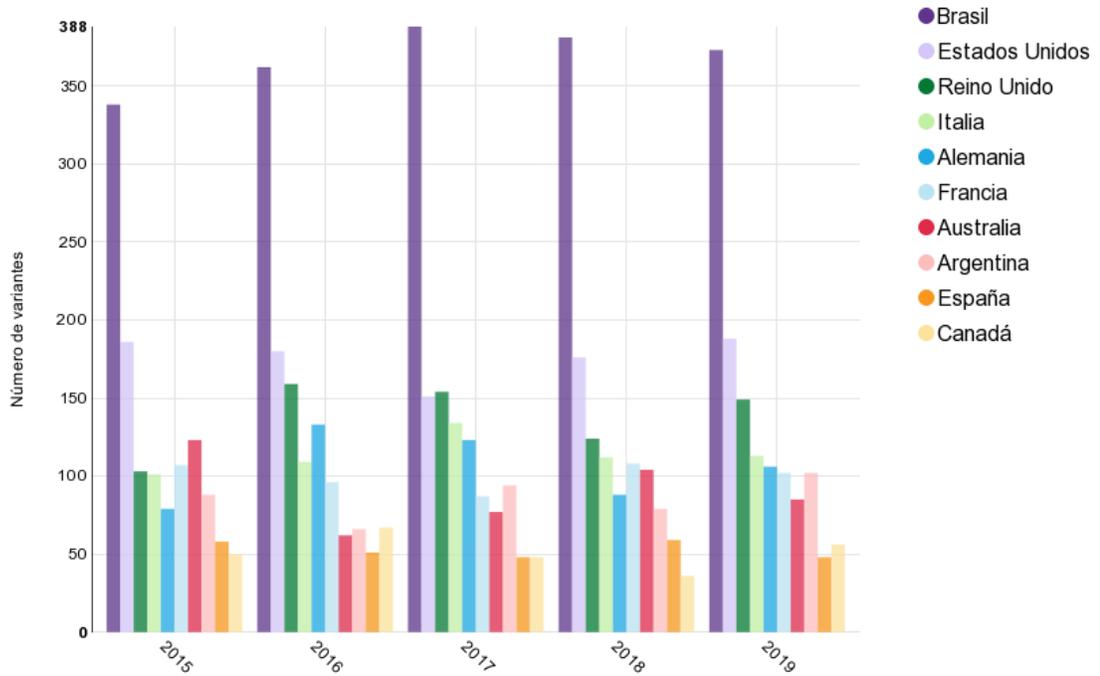


Figura 2. Lanzamiento de nuevos productos y nuevas formulaciones con la alegación “Gluten free”, desde enero 2015 hasta diciembre 2019 (MINTEL, 2020).

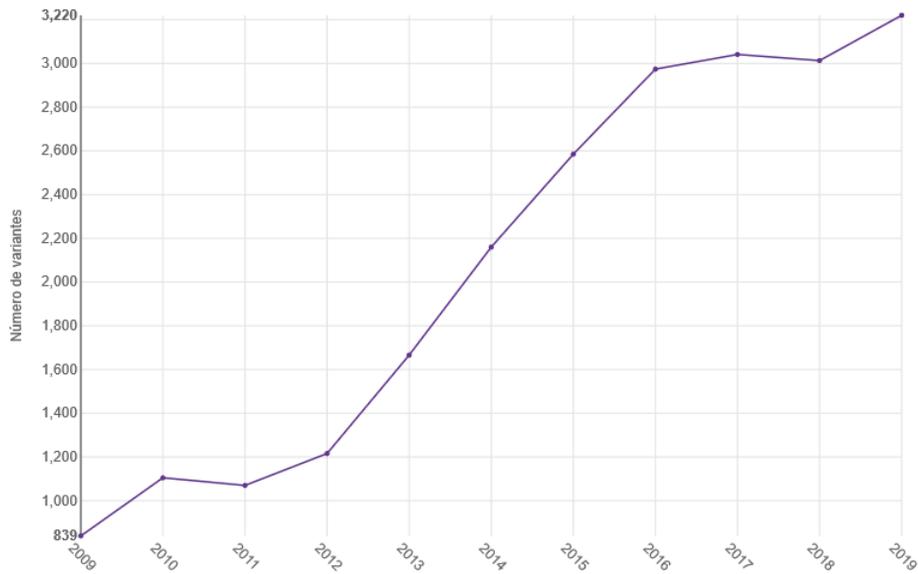


Figura 3. Lanzamiento de productos LG a nivel mundial, de 2009 a 2019 (Mintel, 2020).

En los últimos diez años, se ha visto un importante incremento en los lanzamientos de productos LG en todo el mundo (Figura 3), cuadruplicándose el número, con 839 en 2009 vs. 3220 en 2019. Durante el periodo del 2011 al 2016 es posible apreciar un crecimiento exponencial, el cual fue del 245%, con 1226 en 2012 y 2974 en 2016. Sin embargo, entre el 2016 y 2018 el lanzamiento de productos se mantuvo muy similar (entre 2974-3013) con un ligero incremento en el 2019.

### 3.2.1 Norteamérica

En América del Norte los alimentos sin lactosa y LG son los que lideran las ventas de estos productos especiales (Tabla 3).

Tabla 3. Ventas por categoría de productos en Norteamérica (MUSD).

Categoría de productos	2012	2013	2014	2015
Total	3.953,40	4.138,60	4.327,00	4.505,00
Alimentos para diabéticos	332,8	349,9	372,5	403,6
Alimentos LG	1.437,10	1.534,20	1.631,00	1.715,30
Alimentos sin lactosa	1.656,90	1.694,30	1.727,20	1.764,40
Otras fórmulas especiales de leche	526,6	560,3	596,2	621,7

FUENTE: (Carmona, 2013)

Según Mintel, en 2012 la población estadounidense que estaba diagnosticada con EC correspondía al 1%. Sin embargo, se estima que hasta un 6% de su población total es intolerante al gluten.

Actualmente, Estados Unidos lidera la venta de estos productos en la región y en el mundo (Tabla 4). En el año 2012, los alimentos sin lactosa fueron los más vendidos. De acuerdo a estimaciones de Euromonitor, en el año 2015 los productos LG deberían liderar las ventas. Entre los alimentos LG y para diabéticos destacan los productos de panadería (Carmona, 2013).

Tabla 4. Ventas por categoría de productos en EE.UU. (MUSD)

Categoría de productos	2012	2013	2014	2015
Total	3.775,0	3.951,6	4.131,8	4.302,1
Alimentos para diabéticos	322,1	338,8	361,1	391,8
Alimentos LG	1.405,3	1.499,4	1.593,5	1.675,4
Alimentos sin lactosa	1.543,9	1.576,8	1.605,4	1.638,4
Otras leches especiales sin lactosa	503,7	536,6	571,8	596,5

FUENTE: (Carmona, 2013)

Un estudio de The NPD Group, señala que el 11% de los consumidores norteamericanos siguen una dieta LG y de éstos 1 de cada 4 cree que este tipo de dietas son buenas para todos. Además, indica que solo el 25% de los que viven en hogares donde se sigue esta dieta, lo hacen por ser celíacos o intolerantes al gluten (Vidal N. , 2016).

### 3.2.2 Europa

Un estudio publicado por *The Minister of Agriculture and Agri-Food Canada* (Global Pathfinder Report: Food Intolerance Products, 2012) indica que, en 2012 las ventas totales de alimentos especiales en la región ascendieron a 3,972.5 MUSD y las proyecciones para el año 2015 son de 4,441.5 MUSD. El análisis se centra en los tres más grandes mercados de Europa Occidental, Reino Unido, Francia, y Alemania (Tabla 5).

Tabla 5. Ventas por categoría de productos en Europa (Alemania, Reino Unido, Francia y EO) (MUSD).

Categoría de productos	2012	2013	2014	2015
Total	3,972.50	4,130.60	4,289.80	4,441.50
Alimentos para diabéticos	488.40	488.80	492.80	495.90
Alimentos LG	1,761.60	1,851.80	1,941.30	2,027.50
Alimentos sin lactosa	1,494.30	1,558.80	1,624.80	1,685.40
Otras leches especiales sin lactosa	228.10	231.40	230.80	232.80

FUENTE: (Carmona, 2013)

El primer lugar en ventas totales en 2012 de productos LG es de Europa Occidental (EO) con 1,203.6 MUSD, el segundo y el tercero los ocupan Alemania y Reino Unido, con 331.3 y 346.3 MUSD, respectivamente (Tabla 6). En ambos mercados,

los principales productos comercializados LG corresponden a productos de panadería (Carmona, 2013).

Tabla 6. Ventas de Productos LG en Europa (Alemania, Francia, Reino Unido y EO) (MUSD).

Región	2012	2013	2014	2015
Total	1761.60	1851.80	1941.30	2027.50
Europa Occidental	1203.60	1265.30	1326.10	1385.90
Alemania	331.30	346.30	364.30	380.00
Reino Unido	140.70	145.20	147.40	148.20
Francia	86.00	95.00	103.50	113.40

FUENTE: (Carmona, 2013)

Según un reporte de Euromonitor, el mercado global de alimentos LG alcanzó más de 350 mil toneladas en 2014 y es probable que supere las 700 mil toneladas para 2022, con una tasa de crecimiento anual compuesta (TCAC) de más del 9%. Los productos de panadería LG fueron el segmento de mayor consumo y representaron más del 50% del volumen total en 2014, con un crecimiento estimado del 8% para el periodo 2016 a 2022. Se esperan posibles tasas más altas para cereales y pastas. Europa representó más del 50% del volumen total en 2014 (De Albertis, 2016).

Tabla 7. Tendencia de Mercado de Alimentos LG en Europa (mil toneladas)

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	TCAC 10-15
Alimentos	122,4	134,6	145,1	158,7	185,5	206,9	11,1%
Comida para Bebé	23,8	24,6	25,2	25,7	26	25,5	1,4%
Baked Goods	49,2	55,4	60,8	67,4	77,9	86	11,8%
Biscuits	9,6	10,9	12,4	14,8	16,4	17,5	12,8%
Cereal de desayuno	8,8	9,5	10,6	11,4	12,3	14	9,7%
Pasta	20,2	22,2	23,5	25,5	37	45,9	17,8%
Ready meals	10,8	11,8	12,6	13,8	16	18	10,8%

FUENTE: De Albertis, 2016.

### 3.2.3 Latinoamérica

De 2015 a 2019 se reportaron 3954 lanzamientos de productos de panificación según la base de datos Mintel, notándose que este crecimiento ha ido en constante aumento donde en 2015 hubo 686 lanzamientos contra 847 del año 2019 en los que Brasil encabeza la lista seguido por Argentina y México en tercer lugar (Figura 4).

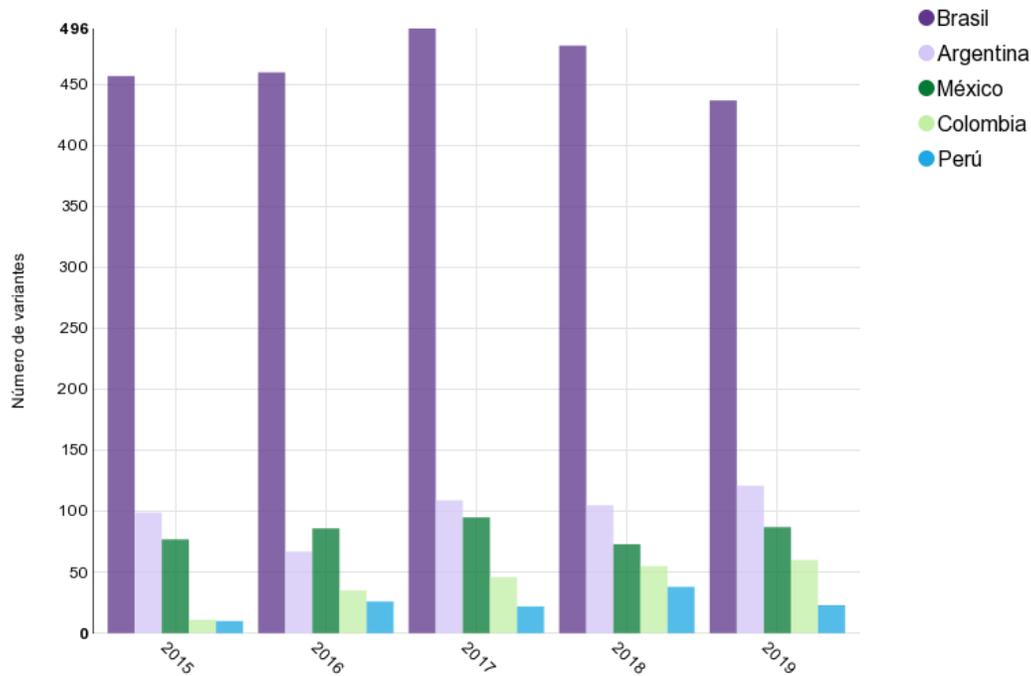


Figura 4. Lanzamiento de nuevos productos de panificación con la alegación “Gluten free”, desde enero 2011 hasta diciembre 2019 (MINTEL, 2020)

### 3.2.4 Asia Pacífico

Se estima que el mercado de alimentos LG en Asia-Pacífico aumentará de 340.8 MUSD en 2013 a 502.5 MUSD en 2018, a una tasa compuesta anual de 8.1% de 2013 a 2018. Los estilos de vida cambiantes y la cultura de trabajo aumentaron la demanda de productos LG en el mercado de Asia-Pacífico. Países como China, Japón, India y Australia fueron los mayores consumidores de productos alimenticios LG. A pesar del alto crecimiento, los alimentos LG enfrentaron problemas para

establecerse en el mercado asiático debido al alto precio, la falta de conocimiento sobre los productos, el aumento en el número de casos no diagnosticados y la cadena de valor ineficiente para productos LG.

El problema era muy agudo en la región de Asia, donde el trigo se consideraba una de las principales fuentes de fibra y proteína. Se consideraba que la India era un importante productor mundial de cereales LG, como el sorgo, el arroz, el maíz, la soja, el mijo y las leguminosas. Sin embargo, con la creciente tasa de diagnóstico y concientización sobre la enfermedad celíaca, se proyectó que la demanda de productos LG crecería a la mayor tasa de crecimiento anual compuesto del 10.7% de 2015 a 2020 en la región de Asia y el Pacífico. La demanda también había aumentado en otras partes de la India ya que los consumidores buscaban variedades más procesadas de productos LG (Masih & Sharma, 2016).

### **3.3 Fuentes de harina LG**

El pan constituye uno de los productos alimentarios más importantes para el ser humano, en el cual, el principal componente para su elaboración es la harina, tradicionalmente la de trigo, aunque también se podrían utilizar harinas de otros cereales, como el centeno, el arroz o el maíz. La preparación del pan LG difiere de los productos estándar a base de trigo. En ausencia de proteínas de gluten, la masa no requiere un mezclado prolongado, normalmente es necesario para construir la red de proteínas. Por la misma razón, la cantidad de agua añadida podría ser mayor, y las fórmulas tipo batido se usan a menudo en la producción de panificación LG (Renzetti *et al.*, 2008).

Los criterios de selección de cereales y harinas LG se basan en su contenido nutricional y propiedades funcionales.

Los cereales que se consideran LG son el arroz (*Oryza sativa* L.), maíz (*Zea mays* L.) y sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), que son parientes lejanos de trigo y se sabe que son seguros para los celíacos (Moreno *et al.*, 2014). Además, un número de especies de mijo, el teff, y una gama de pseudocereales también están disponibles para proporcionar harinas LG, incluso aumentando el patrón nutricional

de los productos en el caso de pseudocereales. Por ejemplo, el arroz y el maíz son bajos en proteínas, fibra y ácido fólico (Tabla 8); mientras que el teff, quinua, amaranto y trigo sarraceno muestran una composición de ácidos grasos favorable y alto contenido en proteínas (Hager *et al.*, 2012). En particular, el amaranto y teff son ricos en calcio, magnesio y hierro, aunque el contenido depende en gran medida de la región de cultivo. La harina de arroz es el producto más adecuado para aplicaciones de panadería debido a su sabor suave, de color blanco, digestibilidad y propiedades hipoalergénicas (Rosell *et al.*, 2014).

Tabla 8. Composición proximal de algunos granos LG comparados vs trigo

	Trigo	Arroz	Maíz	Quínoa	Amaranto	Teff	Alforfón	Sorgo
Hidratos de carbono (%)	75.9	77.2	74.3	64.2	65.7	73.1	71.5	74.6
Fibra dietética (%)	12.2	3.5	7.3	7	6.7	8	10	6.3
Proteínas (%)	11.3	7.9	9.4	14.1	13.6	13.3	13.2	11.3
Grasa (%)	1.7	2.9	4.7	6.1	7	2.4	3.4	3.3
Calcio (mg)	32	23	7	47	159	180	18	28
Hierro (mg)	4.6	1.5	2.7	4.6	7.6	7.6	2.2	4.4
Magnesio (mg)	93	143	127	197	248	184	231	
Folato (µg)	38	20	19	184	82		30	

FUENTE: (Rosell *et al.*, 2014)

### 3.3.1 Cereales

#### 3.3.1.1 Maíz

La composición química del grano de maíz, así como su valor nutritivo, dependen del genotipo de la variedad, el ambiente y las condiciones de siembra. En promedio, el grano entero de maíz se compone de 61% a 68% de almidón, cerca del 10% de polisacáridos, del 6% a 12% de proteína y de 3% a 6% de lípidos (Yongfeng & Jaylin, 2016).

El mayor contenido de proteína se encuentra en el germen del grano. No obstante, tanto el endospermo como el pedicelo pueden llegar a tener hasta 9% de proteínas. La calidad nutritiva del maíz está definida en gran parte por la calidad de sus proteínas que es establecida por el perfil de aminoácidos indispensables, el cual

indica que la fracción de zeína es rica en ácido glutámico (21–26%), leucina (20%), prolina (10%) y alanina (10%) pero es deficiente en lisina y triptófano (Nuss & Tanumihardjo, 2010) provocando que el valor biológico de la proteína disminuya.

El germen del grano contiene alrededor del 80% de los nutrimentos inorgánicos, del total presente en el maíz. El componente inorgánico más abundante es el fósforo, principalmente en las sales de potasio y magnesio del ácido fítico. Este compuesto, que llega a representar hasta 1% de del grano, interfiere en la absorción intestinal de nutrimentos inorgánicos indispensables como hierro y zinc. El azufre, cuarto elemento más abundante en el grano, está contenido en forma orgánica como parte de los aminoácidos metionina y cisteína. El contenido de algunos nutrimentos inorgánicos es muy variable dependiendo de los tipos de maíz, por ejemplo, existen variedades de maíz que contienen 0.1 mg de hierro/100 g mientras que otros llegan a tener hasta 10 mg de hierro/ 100g.

En relación con el almidón, el grano maduro del maíz presenta en promedio 72%, y prácticamente todo está presente en las células del endospermo. En un maíz normal, el gránulo de almidón contiene aproximadamente 27% de amilosa y 73% de amilopectina (Paredes *et al.*, 2009).

### **3.3.1.2 Arroz**

El arroz, como otros cereales, es una hierba domesticada; las variedades silvestres de arroz han existido durante siglos: *Oryza sativa* en Asia y *Oryza glaberina* en África. El arroz es un alimento particularmente importante para gran parte de la población de China y muchos otros países de Asia, donde habita casi la mitad de la población mundial. Gran parte del arroz se produce en pequeños campos o arrozales de Asia, pero una parte se cultiva en áreas lluviosas sin irrigación (Latham, 2002) .

El arroz integral pregerminado tiene dos veces más proteína que el arroz blanco, es decir, 14.6 g / 100 g (arroz integral) contra 7.3 g / 100 g (arroz blanco). El arroz es una buena fuente de tiamina (vitamina B1), riboflavina (vitamina B2) y niacina

(vitamina B3), su perfil de aminoácidos muestra que los ácidos glutámico y aspártico son los principales aminoácidos presentes mientras que la lisina es el aminoácido limitante (FAO, Rice is life, 2004).

En un estudio realizado por Thomas *et al.*, en 2015 a 6 variedades de arroz, fueron detectados dieciséis aminoácidos entre los cuales se encontraron los ocho principales esenciales: histidina, treonina, valina, metionina, lisina, isoleucina, leucina y fenilalanina.

La harina de arroz es una de las harinas de cereales más adecuadas para la preparación de productos LG debido a su sabor natural, hipoalergénico, incoloro y suave. Además, tiene también proteínas hipoalergénicas, y bajo contenido de sodio y grasa y gran cantidad de hidratos de carbono de fácil digestión. Gracias a la cantidad relativamente pequeña de prolamina en el arroz, es necesario utilizar algún tipo de hidrocoloide, emulsionante, enzimas o productos lácteos, para obtener algunas propiedades viscoelásticas (Matos & Rosell, 2012).

De hecho, estas propiedades están significativamente influenciadas por las condiciones de almacenamiento de la variedad de arroz tamaño de partícula de la harina y longitud del grano de arroz, método de procesamiento, estructura química y composición, entre otros (Cornejo & Rosell, 2015).

### **3.3.1.3 Sorgo**

El sorgo es un cereal de la familia de las gramíneas nativo del noreste de África, es uno de los principales cultivos de cereales a nivel mundial y según la (FAO, 2017), es la quinta producción más alta de cultivos de cereales, después del maíz, el trigo, el arroz y la cebada, con 57.6 millones de toneladas de producción anual a nivel mundial. En países occidentales como Estados Unidos, México y Australia, el sorgo se cultiva principalmente para alimentación animal. Sin embargo, existe un interés creciente en cultivarlo para la producción de biocombustibles, así como alimentos para consumo humano gracias a su valor nutricional como fuente de nutrientes (Xiong *et al.*, 2019).

El contenido de proteína en el grano de sorgo puede variar de 4.4 a 21.1% con un valor medio de 11.4%. El contenido de lisina es de 1.06 a 3.64%. El almidón es el componente principal del grano y corresponde del 56 al 75% de la materia seca total. El contenido total de azúcares solubles de grano de sorgo es de 0.7 a 4.2% y los azúcares reductores de 0.05 a 0.53%. El contenido de grasa varía de 2.1 a 7.6%, la fibra cruda de 1.0 a 3.4% y cenizas de 1.3 a 3.3%. El ácido linoleico (18:2) y el ácido oleico (18:1) fueron los principales componentes de los ácidos grasos de los lípidos de sorgo (Ratnavathi & Patil, 2013).

El contenido de aminoácidos de la proteína de los granos de sorgo es menor para aminoácidos esenciales (lisina, metionina + cistina, triptófano, histidina, treonina y arginina) y mayor de los no esenciales (leucina, isoleucina, valina, fenilalanina, tirosina, alanina, Ac. aspártico, Ac. glutámico, prolina, glicina y serina) (Jaramillo *et al.*, 1993).

El grano de sorgo posee la ventaja de carecer de prolaminas, que sí están presentes en otros cereales como trigo, avena, cebada y centeno, haciéndolo apto para el consumo por parte de personas celíacas (Carrasco *et al.*, 2011). Por otro lado, Taylor y colaboradores, encontraron que el pan hecho con sorgo era aceptable, mientras que el pan hecho con sorgo ceroso era inaceptable, mostrando alvéolos grandes y miga con sabor a pudín. Estos investigadores concluyeron que la amilosa juega un papel importante ya que la retrogradación después del enfriamiento es un factor clave en la estabilización de las migas (Taylor *et al.*, 2006). La mayoría de los almidones de granos de sorgo contienen de 20 a 30% de amilosa y de 70 a 80% de amilopectina, pero los sorgos cerosos y hetero cerosos contienen de 0 a 15% de amilosa y de 85 a 100% de amilopectina (Yan *et al.*, 2011).

El sorgo tiene un gran potencial en alimentos y bebidas, ha sido estudiado en muchos productos alimenticios, incluyendo panes, galletas, hamburguesas de carne picada, nuggets de pollo y fideos (Winger *et al.*, 2014).

Solo un número limitado de estudios han estudiado panes de sorgo sin trigo, y la mayoría han usado ingredientes adicionales como metilcelulosa, goma xantana, carboximetilcelulosa, pentosanos de centeno, leche descremada en polvo y huevo.

Sin embargo, la inclusión de estos dos últimos ingredientes es cuestionada por su carácter alérgico, así como el incremento del costo del producto. Por lo que una formulación sencilla a base de 70% de sorgo y 30% de almidón de yuca produce un buen pan a bajo costo (Olatunji *et al.*, 1992).

Según el artículo publicado por Schober *et al.*, 2005, se encontraron diferencias claras entre varios híbridos de sorgo en su potencial para producir pan con levadura LG. La estructura de la miga (tamaño de poro, número de poros y dureza instrumental de la miga) difería de forma más característica, mientras que el volumen y la altura no mostraron diferencias significativas entre las muestras evaluadas. La dureza del grano y el almidón dañado parecen ser elementos clave en estas diferencias. Con respecto a la tecnología del pan de sorgo, se pueden alcanzar mayores volúmenes de pan cuando se agrega almidón de maíz a la harina de sorgo, y se produce una pasta blanda (baja viscosidad), usando altos niveles de agua. El uso de goma xantana y leche descremada en polvo tuvo efectos negativos en la estructura de la miga. Un punto a destacar para mantener la calidad del pan LG está en la etapa de molienda del grano para controlar el daño del almidón (Schober *et al.*, 2005).

Los panes hechos de sorgo sin trigo agregado, como todos los panes LG, requieren una tecnología diferente. Las masas sin gluten son más fluidas que las masas de trigo y tienen una viscosidad más cercana a las masas para pasteles debido a la falta de una red de gluten. Además, la retención de gases es más difícil y se ha sugerido el uso de gomas, estabilizadores y almidón pregelatinizado como un medio para proporcionar mecanismos de oclusión y estabilización de gases. También se ha descrito que la leche en polvo tiene efectos positivos en los panes LG y se ha sugerido su uso en el pan de sorgo LG (Cauvain, 2014).

#### 3.3.1.4 Teff

Etiopía es el principal productor de teff (*Eragrostis tef*) cultivando más del 90% a nivel mundial y el único país que lo ha adoptado como cultivo básico. Su exportación en crudo fue prohibida en el 2006 debido al aumento de los precios del grano provocando temores de una crisis alimentaria, sin embargo, fue parcialmente levantada en el 2015 después de que las inversiones en la mecanización y mejores técnicas de cultivo aumentaran los rendimientos en un 40% (Nurse, 2015).

El grano de teff tiene forma ovalada con un tamaño de 0.9 - 1.7 mm (largo) y 0.7 - 1.0 mm (diámetro). La composición proximal y el contenido de amilosa en promedio de 13 variedades de granos de teff es: humedad 9.30 - 11.22%, proteína 8.7 - 11.1%, cenizas 1.99 - 3.16%, grasa cruda 2.0 - 3.0%, fibra cruda 2.6 - 3.8%, y amilosa 20 - 26% (Bultosa, 2007). El contenido de almidón del teff es mayor que el de otros cereales LG como el maíz, sorgo, arroz, mijo y también que del trigo (Tabla 9) siendo una opción como fuente de energía alimentaria en productos de panificación LG.

Los granos de teff son ricos en ácidos grasos indispensables ya que el contenido de grasa es principalmente de ácidos grasos insaturados (72.46%) en los que predomina el ácido oleico (32.41%) seguido del ácido linoleico (23.83%) (Gebremariam *et al.*, 2012). La cantidad de ácido linoleico y en especial de  $\alpha$ -linoléico es muy baja en el arroz, trigo y maíz (Tabla 9), además estos cereales generalmente se consumen después de la decorticación y el refinado lo que puede reducir su cantidad de grasa cruda y ácidos grasos poliinsaturados, caso contrario al teff el cual se mantiene como grano entero.

Como se observa en el perfil de aminoácidos de la tabla 9, el grano de teff contiene altas concentraciones de los aminoácidos esenciales; Los aminoácidos: leucina, fenilalanina, triptófano, treonina, histidina, metionina, cistina, prolina y alanina, es mayor en el grano de teff que los de sorgo, trigo y arroz, resaltando también el contenido de lisina el cual se considera como limitante principal de los cereales (Gebremariam *et al.*, 2012).

Tabla 9. Macroelementos, aminoácidos y composición de ácidos grasos del grano de teff comparado con maíz, sorgo, trigo y arroz.

	Teff	Maíz	Sorgo	Trigo	Arroz
Energía (kcal)	357	375	370	359	357
Almidón (%)	73	72	63	71	64
Proteína cruda (%)	11	8-11	8.3	11.7	7.3
Aminoácidos (g / 16 g N)					
Lisina	3.7		0.3	2.1	3.7
Isoleucina	4.1		0.7	3.7	4.5
Leucina	8.5		2.1	7.0	8.2
Valina	5.5		0.8	4.1	6.0
Fenilalanina	5.7		0.9	4.9	5.5
Tirosina	3.8		0.7	2.3	5.2
Triptofano	1.3		0.2	1.1	1.2
Treonina	4.3		0.5	2.7	3.7
Histidina	3.2		0.4	2.1	2.3
Arginina	5.2		0.6	3.5	8.5
Metionina	4.1		0.3	1.5	2.7
Cistina	2.5		0.3	2.4	1.8
Asparagina	6.4			5.1	9.0
Serina	4.1		0.8	5.0	5.0
Glutamina + Ácido Glutámico	21.8			29.5	17.0
Prolina	8.2		1.3	10.2	5.0
Glicina	3.1		0.5	4.0	4.5
Alanina	10.1		1.6	3.6	5.5
<b>Grasa cruda (%)</b>	2.5	4.9	3.9	2	2.2
Ácidos grasos poliinsaturados totales	1.1	1.8	1.4	0.5	0.8
Ácido linoleico (AL)	0.9	1.7	1.3	0.5	0.78
Ácido $\alpha$ -linoleico (AAL)	0.14	0.05	0.07	0.03	0.03
Relación AL:AAL	7:1	34:1	20:1	17:1	26:1
<b>Fibra cruda (%)</b>	3.0	-	0.6	2.0	0.6-1.0
Fibra dietética total	4.5	2.6			-
Fibra dietética soluble	0.9	0.6			-
<b>Cenizas (%)</b>	2.8	1.4	1.6	1.6	1.4

FUENTE: (Kaleab, 2014)

El contenido de fibra dietética total y soluble del teff es más alto que el trigo, arroz y maíz, favorecido por ser un grano entero y de tamaño pequeño con un alto contenido de salvado. Tiene buena cantidad de nutrimentos inorgánicos especialmente hierro y calcio (Tabla 10) y fitoquímicos como polifenoles y fitatos: 140 mg de ácido gálico/ 100 g de muestra seca y 682 - 1374 mg/ 100 g (base seca), respectivamente.

Tabla 10. Contenido de nutrimentos inorgánicos del grano de teff comparado con otros cereales (mg / 100 g)

Nutrimentos	Teff			Maíz	Sorgo	Trigo	Arroz
	Blanco	Rojo	Mezclado				
Hierro	9.5-37.7	11.6->150	11.5->150	3.6-4.8	3.5-4.1	3.7	1.5
Zinc	2.4-6.8	2.3-6.7	3.8-3.9	2.6-4.6	1.4-1.7	1.7	2.2
Calcio	17-124	18-178	78.8-147	16	5.0-5.8	15.2-39.5	23
Cobre	2.5-5.3	1.1-3.6	1.6	1.3	0.41	0.23	0.16

FUENTE: Gebremariam et al., 2012

Bokhari *et al.*, en 2012 mostraron que el consumo de panes de trigo enriquecidos con 30% de teff puede ayudar a mantener los niveles séricos de hierro en las mujeres embarazadas. El estudio también sugirió que la degradación de fitatos puede conducir a una mejor biodisponibilidad de hierro. Dado el alto contenido de hierro del teff y su contribución potencial a los enfoques basados en los alimentos para mejorar la nutrición, se requieren más investigaciones sobre la biodisponibilidad de hierro del teff. De hecho, si se puede confirmar la biodisponibilidad del hierro en el teff, éste puede ser un ingrediente adecuado para los pacientes celíacos no solo por la ausencia de gluten, sino también por su alto contenido de hierro (Kaleab, 2014).

### 3.3.1.5 Mijo

El mijo pertenece a la familia *Poaceae* (anteriormente llamada *Gramineae*) y consta de diferentes variedades. El mijo perla (*Pennisetum glaucum*) es una variedad significativa, que representa el 40% de la producción mundial, seguida de otras variedades como el mijo cola de zorra (*Setaria italica*), el mijo proso o blanco (*Panicum miliaceum*), mijo dedo (*Eleusine coracana*), mijo kodo (*Paspalum setaceum*), mijo pequeño (*Panicum sumatrense*) y mijo de corral (*Echinochloa utilis*) (Liang & Liang, 2019). La producción mundial total de granos de mijo en 2018 se estimó en aproximadamente 29.7 millones de toneladas, con África y Asia como principales productores, generando respectivamente el 50% y el 48% del rendimiento global total (FAO, 2020).

El mijo es uno de los cultivos resistentes a la sequía más importantes y el sexto cultivo de cereales en términos de producción agrícola mundial. Además, el mijo tiene resistencia a plagas y enfermedades, corta temporada de crecimiento y productividad en condiciones de sequía, en comparación con los principales cereales (Saleh *et al.*, 2013).

El mijo es un cereal LG y de bajo costo (aproximadamente 40% más bajo que el precio del maíz tiene), tiene un alto valor nutritivo, comparable al del trigo y el arroz. El mijo perla presenta un alto contenido de almidón resistente, fibras dietéticas solubles e insolubles, nutrimentos inorgánicos y antioxidantes. Contiene alrededor de 92.5% de materia seca, 2.1% de ceniza, 2.8% de fibra cruda, 7.8% de grasa cruda, 13.6% de proteína cruda y 63.2% de almidón (Saleh *et al.*, 2013). Las proteínas del mijo son buena fuente de aminoácidos esenciales, Mohamed y otros encontraron que el mijo cola de zorra demostró tener un contenido más elevado de lisina que la mayoría de los cereales por lo que es posible su uso como una fuente de proteína suplementaria (Mohamed *et al.*, 2009).

El contenido de fibra cruda, proteína y minerales de los granos de mijo en general son superiores a los de otros cereales como trigo, maíz y arroz (Tabla 11) (Saleh *et al.*, 2013).

Nambiar y otros, obtuvieron el contenido de fenoles totales en diferentes variedades de mijo perla crudo y cocido, reportando que las sometidas a un proceso de cocción basado en recetas tradicionales, en promedio tienen de 247.5 a 335 mg / 100 g así como la identificación de los flavonoides tricina, acacetina y luteolina (Nambiar *et al.*, 2012).

Tabla 11. Composición nutrimental de mijo y otros cereales (por 100 g de porción comestible, 12% humedad).

Alimento	Arroz (integral)	Trigo	Maíz	Sorgo	Mijo Perla	Mijo Dedo	Mijo cola de zorro	Mijo pequeño	Mijo de corral	Mijo Kodo
Proteína <sup>a</sup> (g)	7.9	11.6	9.2	10.4	11.8	7.7	11.2	9.7	11	9.8
Grasa (g)	2.7	2	4.6	3.1	4.8	1.5	4	5.2	3.9	3.6
Cenizas (g)	1.3	1.6	1.2	1.6	2.2	2.6	3.3	5.4	4.5	3.3
Fibra cruda (g)	1	2	2.8	2	2.3	3.6	6.7	7.6	13.6	5.2
Carbohidratos (g)	76	71	73	70.7	67	72.6	63.2	60.9	55	66.6
Energía (kcal)	362	348	358	329	363	336	351	329	300	353
Ca (mg)	33	30	26	25	42	350	31	17	22	35
Fe (mg)	1.8	3.5	2.7	5.4	11	3.9	2.8	9.3	18.6	1.7
Tiamina (mg)	0.41	0.41	0.38	0.38	0.38	0.42	0.59	0.3	0.33	0.15

<sup>a</sup>Todos los valores excepto las proteínas se expresan en base al peso seco.

FUENTE: Saleh *et al.*, 2013

El mijo es un cereal superior en cuanto a la calidad nutricional y presenta varios beneficios para la salud. Es una buena fuente de fibra dietética, calcio, ácido oleico (25%) y ácido linoleico (46%) y de fitoquímicos con potencial nutracéutico. Además, el mijo es una potente fuente de antioxidantes, debido a su contenido fenólico (Brasil *et al.*, 2015).

Se ha encontrado que el contenido de almidón, azúcar soluble y amilosa en diferentes variedades de mijo perla varía de 62.8 a 70.5%, 1.2 a 2.6% y de 21.9 a 28.8% respectivamente (Kapri *et al.*, 2017).

### 3.3.2 Pseudocereales

#### 3.3.2.1 Amaranto

El grano de amaranto tiene aproximadamente 62 a 65% de almidón, bajo en amilosa (que oscila entre 2 y 12%) y varía según el genotipo. Los gránulos de almidón del amaranto tienen diámetros que oscilan entre 0,5 y 2,5 mm, similar al arroz, pero más pequeños que los que se encuentran en almidones de otros granos de cereales como papa y trigo (Singh & Singh, 2011).

El amaranto es una fuente rica en polifenoles (flavonoides), con relativamente alta actividad antioxidante. El ácido cafeico, ácido *p*-hidroxibenzoico, y ácido ferúlico son los principales compuestos fenólicos en los granos de amaranto (Klimczak *et al.*, 2002).

Gélinas y Seguin, analizaron granos de 30 genotipos de amaranto de *A. cruentus*, *A. hybridus*, y *A. hypochondriacus* encontrando concentraciones de calcio y magnesio de 134 - 370 y 230 - 387 mg / 100 g, respectivamente, mientras que el contenido de oxalato varía de 178 - 278 mg / 100 g (Gélinas & Seguin, 2007). Aunque el oxalato en la dieta es un factor de riesgo potencial para el desarrollo de cálculos renales y disminuye la disponibilidad de calcio y magnesio, la mayoría de los oxalatos en los granos de amaranto están en forma insoluble y, por tanto, la absorción puede ser baja. Sin embargo, esto necesita ser confirmado por investigaciones de biodisponibilidad (Singh & Singh, 2011).

El contenido de fibra dietética y lípidos que contiene el grano de amaranto es de 8 a 17% y de 3.0 a 10.5%, respectivamente. Aunque el grano de amaranto tiene un mayor contenido de lípidos que la mayoría de los cereales, la composición de su aceite es muy similar a la de los cereales, siendo alta en ácidos grasos insaturados (aproximadamente 77%). El aceite de amaranto tiene principalmente ácido linoleico, pero también tocotrienoles, que se asocian con la actividad reductora del colesterol en los sistemas de mamíferos (Becker *et al.*, 1981). El aceite de grano de amaranto tiene una cantidad significativa (hasta 8%) de escualeno, lo que tiene efectos

beneficiosos directos o indirectos sobre la salud y también es un ingrediente en los cosméticos (Sun *et al.*, 1997).

Los granos de amaranto tienen 11 a 17% de proteína distribuido en una proporción 65:35 entre el germen y el endospermo, a diferencia de otros granos de cereales que presentan una proporción 15:85. En relación a su perfil de aminoácidos contienen cantidades significativas de cisteína, metionina y lisina. Las albúminas y globulinas son relativamente ricas en lisina y valina, aminoácidos indispensables, mientras que las gluteninas son ricas en leucina, treonina e histidina (Guzmán *et al.*, 1999).

En comparación con las albúminas de grano de leguminosas, que contienen varios factores antinutricionales, la fracción de albúmina de la proteína de amaranto se considera segura y es comparable con las proteínas de clara de huevo, y se utiliza como un sustituto de huevo en diferentes productos (Písaríková *et al.*, 2005).

La calificación química corregida por digestibilidad proteínica (PDCAAS, por sus siglas en inglés) de harina de amaranto es más alto (0.64) que los de trigo (0.40) y avena (0.57). El tratamiento térmico mejora la digestibilidad de la proteína debido a la apertura de los complejos hidrato de carbono-proteína o la inactivación de los factores antinutricionales, tales como inhibidores de tripsina (Bejosano & Corke, 1998).

### **3.3.2.2 Quinoa**

La quinoa es una planta alimenticia de la familia *Amaranthaceae*, subfamilia *Chenopodiaceae*, género *Chenopodium*, nativa de las regiones andinas de Chile, Perú, Ecuador y Bolivia, y su cultivo se remonta a miles de años. La experiencia milenaria con este cultivo permitió a las poblaciones antiguas reconocer el alto valor nutricional de este alimento (Jancurová *et al.*, 2009).

La cantidad y calidad de proteína de la quinoa son generalmente superiores a las de los granos de cereales, mientras que ofrecen propiedades LG y alta digestibilidad. La quinoa tiene un mayor contenido de proteína (12.9% a 16.5%) que la cebada (10.8% a 11.0%), avena (11.6%), arroz (7.5% a 9.1%) y maíz (10.2% a

13.4%), y similar al del trigo (14.3% a 15.4%). Las proteínas de almacenamiento de la quinua consisten principalmente en globulina y albúmina, con poca o ninguna presencia de prolaminas, que inducen respuestas autoinmunes en pacientes celíacos. Un reciente estudio *in vitro* de 15 cultivares de quinua demostró que solo dos de ellos, presentaron niveles detectables de epítomos de prolamina celíaca tóxica, mientras que las respuestas inmunes no se replicaron en el consumo total de alimentos *in vivo*. Estos resultados sugieren que la quinua es un sustituto seguro LG de los granos de cereal (Zevallos *et al.*, 2014).

Entre la proteína total de quinua, 37% está constituida por quenopodina, una proteína tipo globulina 11S que se ha convertido en una fuente de referencia de leucina, isoleucina y fenilalanina y tirosina por la FAO. De acuerdo con las recomendaciones de la FAO/OMS, la proteína de quinua proporciona más del 180% de la Ingesta Diaria Recomendada (IDR) de aminoácidos para la nutrición adulta, con proporciones adecuadas de los 10 aminoácidos indispensables. Se reporta que el perfil de aminoácidos indispensables de la quinua es equivalente al de la caseína y la leche entera deshidratada según la FAO (2011), (Maradini Filho, 2017). Además, la lisina, uno de los aminoácidos limitantes en los granos de cereales, se encuentra en niveles dos veces más altos que los del trigo o el maíz. De acuerdo con experimentos de alimentación animal, la proteína de quinua también tiene una alta digestibilidad. Entre las proteínas de quinua crudas, el 91.6% es absorbible. El tratamiento térmico (cocción) mejora la digestibilidad de la proteína al 95.3%. La alta biodisponibilidad de la quinua se debe en parte a su contenido relativamente bajo de inhibidores de tripsina (TIU, Trypsin Inhibitor Units) que reducen la digestión enzimática y la absorción de proteína con valores de 1.36 a 5.04 TIU / mg, que reducen la digestión enzimática y la absorción de proteína (Graf *et al.*, 2015).

En lo que concierne al almidón corresponde al 58.1% a 64.2% del peso de la semilla seca de quinua, con un índice glucémico bajo. Está constituido principalmente por D-xilosa (120 mg / 100 g) y maltosa (101 mg / 100 g) con bajo contenido de glucosa (19 mg / 100 g) y fructosa (19.6 mg / 100 g). El almidón es altamente ramificado y consiste en pequeños gránulos (tamaño de partícula inferior a 2  $\mu\text{m}$  de diámetro),

que son más pequeños que los tamaños de partículas de los cereales comunes (Vega *et al.*, 2010).

La quinua contiene un 10% de fibra dietética total. Aunque el contenido total de fibra en la quinua es comparable a otros cereales, la composición de la subunidad de monosacáridos de la fibra de quinua se asemeja más a la de las frutas, verduras y leguminosas. La fibra de quinua insoluble, que se compone principalmente de las subunidades de ácido galacturónico, arabinosa, galactosa, xilosa y glucosa, representa el 78% del contenido total de fibra en la quinua. Mientras tanto, la fibra de quinua soluble, compuesta principalmente de glucosa, ácido galacturónico y subunidades de arabinosa, constituye el 22% de la fibra total. El contenido de fibra soluble, que es más alto que el trigo o el maíz (15% cada uno), puede desempeñar un papel en el potencial promotor de la salud de quinua ya que la capacidad de fermentación de la fibra soluble por microbiota colónica se ha reconocido por sus propiedades funcionales (Graf *et al.*, 2015).

### **3.3.2.3 Chía**

El nombre botánico de la chía es *Salvia hispanica* L., perteneciente a la categoría Salvia de la familia *Labiatae*, fue una importante planta alimenticia y médica mesoamericana en la época precolombina. Es una planta anual subtropical que requiere menos agua en comparación con otros cultivos.

En el México colonial, el consumo de semillas de chía, comúnmente conocido solo como chía, disminuyó significativamente y su ingestión se limitó durante mucho tiempo a la bebida tradicional, llamada "agua de chía". Actualmente, se han apreciado los beneficios nutricionales de la semilla de chía y se han reconocido sus beneficios para la salud, a veces a partir de evidencia científica bien respaldada y otras a partir de afirmaciones basadas en tradiciones y creencias populares. Por otro lado, es un hecho que las formulaciones y suplementos basados esencialmente en la semilla de chía están recuperando un lugar en el mercado debido a la creciente preferencia de las personas que intentan seguir una dieta saludable y se benefician de las propiedades conocidas de los compuestos presentes en la semilla de chía (Valdivia López & Tecante, 2015).

A las semillas de chía se les atribuye un alto valor nutritivo, particularmente gracias a su alto contenido de fibra dietética, aproximadamente 30 - 34 g, de los cuales la fracción insoluble (FDI) representa aproximadamente el 85 - 93%, mientras que la fibra dietética soluble (FDS) es aproximadamente el 7 - 15%. En términos de contenido de fibra dietética, las semillas de chía exceden al de las frutas secas, los cereales o las nueces. El mucílago de la capa de semilla de chía está compuesto principalmente de polisacáridos, que pueden absorber 27 veces su peso en agua (Muñoz *et al.*, 2012). Este mucílago o goma posee un alto peso molecular ( $0.8 - 2 \times 10^6$  Da) y un poderoso efecto espesante, por lo tanto, ha sido utilizado como reemplazo de hasta el 25% de huevo o aceite en la elaboración de pasteles con características sensoriales aceptables (Borneo *et al.*, 2010).

El perfil de ácidos grasos es de particular interés. Se caracteriza por altos contenidos de ácidos grasos poliinsaturados, principalmente ácido  $\alpha$ -linolénico (AAL), que representa aproximadamente el 60% de todos los ácidos grasos. Los ácidos linoleico, oleico y palmítico se encuentran en cantidades más bajas. Las semillas de chía tienen un mayor contenido de ácidos omega-3 que la linaza y la relación entre los ácidos omega-6 y omega-3 es alrededor de 3:1.

Las semillas de chía también son una buena fuente de proteína vegetal, que representa aproximadamente el 18 - 24% de su masa y es importante mencionar que no contienen gluten por lo que pueden ser consumidas por pacientes celíacos. En relación a la presencia de fitoquímicos destaca el contenido de polifenoles: ácidos gálico, clorogénico, cinámico y ferúlico, quercetina, kaempferol, epicatequina, rutina, apigenina y ácido *p*-cumárico. Las isoflavonas, como la daidzeína, la gliciteína, la genisteína y la genistina, se encuentran en pequeñas cantidades (Kulczynski *et al.*, 2019).

El uso del 10% de harina de chía en pan LG recibió un puntaje general de aceptabilidad de 8.1 en una escala de 10 puntos, y aumentó los niveles de lípidos, proteínas y fibra dietética en comparación con el pan LG blanco (Sandri *et al.*, 2017). El uso de 30% de harina de semilla de chía en una formulación de fideos LG aumentó el contenido de proteínas, grasas, actividad antioxidante y compuestos

fenólicos totales en comparación con la muestra de control. En este estudio, el contenido de calcio, fósforo, potasio, magnesio, hierro y zinc aumentó en los fideos que contienen semillas de chía y hubo una disminución de la suavidad de la superficie, la apariencia y la puntuación de masticabilidad de las muestras de fideos crudos y cocidos (Levent, 2017).

#### **3.3.2.4 Trigo Sarraceno (alforfón)**

El trigo sarraceno o alforfón (*Fagopyrum esculentum* Möench) es un cultivo anual, se clasifica como pseudocereal por la similitud con los cereales convencionales en su uso y composición química. Entre una variedad de especies, nueve tienen valor agrícola y nutricional, dos de ellas son comúnmente cultivadas: alforfón común (*F. esculentum*) y alforfón tartárico (*F. tartaricum*) (Krkoskova & Mrazova, 2005).

El trigo sarraceno tiene una poderosa adaptabilidad ecológica que permite que la planta crezca en casi todos los tipos de ambientes extremos, absorbe menos agua y menos cantidad de nutrientes del suelo que otros cultivos. Los principales productores son China, Rusia, Ucrania, Kazajistán y también Eslovenia, Polonia, Hungría y Brasil (Wronkowska *et al.*, 2010).

La composición de aminoácidos de las proteínas de alforfón está bien equilibrada y tiene un alto valor biológico (VB), aunque la digestibilidad de la proteína es relativamente baja. Los granos de trigo sarraceno son una fuente importante de nutrientes inorgánicos, tales como: zinc, cobre, manganeso, selenio, potasio, sodio, calcio y magnesio. Con un 80% de ácidos grasos insaturados, más del 40% están constituidos por ácidos grasos poliinsaturados (AGPI). Los contenidos significativos de rutina, catequinas y otros polifenoles, así como su posible actividad antioxidante también son importantes para el valor de la dieta. Además, los granos de trigo sarraceno son una fuente rica de FDT (fibra dietética total), fibra dietética soluble (FDS) y se aplican en la prevención de la obesidad y la diabetes (Christa & Soral, 2008).

Los grañones de trigo sarraceno entero (semillas descascarilladas) contienen 550 mg/g de almidón, 120 mg/g de proteína, 70 mg/g de FDT, 40 mg/g de lípidos, 20 mg/g de hidratos de carbono solubles y 180 mg/g de otros componentes tales como ácidos orgánicos, compuestos fenólicos, taninos, azúcares fosforilados, nucleótidos y ácidos nucleicos (Bonafaccia, et al., 2003).

La harina comercial de trigo sarraceno está compuesta principalmente del endospermo central y contiene 75% de almidón, 6% de proteínas, 1% de lípidos, 1% de carbohidratos solubles, 3% de fibra dietética total, 1% de cenizas y 13% de otros componentes. El salvado de trigo sarraceno es una fuente de FDT y FDS, particularmente salvado con fragmentos de cascarilla (40% de los cuales 25% es fibra dietética soluble), mientras que el salvado sin fragmentos de cascarilla tiene 16% de FDT de los cuales 75% es FDS (Krkoskova & Mrazova, 2005).

La composición aproximada del trigo sarraceno está en línea con otros cereales y pseudocereales consumidos en todo el mundo (Tabla 12). Es importante notar que la fibra de alforfón está libre de ácido fítico, un importante factor antinutricional en el trigo común. La concentración de FDS (77-92 mg / g) en el salvado de trigo sarraceno es mayor en comparación con el salvado de trigo (43 mg / g), o incluso el salvado de avena (72 mg / g). En granos de trigo sarraceno sin cocer, el almidón resistente (AR) a la digestión comprende 303 - 380 g / 100 g de almidón total, pero después de cocinar el AR es de 70 - 100 mg / g. Se observó que los hidratos de carbono solubles se concentran en el embrión, con una baja concentración en el endospermo, pero más alto en el salvado. Dado que el almidón se concentra en el endospermo central, la harina de color claro, la sémola y los granos enteros están compuestos en su mayoría de almidón (Ahmed *et al.*, 2014).

La harina de trigo sarraceno contiene del 8.5% hasta cerca del 19% de las proteínas, dependiendo de la variedad, los pesticidas utilizados y la fertilización que es probable que afecten a la concentración total de proteínas de alforfón (Fornal, 1999). Las principales fracciones de proteína de los granos son albúminas y globulinas solubles en agua y solubles en sal que representan casi la mitad de todas las proteínas de alforfón. El contenido promedio de albúmina es del 21%, mientras que

el más alto alcanza el 30 - 33%. Las prolaminas de trigo sarraceno tienen una característica diferente en comparación con las prolaminas de trigo, cebada y centeno, lo que permite la aplicación de granos de alforfón en la profilaxis de enfermedades del tracto gastrointestinal, principalmente la enfermedad celíaca. Los granos de trigo sarraceno pueden constituir una valiosa fuente de proteínas dietéticas con un alto contenido de aminoácidos indispensables, que es importante para las personas que no toleran las proteínas del gluten o con la deficiencia de proteínas en la dieta (Kreft *et al.*, 1996).

Tabla 12. Comparación de la composición de la harina de trigo sarraceno vs cereales de uso común y pseudocereales (m/g, peso seco).

Cultivo	Proteína	Cenizas	Lípidos	Fibra soluble	Fibra Insoluble	Fibra Total
Trigo	115	17	10	10	15	24
Trigo sarraceno común	110	26	34	12	53	65
Trigo sarraceno tartárico	110	26	34	12	53	65
Avena	126	18	71	33	49	82
Centeno	117	15	18	36	100	136
Quinua	165	38	61	43	96	139
Amaranto	139	21	73	63	82	145

Fuente: Ahmed *et al.*, 2014.

Las proteínas de trigo sarraceno son ricas en arginina y lisina, los aminoácidos primarios que limitan el contenido de proteínas en los cereales, mientras que los contenidos de metionina y treonina en sus proteínas son bajos. Los granos de alforfón contienen del 1.5% al 4% de los lípidos totales, pero el contenido de grasa cruda en la harina de alforfón excede el 3%. Los lípidos libres aislados de los granos de trigo sarraceno constituyen el 2.5% de materia seca, mientras que los lípidos unidos son alrededor del 1.3% materia seca. Se demostró que en la harina de trigo sarraceno el contenido de lípidos libres es mayor que el de los lípidos unidos, pero se observó una situación inversa después del proceso de extrusión. La mayor

concentración de lípidos se encontró en el embrión (7 - 14%), mientras que la más baja en la cascarilla (0.4 - 0.9%) (Christa & Soral, 2008).

### 3.3.3 Otras Fuentes

#### 3.3.3.1 Leguminosas

Las leguminosas de grano abarcan a aquellas especies pertenecientes a la familia *Fabaceae* o *Leguminosae*, cuya utilidad primaria reside en las semillas. La mayoría de ellas pertenecen a la subfamilia *Papilionaceae*, aunque hay especies muy diferentes entre sí. Pertenecen a este grupo los garbanzos (*Cicer arietinum*), las lentejas (*Lens culinaris*), las judías o alubias, frijoles (*Phaseolus vulgaris*), las habas (*Vicia faba*) y las lentejas (*Pisum sativum*). La soya (*Glycine max* L. Merr.) y el cacahuete o maní (*Arachis hypogaea*) son también importantes y se caracterizan por su elevado contenido graso. Otras leguminosas menos importantes para el consumo humano son las almortas o guijas (*Lathyrus sativus*), los altramuces o lupino (*Lupinus albus*, *L. angustifolius*, *L. mutabilis*, *L. luteus*), los fenogrecos o alholvas (*Trigonella foenum-graecum*), los yeros (*Vicia ervilia*) y las algarrobas (*Vicia monanthos*) (diferente de los frutos de los algarrobos *Ceratonia siliqua* y *Prosopis* sp.) (Lutz & León, 2009).

Las leguminosas junto con los cereales son la principal fuente de proteínas en la dieta humana. Mientras que las leguminosas, que son ricas en lisina y triptófano, son deficientes en los aminoácidos azufrados metionina y cisteína, los cereales son deficientes en lisina y triptófano. Por lo tanto, las proteínas de leguminosas mezclados con cereales complementan los respectivos aminoácidos indispensables limitantes (Preddy *et al.*, 2011).

Se las ha caracterizado por la presencia de factores antinutrimientales, los cuales pueden disminuir o eliminarse en etapas de su procesamiento como remojo y cocción (Lutz & León, 2009).

La adición de leguminosas a productos de panificación mejora su calidad nutricional principalmente por el incremento en el contenido y calidad proteica, ya que al combinarlos con cereales se obtiene un mayor valor biológico por complementación.

Sin embargo, la adición de leguminosas a la masa afecta sus características y la calidad de los productos finales. Los cambios se relacionan con el incremento proteico debido a que, al parecer, la incorporación de proteínas exógenas provoca el debilitamiento de la red de gluten en la masa modificando las características del producto final, además de que la adición de leguminosas ocasiona un aumento del contenido de enzimas proteolíticas, afectando la reología de las masas de pan (Bloksma & Bushuk, 1988).

La soya es la leguminosa más comúnmente empleada para el enriquecimiento de pan y otros productos de panificación, ya que proporciona las proteínas y mejora el balance de la composición de aminoácidos. El valor nutricional de la harina de soya es mejor que la de trigo y otros cereales (Preddy *et al.*, 2011).

Las legumbres son una excelente fuente de proteína de buena calidad con un 20 – 45% de proteína con aproximadamente el doble del contenido de los cereales y mayor que la mayoría de los vegetales, por ejemplo, los chicharos y los frijoles están en el lado inferior del rango con 17 - 20% de proteínas, mientras que los altramuces o lupinos y la soya están en el extremo superior del rango con 38 - 45% de proteína (Maphosa & Jideani, 2017).

El componente mayoritario de las legumbres es la fracción de hidratos de carbono, con alrededor del 60% en peso, en la que predomina el almidón. El contenido de FD es cercano al 25%, aunque en las lentejas alcanza un 30.5% y en los garbanzos es ligeramente inferior, con un 17.4% (USDA, 2007). La composición de la FD varía en función de la localización: la testa, donde se encuentra la mayor parte, es rica en celulosa (35 - 57%), pobre en hemicelulosa y pectina y contiene lignina. Las paredes celulares, donde también hay cierta cantidad de FD, están formadas principalmente por pectinas (55%), con bajos contenidos de celulosa (9%) y glucanos (6 - 12%) y carecen de lignina. Las legumbres se caracterizan por poseer ciertos oligosacáridos (esteaquiosa, rafinosa y verbascosa) que el ser humano no puede digerir, debido a la carencia de la enzima  $\alpha$ -galactosidasa (Guillon & Champ, 2002).

Las legumbres no tienen colesterol y generalmente son bajas en grasas, con  $\pm$  5% de energía de la grasa, excepto el cacahuete ( $\pm$  45%), los garbanzos ( $\pm$  15%) y la soya ( $\pm$  47%). La grasa en las legumbres está constituida por cantidades

significativas de ácidos grasos mono y AGPI y prácticamente sin ácidos grasos saturados. La mayor cantidad de AGPI (71,1%) y ácidos grasos monoinsaturados (34%) se encuentran en frijoles y garbanzos, respectivamente e incluyen el ácido linoleico omega-6 esencial (C18:2,  $\omega$  6) y el ácido alfa-linolénico omega-3 (C18:3,  $\omega$ -3) que son esenciales para la salud humana (Maphosa & Jideani, 2017).

El potasio es el nutrimento inorgánico que predomina en las legumbres, con valores que oscilan entre los 1406 mg / 100 g en alubias y 875 mg / 100 g en garbanzos. La cantidad de fósforo también es destacable, con valores alrededor de 400 mg / 100 mg. Otros nutrimentos inorgánicos importantes son el magnesio, el calcio y el hierro (USDA, 2007). Este último sólo es absorbido en un 10%, debido a la presencia de ácido fítico y oxalatos, que dificultan la eficacia de la absorción de los iones ferroso y férrico, la que se ve favorecida por la presencia de vitamina C y grupos sulfhidrilo. La absorción de calcio también se reduce por la presencia de ácido fítico, debido a la formación de fitato cálcico, que es insoluble y se elimina en las heces. Vitaminas importantes en las legumbres son el ácido fólico, la tiamina y la niacina (Pujol, 1998).

### **3.3.3.2 Almidones**

El almidón es uno de los polímeros básicos de almacenamiento en muchas plantas. Se compone de dos tipos de moléculas, amilopectina ramificada y amilosa lineal. En ambos casos, el componente básico es un residuo de  $\alpha$ -D glucopiranososa, que forma enlaces  $\alpha$ -1,4-glucosídicos en la estructura lineal de la amilosa y ramas  $\alpha$ -1,6-glucosídicas adicionales en las moléculas de amilopectina. Las diferencias en la estructura de ambos polímeros dan como resultado una variación significativa en sus propiedades. La amilosa es mucho más propensa al proceso de cristalización, llamada retrogradación, y puede formar geles resistentes y películas fuertes, mientras que la amilopectina podría dispersarse en agua y retroceder mucho más lentamente, lo que resulta en geles suaves y películas débiles (Pérez & Bertoft, 2010).

La adición de agua tiene un efecto obvio sobre los polvos de almidón, ya que los gránulos se pueden conectar a través de sus moléculas, formando una estructura continua con propiedades viscoelásticas y, a un nivel de adición más alto, una

suspensión de gránulos de sedimentación lenta. El comportamiento exacto de dicho sistema depende en gran medida del origen del almidón, pero también de sustancias distintas del almidón, que podrían estar implicadas en su estabilización, como los hidrocoloides, los tensoactivos y otras moléculas solubles en agua. El agua causa la hinchazón de los gránulos de almidón, y su extensión depende del origen del almidón (Witczak *et al.*, 2016).

El tratamiento térmico de los sistemas de almidón con agua genera el hinchamiento de los gránulos, que aumentan el volumen y cambian las propiedades mecánicas. Si el tratamiento se realiza a niveles bajos de humedad se denomina tratamiento de calor y humedad, y da como resultado una serie de cambios en la estructura cristalina de los gránulos, su morfología, susceptibilidad química y enzimática (Hoover, 2010). El proceso aplicado a mayor contenido de agua se denomina recocado y también conduce a un cambio de las propiedades funcionales. Cuando la suspensión espesa de almidón se calienta y agita con cantidades limitadas de agua, el hinchamiento de los gránulos de almidón provoca la formación de una estructura más compacta, que podría observarse por una mayor resistencia de mezcla durante el tratamiento termomecánico. Por encima de cierta temperatura, los gránulos de almidón comienzan a desintegrarse. Los parámetros exactos de esta transición dependen de la naturaleza de los gránulos de almidón, especialmente el tipo de estructura cristalina, la granularidad, la presencia de constituyentes que no son de almidón, pero también el nivel de agua, la velocidad de calentamiento y el método utilizado para controlar este fenómeno (Ratnayake & Jackson, 2009). El siguiente paso es la filtración de amilosa de los gránulos, que se puede observar mediante tinción con yodo o mediciones de viscosidad. La última etapa es una ruptura visible de los gránulos, lo que resulta en una disminución temporal en la viscosidad de la pasta y la susceptibilidad al tratamiento enzimático. Las etapas iniciales de la transición térmica del almidón en el agua se denominan gelatinización, mientras que las últimas se denominan "pegado". Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el uso de estos términos no es uniforme entre los investigadores (Xie *et al.*, 2005).

Al enfriar la pasta de almidón, se forma una estructura tridimensional que consiste en moléculas de amilosa y amilopectina conectadas a través de enlaces de hidrógeno, que podrían unir eficazmente grandes cantidades de agua. Un enfriamiento adicional da como resultado una formación de gel. El fenómeno de la agregación de almidón durante el almacenamiento de alimentos con almidón, conocido como retrogradación, tiene un impacto significativo en otras características de los productos alimenticios. La reconexión de las moléculas de amilopectina a través de enlaces de hidrógeno conduce a cambios de textura de los geles de almidón, incluso aquellos altamente concentrados como el pan, especialmente durante su almacenamiento inicial (24 horas después de la preparación). El proceso puede acelerarse mediante ciclos de congelación / descongelación, en los que las moléculas de agua se separan de los agregados de almidón, dejando un lugar vacío para los enlaces de hidrógeno entre las hélices de glucano. Aunque varios tipos de almidón nativo difieren en la susceptibilidad a la retrogradación, el proceso es inevitable y normalmente conduce al deterioro de la calidad de los alimentos. Esto en gran parte explica el amplio uso de almidones químicamente modificados, que forman redes mucho más estables, en varias ramas de la industria alimentaria (Pietrzyk *et al.*, 2015).

El almidón presente en las células de almacenamiento tiene poco efecto sobre las propiedades de los tejidos vegetales, y es inaccesible para la digestión formando la primera fracción de almidón resistente. Los gránulos de almidón siguen siendo inaccesibles para la mayoría de las enzimas amilolíticas, por ejemplo, en el caso del almidón de plátano que forma la segunda fracción de almidón resistente. El tratamiento mecánico y térmico aplicado durante el procesamiento de los materiales con almidón puede dañar parte de los gránulos y cambiar sus propiedades superficiales, lo que tiene consecuencias directas para la unión del agua, la hinchazón y la susceptibilidad enzimática. El alcance de estos cambios puede estar controlado en gran medida por la elección adecuada de las materias primas. Por ejemplo, el uso de harinas de maíz especiales con niveles variables de amilosa afecta significativamente la textura y la estructura de tortillas y botanas obtenidas. La extrusión, la forma más popular de preparación de botanas también requiere la

elección adecuada de las materias primas. Deben proporcionar suficiente expansión y textura de los productos. El tipo de almidón tiene un papel decisivo en la expansión, ya que su extensión depende directamente de la viscosidad del material que sale del molde del extrusor. Si es demasiado baja, el gas no quedará atrapado, lo que dará como resultado un producto no expandido si es demasiado alta, la expansión será limitada (Guy, 2001).

La superficie grande del endospermo de cereal finamente molido permite la adsorción de cantidades sustanciales de agua, que en combinación con hidrocoloides actúa como un pegamento para partículas de harina y les permite crear una estructura uniforme de masa. El almidón y el agua solos no podrían formar una masa con propiedades mecánicas apropiadas, pero la presencia de cantidades incluso bajas de polisacáridos o proteínas solubles permite la formación de una red viscoelástica que podría moldearse en diversas formas y secarse. La pasta tradicional se basa en sémola de trigo duro, y por lo tanto el gluten es factor principal que afecta a su calidad, pero hay una gama de productos comparables, la que podría estar basada en maíz, arroz o patata dulce y otros materiales ricos en almidón. En estos casos, la calidad del almidón se vuelve especialmente importante. Esto es especialmente válido para algunos fideos asiáticos, en los que la masa está hecha únicamente de almidón nativo y pasta de almidón, preparada a partir de aproximadamente el 5% del almidón total en la formulación (Tan *et al.*, 2009).

La gelatinización del almidón es crucial para hornear el producto. Su extensión, en las condiciones establecidas en un horno, depende fundamentalmente de la estructura cristalina tipo almidón, contenido de amilosa, tamaño y forma del gránulo. Otros componentes de la formulación de la masa pueden modificar el comportamiento del almidón, especialmente al cambiar la disponibilidad de agua. Si se reduce, la gelatinización se retarda, si hay más agua liberada de otros constituyentes de la masa con el calentamiento, el proceso puede lograrse más rápido. Esto a su vez puede influir en la gelificación y la retrogradación del almidón al enfriarse. La apariencia física de los productos horneados depende principalmente de su estructura interna, la distribución de las celdas de gas, la fuerza y la continuidad de sus paredes. El almidón juega un papel importante en

proporcionar una matriz extensible, que podría retener dióxido de carbono, permitir la expansión de la célula en crecimiento, prevenir su coalescencia con células vecinas durante el crecimiento y estabilizar la estructura final al enfriarse (Houben *et al.*, 2012).

El papel del almidón en estos sistemas de baja concentración generalmente está relacionado con su viscosidad. Existe una serie de productos basados en almidones naturales, sin embargo, los más importantes desde el punto de vista industrial son los basados en almidones modificados. El uso de almidones modificados permite una preparación de alimentos más rápida, un mejor control de la viscosidad y mejora la estabilidad de los productos. Aunque la adición de almidón a los productos basados en otros biopolímeros formadores de estructuras, como la proteína animal no es necesaria, podría usarse como agente de carga (como en muchos productos tradicionales) o ayuda tecnológica, lo que podría prevenir la pérdida de agua y mejorar la viscosidad o textura (Witczak *et al.*, 2016).

La eliminación del gluten aumenta la función del almidón al proporcionar estructura y textura a los productos LG. Las fuentes de almidón más importantes en dichos productos son el maíz, el trigo, la tapioca, el arroz y la papa. Si bien el uso de almidones LG naturales no es controvertido, la aplicación de almidón de trigo (también de cebada, centeno y almidón de avena) en los productos con un contenido reducido de gluten podrían ser cuestionables (Capriles & Areas, 2014).

La producción mundial de almidón está en aumento, en tres años (2009-2012) se incrementó en un 25% de aproximadamente 60 millones de toneladas a 75 millones de toneladas (Gallagher E. , *Gluten-Free Food Science and Technology*, 2009). El reciente aumento de la producción se debe a la demanda en los países emergentes, principalmente China y Brasil (+ 10% por año), mientras que otros países tienen un crecimiento del 1% al 2% por año (Avérous & Halley, 2014). La producción estimada de almidón en 2015 fue de aproximadamente 84 millones de toneladas. Según la Asociación Europea de la Industria del Almidón (AAF), las principales áreas de producción de almidón son América del Norte (33%), China (33%), Europa (18%), Sudeste Asiático (11%) y Sudamérica (5%). Norteamérica, China y Europa representan el 84% de la producción mundial. Las 10 principales compañías

productoras de almidón representan este predominio geográfico. En 2010 fueron Cargill (Estados Unidos) con 8.0 millones de toneladas (MT); Ingredion (Westchester, IL, Estados Unidos) con 5.9 MT; ADM (Decatur, IL, Estados Unidos) con 4.7 MT; Tate & Lyle (Londres, Gran Bretaña) con 3.6 MT; Roquette (Lestrem, Francia) con 2.8 MT; Zhucheng Xingmao (Weifang, China) con 2.0 MT; Global Bio-Chem (Hong Kong, China) con 1.5 MT; Tereos Syral (Lille, Francia) con 1.4 MT; COFCO (Beijing, China) con 1.3 MT y Xiwang (Shandong, China) con 0.7 MT (Avérous & Halley, 2014). La producción principal de almidón es para aplicaciones alimentarias. Representa el 60% del mercado, donde los dulces y bebidas representan el 31% y los alimentos procesados, el 29% (Avérous & Halley, 2014).

### **3.4 Aditivos y coadyuvantes tecnológicos usados en la panificación LG**

#### **3.4.1 Hidrocoloides**

Los hidrocoloides (gomas) son diversos polisacáridos hidrófilos de cadena larga con alto peso molecular de diferentes orígenes y estructuras químicas que proporcionan una gama de propiedades funcionales (Anton & Artfield, 2008). Se pueden clasificar según su origen: a) a partir de algas marinas como agar agar y carragenina; b) extractos de plantas como pectina y  $\beta$ -glucano; c) exudados vegetales como goma arábica; d) mucílagos de semillas como goma de algarrobo, goma guar y psyllium; e) sintéticos microbianos como la GX; y f) derivados químicos de celulosa tales como metilcelulosa (MC), carboximetilcelulosa (CMC) e hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC) (Houben *et al.*, 2012).

Los hidrocoloides tienen diferentes funciones como estabilizantes de emulsiones, espumas y suspensiones que permiten mejorar las propiedades reológicas de la masa y a su vez la calidad y la vida útil del pan LG. (Lie & Nie, 2016). Se utilizan como agentes estructurantes para imitar las propiedades viscoelásticas del gluten. Con el mismo objetivo de reforzar la estructura de la masa, también se han

agregado proteínas y enzimas de reticulación a las recetas LG los cuales en conjunto con los hidrocoloides pueden ayudar a crear una red de proteínas (Mir *et al.*, 2016).

El efecto de los hidrocoloides varía de acuerdo con los otros ingredientes utilizados durante la producción de pan LG. La magnitud del efecto hidrocoloide sobre las propiedades de la masa y el pan depende de la estructura química, la cantidad utilizada, las interacciones con otros ingredientes y los parámetros del proceso. Afectan drásticamente el comportamiento de flujo de la masa, aunque esté presente a bajas concentraciones. Se utilizan para mejorar la viscosidad, lo que lleva a la estabilización de los ingredientes al evitar la sedimentación, la separación de fases, el colapso de la espuma y la cristalización. La propiedad de la viscosidad generalmente cambia con la concentración, la temperatura y la velocidad de deformación por cizallamiento de una manera compleja dependiendo del hidrocoloide específico y la presencia de otros ingredientes utilizados para la fabricación de pan LG (Anton & Artfield, 2008).

Los hidrocoloides utilizados con frecuencia en la elaboración de pan LG son el HPMC, goma xantana (GX) y goma guar (GG) ya que proporcionan atributos de calidad específicos para la masa y el producto terminado por lo cual en el estudio realizado por Encina *et al.* en 2019, utilizaron una receta propia con una formulación base de harina de arroz (50%), harina de maíz (30%) y harina de quinua (20%) a la cual se le adiciona: agua (100% en peso de harina), aceite de girasol (6% en peso de harina), azúcar blanca (3% de peso de harina), sal refinada (1.5% de peso de harina), levadura instantánea (3% de peso de harina) y mezclas de hidrocoloides (establecido en 4% de peso de harina); encontraron que la proporción óptima de estos tres hidrocoloides fue de 0.24% GX, 0.60% GG y 3.16% HPMC con la cual se obtuvieron panes de buena calidad en términos de un alto volumen específico (2.57 mL/g), dureza de la miga (2082 g) y densidad celular promedio (0.14 células / mm<sup>2</sup>).

Schober, *et al.*, (2008) investigaron el efecto del HPMC en la elaboración de pan LG fermentado. Se preparó a partir de zeína comercial (20 g), almidón de maíz (80 g),

agua (75 g), sacarosa, NaCl y levadura seca mediante la mezcla por encima de la temperatura de transición vítrea de la zeína ( $T_g$ ) a 40°C. Encontraron que la adición de HPMC (2 g) mejoró significativamente la calidad, y el pan resultante tuvo una apariencia similar al pan de trigo con un grano de miga, regular y fina, una parte superior redonda y buena aireación con un volumen específico de 3.2 ml / g, características superiores al compararlo contra el control sin HPMC el cuál mostro una parte superior plana, miga densa, dura y frágil con un volumen específico de 2.7 mL / g.

Lazaridou *et al.*, (2009) investigaron el efecto de los hidrocoloides sobre la reología de la masa en formulaciones LG basadas en harina de arroz, almidón de maíz y caseinato de sodio (control). Cuando se añadieron pectina, CMC, agarosa y GX a la formulación, el comportamiento reológico de las masas mostró que la GX tenía el efecto más pronunciado sobre las propiedades viscoelásticas, produciendo masas reforzadas. Las propiedades reológicas de la masa mediante mediciones oscilatorias y de fluencia mostraron que la elasticidad y la resistencia a la deformación de las formulaciones de masa LG adicionadas con hidrocoloides seguían el orden de GX > CMC > pectina > agarosa. Además, la adición de GX a la formulación LG dio como resultado una curva de farinógrafo típica de las masas de harina de trigo.

Lorenzo *et al.*, en (2009) estudiaron el efecto de los hidrocoloides en la masa no fermentada refrigerada y congelada. Los resultados revelaron que las formulaciones que contenían GX exhibían la mejor elasticidad y resistencia a la punción, independientemente de otros hidrocoloides presentes en la masa (GG o HPMC). Un panel prefería significativamente la masa de GX / HPMC sobre una masa comercial LG. La masa formulada con GX / GG mostró los valores más altos de módulo elástico, mientras que los valores más bajos correspondieron a las masas HPMC (con o sin GX). Este efecto ha sido atribuido a los grupos hidroxilo en la estructura hidrocoloide que permiten más interacciones de agua a través de puentes de hidrógeno. El uso de HPMC ha dado como resultado panes de miga de pan blando

con mayor volumen específico de pan, propiedades sensoriales mejoradas y una mejor vida útil.

Mariotti *et al.* (2013) estudiaron la influencia de la HPMC y la harina de trigo sarraceno descascarillada e inflada en las propiedades panificadoras de algunas mezclas comerciales de pan LG. La adición de hasta 40% de harina de trigo sarraceno a las dos mezclas comerciales optimizadas de pan LG mejoró sus propiedades de fermentación, que se correlacionaron con la calidad final del pan. La presencia de una cantidad limitada de harina de trigo sarraceno inflado, así como de HPMC, resultó útil para reducir la difusión y la pérdida de agua de la miga de pan, y para limitar las interacciones entre las macromoléculas de almidón y proteína, lo que permite obtener una miga más blanda y una cinética de envejecimiento más lenta durante el almacenamiento.

Mahmoud *et al.*, (2013) evaluaron las propiedades de la masa del pan LG. Los resultados del estudio mostraron que las formulaciones de pan LG basadas en harina de arroz, harina de maíz y mezclas de almidón de papa con diferentes niveles de hidrocoloides permitieron el atrapamiento de burbujas de aire en la masa y proporcionaron estabilidad a la mezcla durante la panificación.

Moreira *et al.*, (2013) investigaron el efecto de los hidrocoloides en la reología de las masas LG a base de castaña y harina de chía. La caracterización reológica de masas de harina de castaña con harina de chía en 4.0 g / 100 g de base de harina y un hidrocoloide (GG, HPMC o goma de tragacanto) en diferentes concentraciones (0.5, 1.0, 1.5, 2.0 g / 100 g) se llevó a cabo a 30 °C usando un reómetro de fuerza controlada. Las mediciones de cizalla ( $0.01-10 \text{ s}^{-1}$ ), oscilatorias ( $1-100 \text{ rad}^{-1}$  a 0.1% de deformación), fluencia-recuperación (carga de 50 Pa durante 60 s) y temperatura de barrido (30 - 100 °C) fueron realizadas. La presencia simultánea de chía e hidrocoloides modificó significativamente las propiedades reológicas de las masas. La viscosidad aparente a tasa constante de cizallamiento, el almacenamiento y los módulos de pérdida a frecuencia angular constante disminuyeron con el aumento del contenido de hidrocoloides, excepto que el módulo de pérdida de la pasta que contenía goma de tragacanto presentaba una tendencia inversa. Los datos de

recuperación lenta mostraron que la elasticidad de la masa mejoró con la presencia de GG (65.9%), HPMC (64.8%) o goma de tragacanto (45.8%) a 1.0, 2.0 y 1.0 (g / 100 g), respectivamente.

Buresova *et al.* (2016) estudiaron el efecto de los suplementos de caseinato de calcio y sodio (2 g / 100 g) sobre el comportamiento de la masa de arroz y trigo sarraceno que se comparó con el efecto de la GX y la CMC. La adición de caseinatos aumentó significativamente el debilitamiento de la masa, que se volvió similar a la masa con GX. Durante el calentamiento, la velocidad de gelatinización se hace similar a la masa con CMC. Además, la viscosidad máxima se redujo mediante la adición de hidrocoloides. Las características del farinógrafo mostraron que la adición de CMC de sodio en la fórmula basada en arroz tiene una influencia positiva en las propiedades reológicas de la masa.

Nicolae *et al.*, 2015 estudiaron las propiedades reológicas de una masa LG con diferentes porcentajes de CMC de sodio añadidos para compensar la falta de gluten. Se usaron masas de harina de trigo y arroz como formulaciones de control en este estudio. Los resultados obtenidos se compararon con la masa de trigo estándar. La curva del farinógrafo mostró una mejora significativa de la masa LG mediante la adición de CMC de sodio; se alcanzó una consistencia de 500 BU, pero el tiempo de desarrollo de la masa fue mayor en comparación con el desarrollo de la masa de trigo. La adición de CMC de sodio ha demostrado un comportamiento reológico apropiado de la masa, lo que conduce a una mayor calidad del pan en volumen y propiedades sensoriales. Las mediciones reológicas mostraron elevadas mejoras para las muestras de masa de arroz con 0.5% y 1% de CMC de sodio, por lo tanto, el farinógrafo indicó una mayor absorción de agua y estabilidad de la masa para estas muestras. Además, el volumen también se incrementó 31% con CMC de sodio al 1% en comparación con la muestra control de la masa de arroz.

Las propiedades tecnológicas de los panes LG son muy importantes para la industria y la aceptabilidad del consumidor. Los análisis instrumentales, que incluyen el contenido de humedad, la actividad acuosa, el volumen específico, el color y los parámetros de textura se han utilizado con frecuencia para caracterizar

los panes LG. La microestructura de migas de pan LG también se caracteriza por el uso de análisis de imágenes o microscopía electrónica de barrido. Además, los atributos sensoriales y la composición nutricional se han utilizado para evaluar la calidad del pan LG (Matos & Rosell, 2012).

El efecto de la mezcla de hidrocoloides en panes LG fue estudiado por Gambus *et al.*, (2001). Los panes se prepararon a partir de almidón de papa, almidón de maíz, harina de maíz y pectina, GG o su mezcla 1:1. Los panes que contenían goma mostraron una mejor calidad en comparación con los elaborados con pectina añadida con respecto al volumen, la pérdida de contenido de humedad de la miga y la eficiencia de la cocción. Sin embargo, el uso de una mezcla de GG y pectina en una proporción de 1:1 eliminó las características de textura no deseadas de los panes que resultaron cuando se usó hidrocoloide único. Además, el pan que contiene la mezcla de GG y pectina mostró el valor de firmeza más bajo. El grado de gelatinización en los panes a base de GG se redujo mediante la sustitución parcial de este hidrocoloide por pectina, lo que disminuyó significativamente el endurecimiento de la miga sin afectar el contenido de humedad.

La GX, HPMC y otros hidrocoloides han sido probados por su potencial como mejoradores de pan y agentes de antienvjecimiento. Los hidrocoloides pueden disminuir la pérdida de contenido de humedad del pan durante el almacenamiento, lo que retrasa el endurecimiento de la miga (Anton & Artfield, 2008).

Las comparaciones texturales de pan LG que GX (1.25%) y GX (0.9%) más goma de konjac (1.5%) han sido estudiadas por Moore *et al.*, (2004). Los resultados mostraron que, independientemente de la adición de hidrocoloides, todos los panes LG fueron frágiles después de 2 días de almacenamiento, con disminuciones en la elasticidad, cohesión y resistencia obtenidas mediante el análisis de perfil de textura (TPA) pero estos efectos fueron menos pronunciados para el pan LG a base de lácteos ya que a través del análisis de microscopía de escaneo láser confocal se mostró que contenía estructuras en forma de red que se asemejan a la del gluten en la miga del pan de trigo, concluyendo que la formación de una fase proteica continua es crítica para una mejor calidad del pan LG.

Las diferencias entre los híbridos de sorgo en los parámetros de calidad de los panes LG fueron estudiadas por Schober *et al.* (2005) usando GX. Los autores observaron que el aumento en el contenido de hidrocoloides disminuye el volumen específico del pan. En consecuencia, la GX mostró efectos negativos sobre la estructura de la miga de los panes de sorgo.

Lazaridou *et al.*, (2007) estudiaron el efecto de los hidrocoloides: pectina, CMC, agarosa, GX y  $\beta$ -glucano, sobre la reología de masas y parámetros de calidad en formulaciones de pan LG basadas en harina de arroz, almidón de maíz y caseinato de sodio (control). Los hidrocoloides fueron adicionados al 1% y 2% p / p (base de harina de arroz) ya que en un intento de aumentar la concentración al 3% resultó en parámetros de calidad reducidos en la mayoría de los casos. Se encontró que al aumentar el nivel de hidrocoloides del 1% al 2%, el volumen del pan disminuyó a excepción de la pectina, además los panes que presentaron volúmenes significativamente mayores y altos valores de porosidad y elasticidad de la miga fueron los adicionados con CMC al 1% y pectina al 2% obteniendo una evaluación aceptable por parte del panel de consumidores. Respecto al almacenamiento de los panes se observaron una reducción en actividad acuosa ( $a_w$ ) y un aumento en la firmeza de la miga (pruebas de compresión). En comparación con el control, la firmeza de la miga no se alteró significativamente con la adición de pectina, CMC y agarosa (al 1 - 2%), y de  $\beta$ -glucano (al 1%); en cambio, la adición de GX (1 - 2%) y  $\beta$ -glucano (2%) resultó en el endurecimiento de la miga.

Demirkesen *et al.*, (2010) evaluaron los efectos de diferentes combinaciones de hidrocoloides y emulsionantes en la calidad de una fórmula de pan LG basada en arroz. Los resultados mostraron que 0.5% de éster de ácido diacetil tartátrico de mono y diglicéridos combinados con 0.5% de GX - GG o mezcla de GX - algarrobo proporcionaron el mejor pan, con buen volumen y textura de miga y los puntajes más altos para la aceptabilidad de textura por lo que el uso de hidrocoloides en conjunto con emulsificantes resulta en buenas propiedades del pan LG.

Mahmoud *et al.* (2013) evaluaron la calidad del pan LG, y los resultados mostraron que las gomas mejoraron significativamente el peso y la redondez del pan LG.

Todas las formulaciones de pan LG fueron sensorialmente aceptables, ya que resultaron en puntajes más altos en características de calidad. Los resultados concluyeron que las formulaciones (harina de arroz, almidón de maíz, almidón de papa, 40:20:40) seguidas por (harina de arroz, almidón de maíz, almidón de papa, 40:40:20) con 3% de GX fueron la mejor formulación para la producción de pan LG.

Hager y Arendt (2013) investigaron la influencia de HPMC, GX y su combinación en panes LG. El efecto de los hidrocoloides en los sistemas modelo LG varió de acuerdo con las materias primas utilizadas. HPMC tuvo un efecto lineal positivo sobre el volumen de panes de teff y maíz y un efecto lineal negativo sobre este parámetro en los panes de arroz, mientras que el volumen de pan de trigo sarraceno no cambió. La adición de GX tuvo un efecto lineal negativo sobre el volumen de la hogaza de todos los panes. La adición de HPMC redujo la dureza de la miga de los panes de teff, trigo sarraceno, maíz y arroz. La GX aumentó la dureza de la miga de teff y panes de trigo sarraceno, mientras que la miga de pan de arroz no tuvo un efecto significativo. Los valores de dureza de la miga de los panes de maíz se redujeron mediante la adición de goma de GX.

Las propiedades físicas, texturales y sensoriales de los panes LG se relacionan en gran medida con su estructura en varios niveles que van desde los niveles moleculares hasta los niveles macroscópicos. La microestructura de las migas de pan proporciona una descripción cuantitativa precisa de las características de las migas de pan en términos del grosor de la pared celular, la forma de la celda, la fracción vacía y la finura de la miga. Por lo tanto, la caracterización de la microestructura tiene un papel esencial en el desarrollo de productos con la calidad deseada. La técnica de microtomografía con rayos X se utilizó con éxito para la caracterización de estructuras de pan LG. Los resultados de la microtomografía de rayos X indicaron que la adición de diferentes gomas o mezclas de goma producía una estructura porosa de migas de pan LG. Las imágenes 2-D y 3-D de migas de pan mostraron que la estructura de la miga de los panes preparados con metilcelulosa y agar era similar a la estructura de migajas de pan de control en términos de heterogeneidad y contenía muchos espacios vacíos. El mayor número

de poros y la porosidad y área promedio de poros más baja se obtuvieron de panes LG preparados con la adición de GX, CMC, GX - GG, GX - algarrobo y HPMC, que se asocia a la textura más fina de los poros. Los valores de dureza, cohesividad y elasticidad de los panes se correlacionaron con su estructura interna en términos de porosidad, número de poros y tamaño promedio de los poros. Se observó que los panes LG con menor dureza y cohesión y valores de elasticidad mayores tenían una porosidad más baja, un mayor número de poros y un tamaño promedio de los poros más bajo (Demirkensen *et al.*, 2014).

Mohammadi *et al.*, (2014) investigaron el efecto de la GX y CMC (5-20 g kg<sup>-1</sup>) en los parámetros de calidad del pan LG, basado en harina de arroz y almidón de maíz. El aumento en la concentración de CMC produjo celdas de gas más grandes, lo que condujo a una mejor apariencia de la porosidad de la miga. El pan que contenía GX mostró el mayor contenido de humedad, por lo que el aumento de la concentración de GX fue más eficaz para disminuir la dureza y aumentar la elasticidad, tanto en panes frescos como almacenados.

Kittisuban *et al.*, (2014) utilizaron la metodología de superficie de respuesta para analizar los efectos de HPMC, levadura  $\beta$ -glucano y aislado de proteína de suero de leche sobre las propiedades físicas del pan LG horneado a partir de fórmulas basadas en almidón de arroz. Los porcentajes de HPMC,  $\beta$ -glucano de levadura y aislado de proteína de suero incorporado afectaron significativamente la relación de dispersión, el volumen específico, la dureza, la cohesión, la masticabilidad y los valores de color de miga L\* y b\*. Sin embargo, la elasticidad, el valor a\* del color de la miga y el contenido de humedad no se vieron significativamente afectados por ninguna formulación investigada. Utilizando la calidad del pan de trigo como referencia, el pan de arroz LG óptimo se produjo incorporando 4.35 g / 100 g de HPMC, 1 g / 100 g de levadura de  $\beta$ -glucano y 0.37 g / 100 g de proteína de suero de leche basada en el peso seco de almidón de arroz en la formulación. Además, se encontró que el pan de almidón de arroz optimizado era aceptable de acuerdo con los resultados del análisis sensorial.

### 3.4.2 Enzimas

Actualmente, las enzimas son ampliamente utilizadas en numerosos procesos de tecnología de alimentos, ya que se consideran compuestos de etiqueta limpia. En particular, la industria de la panificación ha prestado especial atención a la sustitución de varios compuestos químicos por enzimas. Se consideran la mejor y más segura alternativa a los compuestos químicos porque las enzimas son proteínas que tienen la capacidad de catalizar reacciones químicas, pueden etiquetarse como GRAS (generalmente reconocidas como seguros) y no permanecen activas después de la panificación debido a que su estructura proteica se desnaturaliza durante la cocción (Rosell, 2009).

Las enzimas más frecuentemente utilizadas en la panificación son las  $\alpha$ -amilasas, lipasas, proteasas, transglutaminasas, fitasas entre otras, con la finalidad de mejorar las propiedades de la masa, la calidad del producto fresco e incrementar la vida útil del producto. Recientemente ha sido explorado el potencial de las enzimas para ayudar con la formación de estructuras y sinergizar con los mejoradores de la calidad del pan (Haros *et al.*, 2002, Gallagher 2009, Rosell *et al.*, 2001).

#### 3.4.2.1 Transglutaminasa

La transglutaminasa (TGasa) transferasa (EC 2.3.2.13), conduce indirectamente a una conversión de proteínas solubles en polímeros de proteínas insolubles de alto peso molecular a través de la formación de enlaces cruzados covalentes de disulfuro y por lo tanto modifica la funcionalidad de la proteína y promueve la reticulación de proteínas de diferente origen (Larré *et al.*, 2000).

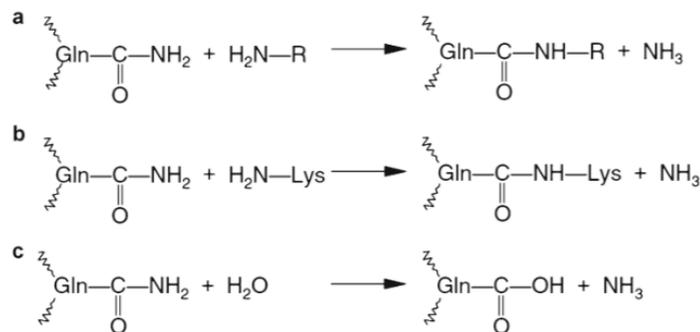


Figura 5. Reacciones catalizadas por TGasa (Martins *et al.*, 2014).

La TGasa es estable a condiciones de pH de 5 a 9 y temperatura de 0 a 60°C. En la figura 5 se aprecia a) catálisis de reacciones de transferencia de acilo entre el grupo  $\gamma$ -carboxiamida de glutamina unida a péptido o proteína (donante de acilo) y aminas primarias (aceptor de acilo) incluyendo el grupo  $\epsilon$ -amino de residuos de lisina; b) cuando el grupo  $\epsilon$ -amino de la lisina unida a proteínas reacciona como un aceptor de acilo, se forman enlaces cruzados intramoleculares y/o intermoleculares (enlaces isopeptídicos), dando como resultado la polimerización de proteínas y c) en ausencia de aminas primarias, el agua puede reaccionar como aceptor de acilo, lo que lleva a la desamidación del residuo de glutamina bajo la formación de ácido glutámico y amoníaco (Martins *et al.*, 2014)..

La TGasa cataliza la reticulación de una gran cantidad de proteínas, incluidas las de leche, soya, caseína, con albúmina, lactoalbúmina, gelatina, miosina, globulina de chícharo o globulina de avena. La TGasa también puede restaurar las propiedades funcionales y bioquímicas del trigo o trigo dañado que se ha sometido a hidrólisis por proteasas. Últimamente, se ha sugerido que la TGasa en productos horneados con trigo puede actuar sobre las proteínas de gliadina para generar el epítipo asociado con la respuesta celíaca; sin embargo, esta hipótesis aún no se ha confirmado (Gerrard & Sutton, 2005).

Uno de los principales problemas asociados con el pan LG es obtener una buena estructura de miga. Gujral & Rosell en 2004 usaron TGasa con harina de arroz para crear una red de proteínas a través de la formación de enlaces cruzados covalentes entre las cadenas polipeptídicas de la harina de arroz. La adición de 1 Unidad de enzima (U) de TGasa / gramo de harina de arroz dio como resultado una reducción

del 36% de los grupos amino libres de la harina de arroz. Incrementos en la concentración de la enzima no promovieron ninguna disminución significativa en la cantidad del grupo amino libre.

Sin embargo, el nivel de TGasa requerido para la formación de la red depende en gran medida de la estructura de la proteína particular y la disposición de los residuos de lisina y glutamina. Una disminución concomitante en la cantidad de grupos tiol libres también se informó como un efecto secundario de la reacción de TGasa. Es muy probable que la reacción de reticulación catalizada por TGasa pueda unir algunos aminoácidos que contienen azufre, lo que conduce a la formación de enlaces disulfuro por reacción espontánea. El resultado de la reticulación de proteínas, catalizada por TGasa, es la formación de una red de proteína capaz de retener la estructura de la masa durante la fermentación y horneado. Se observó una disminución en la dureza de la miga del pan de arroz y un incremento del 14% en el volumen específico. Varios autores han descrito evidencia indirecta de la formación de heteropolímeros por TGasa, como entre caseína y gelatina o aislado de proteína de soja y suero de leche (Jong & Koppelman, 2002).

Se ha sugerido la adición de fuentes externas de proteína para aumentar el número de residuos de lisina, reactivo limitante en la reacción de reticulación. Por ejemplo: harina de soja, leche descremada en polvo o huevo en polvo (12.5% de harina compuesta) a una formulación de pan LG (que contiene harina de arroz, almidón de papa, harina de maíz, GX) en presencia de niveles crecientes de TGasa. Microfotografías confocales de barrido láser de la miga de pan confirmaron la reticulación de proteínas lácteas, aunque se necesitaron cantidades muy altas de TGasa (10 U de TGasa / g de proteína), muy probablemente debido a la incompatibilidad termodinámica entre las superficies polares y apolares de las proteínas lácteas. Los panes LG que contenían leche descremada en polvo y alto nivel de TGasa (10 U) tenían una característica de miga compacta, con un alto número de celdas de aire / cm<sup>2</sup>, determinada por análisis digital de imágenes. Además, el huevo en polvo en presencia de TGasa dio una red de proteínas similar a la del pan de trigo, y también se encontró una mejora en el volumen específico de

pan LG. No se obtuvieron interacciones significativas entre la harina de soya y la TGasa en los panes LG (Moore *et al.*, 2006).

Se evaluó la compatibilidad entre proteínas de harina de arroz y diferentes aislados proteínicos (chícharo, soya, albúmina de huevo y proteínas de suero) en la reacción de reticulación catalizada por TGasa mediante el estudio del comportamiento de la masa de arroz cuando se someten a pequeñas deformaciones. El módulo elástico ( $G'$ ) registrado en las pruebas oscilatorias se vio significativamente afectado tanto por los aislados proteicos como por la TGasa. La extensión del efecto dependía de la fuente de proteína; las proteínas de chícharo y soya aumentaron el módulo elástico, mientras que la albúmina de huevo y la proteína de suero lo disminuyeron. Una evaluación más profunda de posibles enlaces cruzados en presencia de proteínas de soya, usando electroforesis en gel, indicó que las principales fracciones de proteína involucradas en esas interacciones fueron  $\beta$ -conglucina y glicina de soya y las glutelinas de la harina de arroz, aunque albúminas y globulinas también fueron reticuladas. La interacción entre las proteínas de arroz y las proteínas de soya se fortaleció mediante la formación de nuevos enlaces covalentes intermoleculares catalizados por TGasa y también la formación indirecta de enlaces disulfuro. Con respecto a las proteínas de chícharo, la presencia de TGasa dio como resultado la desaparición de numerosas bandas de proteína, con solubilidad reducida. Las principales fracciones de proteína involucradas en esas interacciones fueron las albúminas y las globulinas del aislado de proteína de chícharo y la harina de arroz, pero también las glutelinas estaban entrecruzadas. Los estudios iniciales llevados a cabo con proteínas de soya y chícharo revelaron que su combinación con la TGasa es un buen enfoque para crear una red de proteínas en las masas LG (Rosell, 2009).

#### **3.4.2.2 Glucosa oxidasa**

La glucosa oxidasa (GO) (EC 1.1.3.4.) es una de las enzimas oxidativas más interesantes en la industria alimentaria, con pH y temperatura óptimos de 2 a 7 y 20 a 50 °C respectivamente. Cataliza la oxidación de  $\beta$ -D-glucosa en presencia de  $O_2$ ,

produciendo ácido D-glucónico y una molécula de peróxido de hidrógeno que puede causar la oxidación de unidades de sulfhidrilo libres a partir de proteínas de gluten que dan enlaces disulfuro, o gelificación de pentosanos solubles en agua, cambiando las propiedades reológicas de la masa de trigo (Primo-Martín *et al.*, 2003).

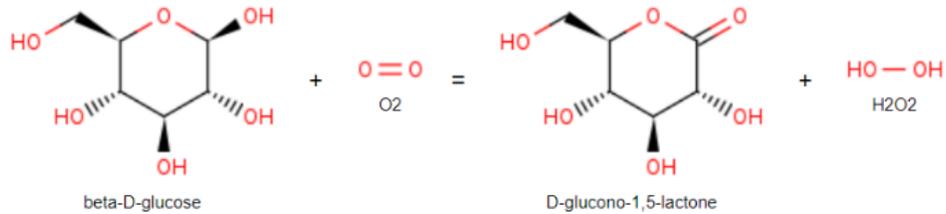


Figura 6. Reacción de catalización por GO (BRENDA, 2020).

Gujral y Rosell (2004) demostraron la capacidad de la GO para modificar las proteínas de la harina de arroz. Sus estudios demostraron que la cantidad de grupos sulfhidrilo en la masa de harina de arroz disminuyó en casi 41.3% cuando se añadió 1 U / g de harina de GO, como consecuencia de la formación de puentes disulfuro, y esta disminución fue en paralelo con el aumento del nivel de GO agregado. El peróxido de hidrógeno liberado de la reacción enzimática causa la oxidación de las unidades de sulfhidrilo libres de la proteína de arroz que dan enlaces disulfuro; esto tiene como resultado una masa más fuerte, además encontraron que el volumen específico de panes de harina de arroz se vio afectado positivamente con la adición de GO, obteniendo un incremento en el volumen específico aumentando la concentración de enzima en la formulación del pan de arroz. Con un alto nivel de adición de GO (3 U / g de harina de arroz), se obtuvo un pan de harina de arroz con un volumen específico de 2.12 cm<sup>3</sup> / g. En el pan de trigo, existe una buena relación entre el volumen específico y la dureza de la miga, y se ha observado la misma tendencia en el pan LG. La dureza de la miga del pan de harina de arroz disminuyó al aumentar los niveles de adición de GO. De hecho, se observó una disminución en la dureza de aproximadamente 42% cuando se añadieron 3 U de GO / g de harina. Este estudio reveló que la adición de GO a la harina de arroz dio como resultado la reticulación de proteínas, evidenciada por una disminución en la

cantidad de grupos amino y tiol libres, y el cambio de los electroforegramas de glutelina de arroz (Gujral & Rosell, 2004B). El aumento observado en los módulos elásticos y viscosos de la masa de harina de arroz también respalda la idea de la formación de una red de proteínas artificiales, que combinada con el efecto de fortalecimiento resultante de la gelificación de los pentosanos podría dar una estructura con funcionalidad similar a la red de gluten.

### **3.4.2.3 Ciclodextrina glicosiltransferasa**

La ciclodextrina glicosiltransferasa (CGTasa) (EC 2.4.1.19) cataliza cuatro reacciones diferentes: (i) ciclación, (ii) acoplamiento, (iii) redistribución e (iv) hidrólisis (Fig.7). Esta enzima es activa a pH 5,0 y temperatura hasta 95 ° C. La CGTasa escinde enlaces  $\alpha$ -1,4 glicosídicos en moléculas de almidón mientras que al mismo tiempo une los extremos reductores y no reductores (reacción de ciclación) para producir moléculas cíclicas. Estas moléculas, llamadas ciclodextrinas, son moléculas circulares cerradas de seis, siete u ocho unidades de glucosa, típicamente denominadas  $\alpha$ -,  $\beta$ - o  $\gamma$ -ciclodextrinas, respectivamente. Se caracterizan por un exterior hidrófilo, soluble en agua y una cavidad hidrofóbica que puede formar complejos de inclusión con una amplia variedad de moléculas huéspedes hidrófobas. Las ciclodextrinas pueden formar complejos con ácidos grasos y emulsionantes que afectan las propiedades reológicas del almidón y por ende su funcionalidad. Las ciclodextrinas que contienen almidón unido exhiben propiedades emulsionantes mejoradas y un menor comportamiento elástico y viscoso (Gujral & Rosell, 2004C).

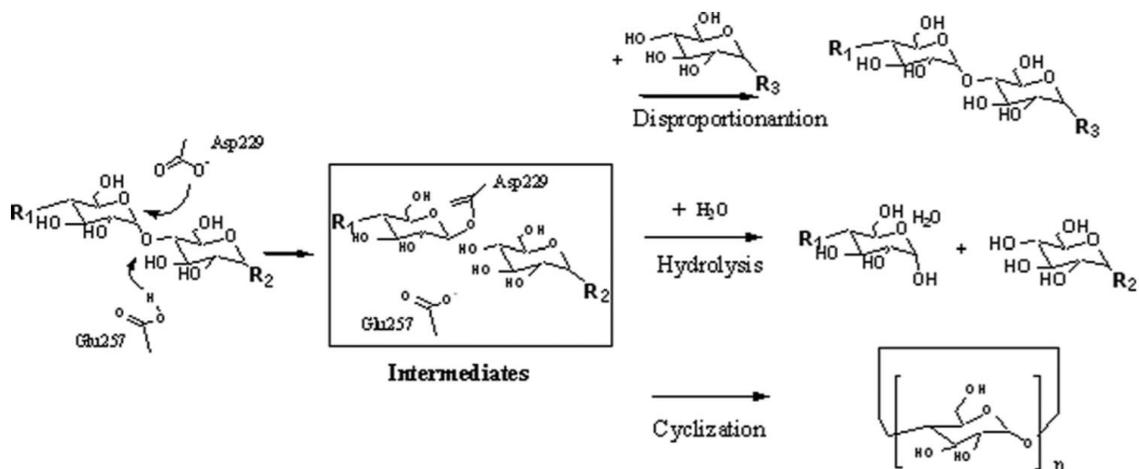


Figura 7. Mecanismo de reacción de CGTasa (Qi & Zimmermann, 2005).

Un diseño experimental fue desarrollado por Gujral *et al.*, (2003) para optimizar el rendimiento de la CGTasa aplicada a una formulación de pan de harina de arroz con HPMC. El volumen específico óptimo, el índice de forma y la textura de la miga en pan LG se obtuvieron usando 0,066 U de CGTasa / 100 g de harina y 4% y 6% de hidrocoloide y aceite, respectivamente. Al duplicar la concentración de la enzima se obtuvo una miga más suave y mayor volumen de pan. Se confirmó la presencia de ciclodextrinas en la miga del pan por método cromatográfico. Por lo tanto, el efecto de mejora de la CGTasa en los panes LG resulta de una combinación de sus actividades de hidrólisis y ciclación. La hidrólisis es responsable de la liberación de ciclodextrinas, que tienen la capacidad de formar complejos con lípidos y proteínas; mientras que la ciclación proporciona los sustratos necesarios para la formación del complejo entre lípidos y proteínas con las ciclodextrinas.

Gujral *et al.*, (2003B) encontraron que la adición de CGTasa también contribuyó a extender la vida útil del pan de arroz, actuando como un agente antienviejimiento a través de su actividad de hidrolización y ciclación.

#### 3.4.2.4 $\alpha$ -Amilasas

Las  $\alpha$ -amilasas (EC 3.2.1.1) son las enzimas que se utilizan con mayor frecuencia en las panaderías comerciales, debido a su efecto positivo sobre el volumen del

pan, la mejora del grano de miga, la corteza y el color de la miga y el desarrollo del sabor (Rosell *et al.*, 2001). La  $\alpha$ -amilasa actúa a un pH y temperatura óptimos de 5 - 7 y 60 - 80 °C respectivamente; es una endoenzima que hidroliza aleatoriamente los enlaces glucosídicos  $\alpha$ -1,4 en los polisacáridos, dando como resultado cadenas cortas que se fermentan adicionalmente mediante levadura, hidroliza el almidón dañado o gelatinizado. Además de ser necesarios para la fermentación, los polisacáridos obtenidos a partir de la actividad hidrolítica también participan en las reacciones de Maillard que tienen lugar durante la cocción (Rosell, 2009).

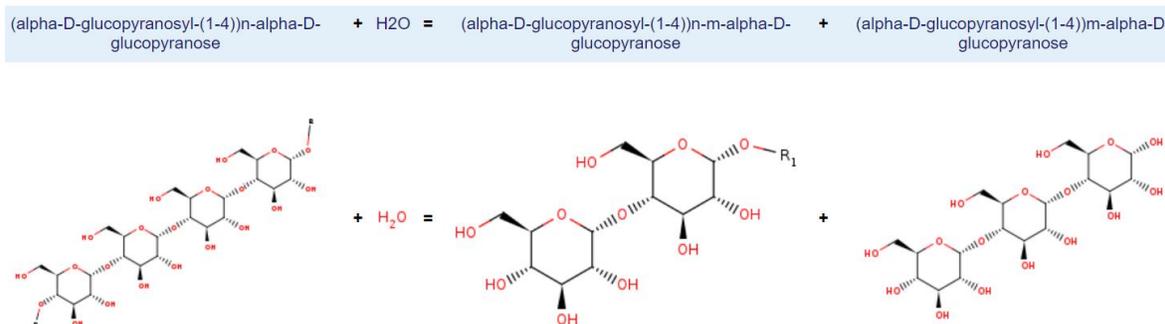


Figura 8. Reacción de  $\alpha$ -amilasa (BRENDA, 2020).

Cuando se añadió  $\alpha$ -amilasa a una receta de pan de arroz, el pan resultante tenía un volumen específico de 3.2 mL / g, que era más alto que el obtenido sin el uso de esta enzima (2.5 mL / g), pero seguía siendo menor que el obtenido con la CGTasa. En relación con la textura de la miga, la presencia de  $\alpha$ -amilasa redujo la dureza de la miga casi en la misma medida que la promovida por la CGTasa sin embargo, la textura de la miga obtenida, es pegajosa (Rosell, 2009).

La  $\alpha$ -amilasa de termoestabilidad intermedia es la enzima más ampliamente utilizada como agente antienviejecimiento, este efecto se ha atribuido a las dextrinas de bajo peso molecular producidas como resultado de la hidrólisis del almidón. Estas dextrinas interfieren con la capacidad de la amilopectina para retrogradar, o con otras interacciones también, es decir almidón-proteína o proteína-proteína involucrado en el endurecimiento. La  $\alpha$ -amilasa de termoestabilidad intermedia mejora la vida útil del pan LG. Una dosificación en unidades de amilosa novo maltogénica, (MANU, por sus siglas en inglés), 600 MANU/ kg de premezcla LG ha

mostrado una mejora significativa en la suavidad de la miga y la elasticidad de un pan LG. Las características de la masa permanecieron sin cambios, por lo que no se requirió ninguna alternancia en el proceso de mezclado. La dureza de la miga del pan LG aumentó con el tiempo de almacenamiento, pero en presencia de  $\alpha$ -amilasa el aumento fue significativamente menor que el observado para el control que no contenía enzima (Novozymes, 2004) .

Todas las enzimas que se utilizan actualmente en la industria de la panificación pueden usarse para productos LG, si están LG. Las empresas que producen mejoradores de pan han resuelto ese problema mediante la producción de preparaciones de enzimas concentradas que no contienen ningún otro compuesto (Rosell, 2009).

### **3.4.3 Aislados de proteínas**

Una práctica común en el procesamiento de alimentos es la de los ingredientes proteicos en la formulación del producto para aumentar sus cualidades, como el sabor, la textura y la estabilidad al almacenamiento. La adición de ingredientes lácteos y de huevo en panificación ha sido ampliamente utilizada porque sus proteínas son altamente funcionales y pueden incorporarse fácilmente en la masa. Estos ingredientes se pueden usar en el pan para beneficios nutricionales y funcionales. El uso de productos lácteos en polvo en formulaciones de productos horneados LG ha dado como resultado una mejoría en los aspectos sensoriales (Gallagher *et al.*, 2003).

Una de las tareas más importantes de la tecnología moderna es generar nuevas estructuras con características que agraden al consumidor al utilizar una gama limitada de ingredientes. Las proteínas son una de las principales clases de moléculas disponibles para conferir atributos texturales, y la reticulación y agregación de moléculas de proteínas se ha citado como uno de los mecanismos más importantes para diseñar estructuras alimentarias con propiedades mecánicas deseables (Storck *et al.*, 2013).

La Figura 9 muestra diferentes proteínas LG usadas en el desarrollo de productos LG, con la finalidad de mejorar el perfil nutricional de los productos LG, además de proporcionar propiedades de formación de estructura y textura (Deora *et al.*, 2014). Las proteínas se agregan a aplicaciones LG para aumentar el módulo elástico mediante enlaces cruzados, mejorar la calidad percibida al aumentar las reacciones de Maillard y el sabor, favoreciendo la estructura con gelificación y ayudando a la formación de espuma (van Riemdsdijk *et al.*, 2011).

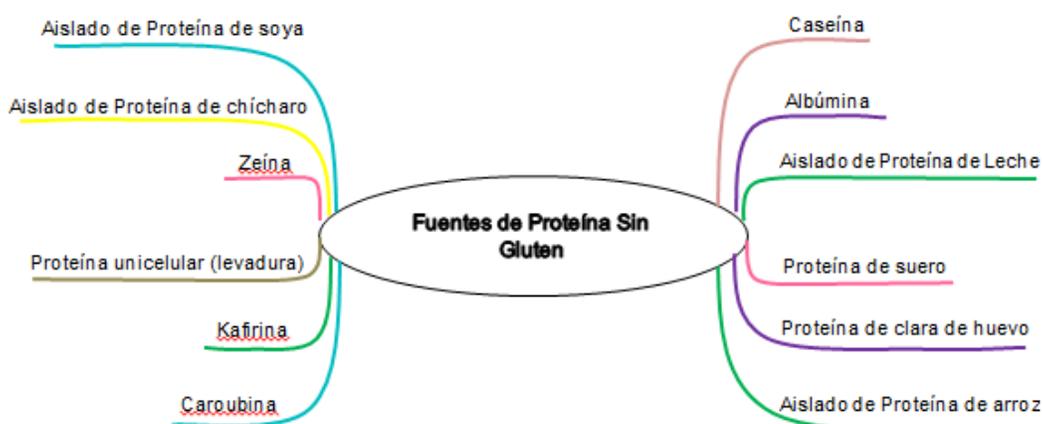


Figura 9. Diferentes fuentes de proteínas LG para el desarrollo de productos LG (Deora *et al.*, 2014).

### 3.4.3.1 Aislados proteínicos de cereales

El concepto de funcionalizar proteínas de cereales diferentes al trigo para imitar la naturaleza viscoelástica del gluten es un campo prometedor, particularmente en el área de productos de panificación LG. Se ha notado que la deficiencia básica es la consistencia de la masa parecida a un batido. Esto hace que los sistemas de masa sean más vulnerables al colapso durante la fermentación y las pruebas, y da como resultado grandes orificios en el centro de la miga de pan. Además, para la producción de productos especializados, que necesitan la formación de una masa

suave como pretzels, baguettes o panes trenzados se vuelven cada vez más difíciles (Deora *et al.*, 2014).

La zeína es la proteína de almacenamiento del maíz, tiene grandes cantidades de residuos hidrofóbicos como leucina, prolina, alanina y fenilalanina, lo que explica sus propiedades hidrofóbicas significativas. Se ha explorado su capacidad para producir masa similar al trigo en el desarrollo de pan LG para individuos que padecen EC y a diferencia del gluten de trigo, no puede formar fibrillas viscoelásticas a temperatura ambiente, aunque puede hacerse funcional de esta manera a temperaturas más altas. La  $\alpha$ -zeína puede formar una red proteica viscoelástica durante la mezcla, si la proteína se mantiene y se mezcla a 35 °C, superior a su temperatura de transición vítrea de 28°C, y un contenido de humedad > 20% (Lawton, 1992).

En uno de los estudios, se encontró que la masa de zeína-almidón en ausencia de hidrocoloides demostró un rendimiento inferior en la producción de pan, mientras que las adiciones de hidrocoloides mejoraron significativamente el volumen y la altura del pan (Andersson *et al.*, 2011). Los autores concluyeron que la zeína no podía imitar las propiedades del gluten por sí misma, pero los hidrocoloides afectaron positivamente las propiedades estructurales y reológicas de la zeína, que produjo una masa similar a la masa de trigo y pan con un mayor volumen.

Otro ejemplo es la kafirina, fracción de prolamina proveniente del endospermo de sorgo, y constituye aproximadamente el 50% de la proteína del grano, una temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) superior a la temperatura ambiente a aproximadamente 28 °C con un contenido de humedad del 20% o superior. En estas condiciones, se puede hacer que la kafirina contribuya a lograr el desarrollo de una masa viscoelástica LG (Oom *et al.*, 2008).

Los estudios sobre la kafirina de sorgo han demostrado que es análogo en muchos aspectos a la zeína del maíz. Las kafirinas son en general más hidrofóbicas que las proteínas promedio y las prolaminas de trigo. Al cocinar calentando en agua hirviendo, la kafirina muestra una disminución en su capacidad para absorber agua debido a cambios conformacionales en la proteína. El grano de sorgo de alta

digestibilidad y alto contenido de lisina (HDHL, por sus siglas en inglés) contiene kafirina, que puede mejorar la red de proteínas de la masa compuesta. Aunque el papel de la kafirina en el desarrollo de productos específicos LG no ha sido investigado hasta ahora, pero considerando sus propiedades análogas en muchos sentidos a los de la zeína, puede ofrecer una solución prometedora en el área de desarrollo de productos LG en un futuro próximo (Deora *et al.*, 2014).

### **3.4.3.2 Proteína de origen lácteo**

En el caso de los productos horneados, las proteínas provenientes de productos lácteos pueden fortalecer la red de la masa con una textura, un color y una reducción del envejecimiento (Arendt & Dal Bello, 2008). Las proteínas lácteas son ingredientes altamente funcionales y debido a su versatilidad se pueden incorporar fácilmente en gran variedad de productos alimenticios. Además de los beneficios funcionales, los productos LG con proteínas lácteas son ricos en calcio y proteínas y, por lo tanto, enriquecidos en aminoácidos indispensables como la lisina, la metionina y el triptófano (Krupa-Kozak *et al.*, 2013).

En el pasado, las proteínas derivadas de la leche demostraron mejorar los productos LG como los panes en términos de preferencia y aumento en el volumen de pan en comparación con el pan control de harina de arroz (Gallagher *et al.*, 2003). La proteína láctea más comúnmente utilizada en la formulación LG son principalmente los caseinatos, concentrado de proteína de suero y aislado de proteína de leche. El uso de hidrocoloides junto con la proteína láctea se está utilizando actualmente como un enfoque popular para el desarrollo de productos LG. Los caseinatos son buenos emulsionantes y estabilizan la mezcla; las proteínas de suero de leche aisladas y concentradas pueden formar geles; La leche descremada en polvo a alta temperatura exhibe una gran capacidad de retención de agua. Aunque existe la inmensa posibilidad de utilizar proteínas lácteas en un producto LG, existe cierta limitación de la proteína a base de leche. Por ejemplo, un individuo que padece inflamación del intestino delgado debido a la EC también está generalmente relacionado con la intolerancia a la lactosa. En segundo lugar, las proteínas de la leche también pueden ser el activador de una reacción alérgica (Schober, 2009).

### **3.4.3.3 Proteínas de suero**

Las proteínas del suero de origen lácteo se consideran aditivos alimentarios naturales con una funcionalidad espesante similar a los hidrocoloides, almidones y otros espesantes en los sistemas alimentarios (Resch & Daubert, 2002). Los concentrados de proteínas de suero de leche (WPC, por sus siglas en inglés) se pueden usar para superar el debilitamiento indeseable de la red de gluten en productos de masa congelada (Asghar *et al.*, 2009). La adición de WPC puede modificar las propiedades reológicas de la pasta de empanadas (comida tradicional en Argentina) aumentando la extensibilidad y disminuyendo la tenacidad de la masa (Lupano, 2003). Además de su papel positivo en la mejora del valor nutricional del producto, en los últimos años, las proteínas de suero de leche han mostrado una inmensa posibilidad como ingrediente de estructuración para el desarrollo de productos LG (Krupa-Kozak, *et al.*, 2013).

La aplicación de TGasa junto con la proteína de suero se puede utilizar para desarrollar la red de proteínas y modificar las propiedades reológicas de la masa de arroz. Se ha estudiado el uso de la enzima TGasa para comprender la compatibilidad entre proteínas de harina de arroz y diferentes proteínas en la reacción de entrecruzamiento catalítico. En uno de estos estudios, se reveló el efecto de diferentes aislados proteicos (chícharo, soya, albúmina de huevo y proteínas de suero) y TGasa sobre las propiedades de la harina de arroz (Marco & Rosell, 2008). El módulo elástico registrado en las pruebas oscilatorias se vio significativamente afectado tanto por las proteínas aisladas como por los TGasa. La extensión del efecto dependía de la fuente de proteína; las proteínas de chícharo y soya aumentaron el módulo elástico, mientras que la albúmina de huevo y la proteína de suero lo disminuyeron.

### **3.4.3.4 Caseína**

Es una proteína que se encuentra en la leche y se usa de forma independiente en muchos alimentos como agente aglutinante. Se ha encontrado que la adición de caseinato de sodio en la formulación LG además del aumento en el valor nutritivo

afecta las características de la corteza y la miga del pan sin LG, además que el aumento en los niveles de inclusión del polvo de caseinato de sodio disminuía el volumen del pan, así como la ligereza de la corteza aumentaba la dureza de la miga y el volumen específico, recibía buenos puntajes de aceptabilidad en las pruebas sensoriales (Gallagher *et al.*, 2003). Complementar la formulación LG con polvos lácteos de alto contenido proteico duplicó el contenido proteínico de los panes. Por lo tanto, existe la posibilidad de utilizar caseinato en formulaciones LG con el objetivo de aumentar los beneficios nutricionales y funcionales.

La incorporación de caseína en muffins LG basados en arroz aumentaba su volumen específico. Además, los resultados generales indicaron que tanto las propiedades reológicas de los batidos como las características tecnológicas del muffin están dominadas por la presencia del tipo de proteína utilizada en las formulaciones. En general, los autores encontraron que los muffins con mejor apariencia visual eran aquellos que contenían caseína. Por lo tanto, la caseína puede desempeñar un papel importante en el desarrollo de productos de panificación LG. Sin embargo, la investigación adicional debe enfocarse en el futuro para determinar la calidad sensorial y la aceptabilidad del consumidor (Matos, et al., 2014).

#### **3.4.3.5 Proteína de huevo**

Los huevos se usan debido a sus propiedades espumantes y emulsionantes, y para crear una buena estructura y forma de la miga. Las proteínas del huevo forman películas cohesivas que son esenciales para la formación estable de espuma y retención de gases durante la cocción, y ayudan a construir la estructura en panes LG (Houben *et al.*, 2012)

Matos, et al., 2014 investigaron la funcionalidad de diferentes proteínas aisladas (aislado de proteína de soya, proteína de chícharo, proteína de clara de huevo, caseína) sobre las propiedades reológicas y de calidad de muffins LG basados en arroz. Se encontró que la caseína y la proteína de clara de huevo aumentaban el volumen específico de los muffins en comparación con otros aislados proteicos.

Además, los muffins con mejor apariencia visual eran los que contenían proteína de clara de huevo o caseína.

Según Storck *et al.*, 2013, el uso de TGasa en combinación con proteína de huevo tiene un efecto positivo en el volumen específico de producto horneado LG junto con la disminución en la dureza de la miga. Por lo tanto, el uso de aislados de proteína de albúmina y caseína y TGasa constituyen un enfoque prometedor para producir mezclas enriquecidas en proteínas para fabricar productos fermentados (Deora *et al.*, 2014).

#### 4. Conclusiones

- El desarrollo de productos de panificación LG responde principalmente a la necesidad de aquellos individuos diagnosticados con enfermedades relacionadas a la ingesta de gluten, con características parecidas a sus homólogos con gluten representando un reto para la industria de alimentos.
- Las principales enfermedades diagnosticadas relacionadas con la ingesta de gluten son, la enfermedad celiaca, la sensibilidad al gluten no celiaca y la alergia al trigo. Se ha relacionado el consumo de gluten con trastorno de hiperactividad, trastorno del espectro autista y dermatitis herpetiforme, entre otras.
- Se ha observado un incremento exponencial del 245% en el lanzamiento de productos LG del 2011 al 2016 a nivel mundial.
- Para el desarrollo de productos de panificación LG se han usado distintos tipos de ingredientes como cereales (maíz, arroz, sorgo, teff, mijo) pseudocereales (amaranto, quinua, chía, trigo sarraceno), leguminosas, almidones, hidrocoloides, enzimas y aislados de proteínas de los cuales, la harina de arroz, maíz y quinua junto con los hidrocoloides GX, GG y HPMC, se obtuvieron panes de buena calidad, con características más similares a las proporcionadas por el gluten.

## 5. Bibliografía

Ahmed, A., Khalid, N., Ahmad, A., Abbasi, N. A., Latif, M., & Randhawa, M. A. (2014). Phytochemicals and biofunctional properties of buckwheat: A review. *Journal of Agricultural Science*, 349-369.

Andersson, H., Öhgren, C., Johansson, D., Kniola, M., & Stading, M. (2011). Extensional flow, viscoelasticity and baking performance of gluten-free zein-starch doughs supplemented with hydrocolloids. *Food Hydrocolloids*, 1587-1595.

Anton, A. A., & Artfield, S. D. (2008). Hydrocolloids in gluten-free breads: A review. *Int J Food Sci Nutr*, 11-23.

Arendt, E. K., & Dal Bello, F. (2008). Functional cereal products for those with gluten intolerance. En H. BR, *Technology of Functional Cereal Products* (págs. 446-475). Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited.

Asghar, A., Anjum, M. F., Allen, J. C., Daubert, C. R., & Rasool, G. (2009). Effect of modified whey protein concentrates on empirical and fundamental dynamic mechanical properties of frozen dough. *Food Hydrocolloids*, 1687-1692.

Avérous, L., & Halley, P. J. (2014). Starch Polymers: From the Field to Industrial Products. En P. A. Halley, *Genetic Engineering to Green Applications* (págs. 1-8). Nueva York, EU: Elsevier.

Becker, R., Wheeler, E., Lorenz, K., & Stafford, A. (1981). A Compositional Study of Amaranth Grain. *Journal of Food Science*, 1175-1180.

Bejosano, F., & Corke, H. (1998). Effect of Amaranthus and buckwheat protein concentrates on wheat dough properties and on noodle quality. *Cereal Chemistry*, 171-176.

Bloksma, A., & Bushuk, W. (1988). *Rheology and chemistry of dough*. En: *Wheat Chemistry and Technology*. St Paul, MN: American Association of Cereal Chemists.

Bokhari, F., Derbyshire, E., Li, W., Brennan, C., & Stojceska, V. (2012). A study to establish whether food-based approaches can improve serum iron levels in child-bearing aged women. *Journal of Human Nutrition and Dietetics*, 25(1), 95-100.

- Bonafaccia, G., Marocchini, M., & Kreft, I. (2003). Composition and technological properties of the flour and bran from common and tartary buckwheat. *Food Chemistry*, 9-15.
- Borneo, R., Aguirre, A., & León, A. E. (2010). Chia (*Salvia hispanica* L) gel can be used as egg or oil replacer in cake formulations. *American Dietetic Association*, 946-949.
- Brasil, T., Capitani, C., Takeuchi, K., & Ferreira, T. A. (Julio de 2015). Physical, chemical and sensory properties of gluten-free kibbeh formulated with millet flour (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.). *Food Science and Technology (Campinas)*, 35(2), 361-367.
- BRENDA. (20 de Junio de 2020). *Braunschweig Enzyme Database. Institute of Biochemistry and Bioinformatics at the Technical University of Braunschweig*. Obtenido de <https://www.brenda-enzymes.org>
- Bultosa, G. (2007). Physicochemical characteristics of grain and flour in 13 tef [*Eragrostis tef* (Zucc.) Trotter] grain varieties. *Journal of Applied Sciences Research*, 2042-2051.
- Buresova, I., Masaríková, L., Hrivna, L., Kulhanová, S., & Bures, D. (2016). The comparison of the effect of sodium caseinate, calcium caseinate, carboxymethyl cellulose and xanthan gum on rice-buckwheat dough rheological characteristics and textural and sensory quality of bread. *LWT - Food Science and Technology*, 659-666.
- Capriles, V. D., & Areas, J. A. (2014). Novel approaches in gluten-free breadmaking: interface between food science, nutrition and health. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 13(5), 871-890.
- Capriles, V. D., dos Santos, F. G., & Areas, J. A. (2016). Gluten-free breadmaking: Improving nutritional and bioactive. *Journal of Cereal Science*, 83-91.
- Carballido L., C., Darias D., C., & Fernández B., A. (2013). Dermatitis herpetiforme. Presentación de un caso. *Rev Méd Electrón [Internet]*, 35(2).

Carmona, I. (25 de Noviembre de 2013). *Agrimundo, Inteligencia Competitiva para el Sector Agroalimentario*. Recuperado el 22 de Febrero de 2016, de <http://www.agrimundo.cl/?publicacion=situacion-actual-y-perspectivas-del-mercado-para-productos-especiales>

Carrasco, N., Zamora, M., & Melin, A. (2011). *Manual del Sorgo*. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

Catassi, C., Bai, J., Bonaz, B., Bouma, G., Calabró, A., & Carroccio, A. (2013). Non-Celiac Gluten Sensitivity: The New Frontier of Gluten. *Nutrients*, 3839-35.

Cauvain, S. P. (2014). Other Cereals in Breadmaking. En S. Cauvain, *Technology of breadmaking* (págs. 377-397). Suiza: Springer.

Christa, K., & Soral, M. (2008). Buckwheat Grains and Buckwheat Products – Nutritional and Prophylactic Value of their Components – a Review. *Czech Journal Food Science*, 153-162.

Cobos Quevedo, O., Hernández, Hernández, G., & Remes Troche, J. (2017). Trastornos relacionados con el gluten: panorama actual. *Med Int Méx.*, 487-502.

Cornejo, F., & Rosell, C. M. (2015). Physicochemical properties of long rice grain varieties in relation to gluten free bread quality. *LWT- Food Science and Technology* 62, 1203-1210.

De Albertis, P. (Octubre de 2016). *Current Trends in Gluten Free Foods*. Roma, Italia.

Demirkesen, I., Kelkar, S., Campanella, O. H., Sumnu, G., Sahin, S., & Okos, M. (2014). Characterization of structure of gluten-free breads by using X-ray microtomography. *Food Hydrocolloids*, 37-44.

Demirkesen, I., Mert, B., Sumnu, G., & Sahin, S. (2010). Rheological properties of gluten-free bread formulations. *Journal of Food Engineering*, 295-303.

Deora, N. S., Deswal, A., & Mishra, H. N. (2014). Functionality of alternative protein in gluten-free product development. *Food Science and Technology International*, 364-379.

Diario Oficial de la Federación Europea. (2009). *REGLAMENTO (CE) No 41/2009 DE LA COMISIÓN*. Bruselas.

do Nascimento, A. B., Fiates, G. M., dos Anjos, A., & Teixeira, E. (2014). Gluten-free is not enough – perception and suggestions of celiac consumers. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 394-398.

Encina-Zelada, C. R., Cadavez, V., Teixeira, J. A., & Gonzalez-Barron, U. (2019). Optimization of Quality Properties of Gluten-Free Bread by a Mixture Design of Xanthan, Guar, and Hydroxypropyl Methyl Cellulose Gums. *Foods*, 1-23.

FAO. (2004). Obtenido de Rice is life: <http://www.fao.org/rice2004/en/f-sheet/factsheet3.pdf>

FAO. (Julio de 2011). *Quinoa: an ancient crop to contribute to world food security*. Obtenido de <http://www.fao.org/3/aq287e/aq287e.pdf>

FAO. (2017). (FAOSTAT, Editor, & F. a. Nation., Productor) Obtenido de <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>

FAO. (20 de 06 de 2020). *FAOSTAT*. Obtenido de [http://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries\\_by\\_commodity](http://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity)

*Federación de Asociaciones de Celiacos de España*. (Marzo de 2019). Recuperado el 2019, de [celiacos.org: https://celiacos.org/enfermedad-celiaca/enfermedades-asociadas/](https://celiacos.org/enfermedad-celiaca/enfermedades-asociadas/)

Fornal, L. (1999). Chemizm nasion gryki i kierunki spozywczego wykorzystania. *Biuletyn Naukowy. Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie*, 7-17.

Gallagher, E. (2009). *Gluten-Free Food Science and Technology*. Oxford, UK: Wiley-Blackwell.

Gallagher, E. (2009). Improving gluten-free bread quality through the application of enzymes. *Agro Food Industry hi-tech*, 34-37.

Gallagher, E., Gormley, T. R., & Arendt, E. K. (2003). Crust and crumb characteristics of gluten free breads. *Journal of Food Engineering*, 153-161.

Gallagher, E., Kunkel, A., Gormley, T. R., & Arendt, E. K. (2003). The effect of dairy and rice powder addition on loaf and crumb characteristics, and on shelf life (intermediate and long-term) of gluten-free breads stored in a modified atmosphere. *European Food Research Technology*, 44-48.

Gambus, H., Nowotna, A., Ziobro, R., Gumul, D., & Sikora, D. (2001). The effect of use of guar gum with pectin mixture in gluten-free bread. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*, 1-13.

Gebremariam, M. M., Zarnkow, M., & Becker, T. (2012). Teff (*Eragrostis tef*) as a raw material for malting, brewing and manufacturing of gluten-free foods and beverages: a review. *Journal Food Science Technology*, 2881-2895.

Gélinas, B., & Seguin, P. (2007). Oxalate in grain amaranth. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 4789-4794.

Gerrard, J. A., & Sutton, K. H. (2005). Addition of transglutaminase to cereal products may generate the epitope responsible for coeliac disease. *Trends Food Science and Technology*, 510-512.

*Global Pathfinder Report: Food Intolerance Products*. (Septiembre de 2012). Obtenido de Minister of Agriculture and Agri-Food Canada: [http://publications.gc.ca/collections/collection\\_2012/agr/A74-2-2012-12-eng.pdf](http://publications.gc.ca/collections/collection_2012/agr/A74-2-2012-12-eng.pdf)

Graf, B. L., Rojas-Silva, P., Rojo, L. E., De la Torre, J., Baldeón, M., & Raskin, I. (2015). Innovations in Health Value and Functional Food Development of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 14, 431-445.

Guillon, F., & Champ, M. (2002). Carbohydrate fractions of legumes: Uses in human nutrition and potential for health. *British Journal Of Nutrition*, 293-306.

- Gujral, H. S., & Rosell, C. M. (2004 B). Improvement of the breadmaking quality of rice flour by glucose oxidase. *Food Research International*, 75-81.
- Gujral, H. S., & Rosell, C. M. (2004 C). Modification of pasting properties of wheat starch by cyclodextrin glycosyltransferase. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1685-1690.
- Gujral, H. S., & Rosell, C. M. (2004). Functionality of rice flour modified with a microbial transglutaminase. *Journal of Cereal Science*, 225-230.
- Gujral, H. S., Guardiola, I., Carbonell, J. V., & Rosell, C. M. (2003). Effect of cyclodextrin glycosyl transferase on dough rheology and bread quality from rice flour. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 3814-3818.
- Gujral, H. S., Haros, M., & Rosell, C. M. (2003 B). Starch Hydrolyzing Enzymes for Retarding the Staling of Rice Bread. *Cereal Chemistry*, 750-754.
- Guy, R. (2001). Raw materials for extrusion cooking. En *Extrusion Cooking* (págs. 5-28). Abington, Cambridge: Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition.
- Guzmán Maldonado, S. H., & Paredes López, O. (1999). *Biotechnology for the improvement of nutritional quality*. Lancaster, EU: Technomic PC.
- Hager, A. S., & Arendt, E. K. (2013). Influence of hydroxypropylmethylcellulose (HPMC), xanthan gum and their combination on loaf specific volume, crumb hardness and crumb grain characteristics of gluten-free breads based on rice, maize, teff and buckwheat. *Food Hydrocolloids*, 195-203.
- Hager, A. S., Wolter, A., Jacob, F., Zanini, E., & Arendt, E. K. (2012). Nutritional properties and ultra-structure of commercial gluten free flours from different botanical sources compared to wheat flours. *Journal Cereal Science*, 239-247.
- Haros, M., Rosell, C. M., & Benedito, C. (2002). Effect of different carbohydrases on fresh bread texture and bread staling. *European Food Research and Technology*, 425-430.

Heading, R., Paterson, W., McClelland, D., & Barnetson, R. (1976). Clinical response of dermatitis herpetiformis skin lesions to a gluten-free diet. *British Journal of Dermatology*, 509-14.

Hoover, R. (2010). The Impact of Heat-Moisture Treatment on Molecular Structures and Properties of Starches Isolated from Different Botanical Sources. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 835-847.

Houben, A., Hochstotter, A., & Becker, T. (2012). Possibilities to increase the quality in gluten-free bread production: an overview. *Eur Food Res Tech*, 195-208.

Jackson, J. R., Eaton, W. W., Cascella, N. G., Fasano, A., & Kelly, D. L. (2011). Neurologic and Psychiatric Manifestations of Celiac Disease and Gluten Sensitivity. *The Psychiatric quarterly*, 91-102.

Jancurová, M., Minarovicová, L., & Dandár, A. (2009). Quinoa – a Review. *Czech Journal Food Science*, 71-79.

Jaramillo, M., Peña, M., Angulo, I., León, A., & Obispo, N. (1993). Valor nutricional de cultivares de sorgo granifero [*Sorghum bicolor* (L) Moench] altos en taninos producidos en Venezuela. *Zootecnia Tropical*, 129-150.

Jong, G., & Koppelman, S. J. (2002). Transglutaminase Catalyzed Reactions: Impact of Food Applications. *Journal of Food Science*, 2798-2806.

Kaleab, B. (septiembre de 2014). *Teff: nutrient composition and health benefits*. Recuperado el 24 de 05 de 2017, de [https://www.researchgate.net/profile/Kaleab\\_Baye2/publication/266316373\\_Teff\\_Nutrient\\_Composition\\_and\\_Health\\_Benefits/links/542c24320cf277d58e8b0b42.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Kaleab_Baye2/publication/266316373_Teff_Nutrient_Composition_and_Health_Benefits/links/542c24320cf277d58e8b0b42.pdf)

Kapri, M., Verma, D. K., Kumar, A., Billoria, S., Mahato, D., & Srivastav, P. P. (2017). Modified Pearl Millet starch: a review on chemical modification, characterization and functional properties. En M. R. Goyal, & D. K. Verma, *Engineering Interventions in Agricultural Processing* (págs. 192-226). USA: CRC Apple Academic Press.

Kilander, A., Gillberg, R., Kastrup, W., Mobacken, H., & Nilsson, L. (1985). Serum Antibodies to Gliadin and Small-Intestinal Morphology in Dermatitis Herpetiformis: A

Controlled Clinical Study of the Effect of Treatment with a Gluten-Free Diet. *Scandinavian Journal of Gastroenterology*, 951\_8.

Kittisuban, P., Ritthiruangdej, P., & Supphantharika, M. (2014). Optimization of hydroxypropylmethylcellulose, yeast  $\beta$ -glucan, and whey protein levels based on physical properties of gluten-free rice bread using response surface methodology. *LWT - Food Science and Technology*, 738-748.

Klimczak, I., Malecka, M., & Pacholek, B. (2002). Antioxidant activity of ethanolic extracts of amaranth seeds. *Nahrung-Food*, 184-186.

Kreft, S., Ikeda, S., & Bonafaccia, G. (1996). Dietary value of buckwheat. *Research Reports Biotechnical Faculty of the University of Ljubljana*, 73-78.

Krkoskova, B., & Mrazova, Z. (2005). Prophylactic components of buckwheat. *Science Direct*, 561-568.

Krupa-Kozak, U., Baczek, N., & Rosell, C. M. (2013). Application of Dairy Proteins as Technological and Nutritional Improvers of Calcium-Supplemented Gluten-Free Bread. *Nutrients*, 4503-4520.

Kulczynski, B., Kobus-Cisowska, J., Taczanowski, M., Kmiecik, D., & Gramza-Michałowska, A. (2019). The Chemical Composition and Nutritional Value of Chia Seeds—Current State of Knowledge. *Nutrients*, 1-16.

Larré, C., Denery, S., Popineau, Y., Deshayes, G., Desserme, C., & Lefebvre, J. (2000). Biochemical Analysis and Rheological Properties of Gluten Modified by Transglutaminase. *Cereal Chemistry*, 121-127.

Latham, M. C. (2002). *Nutrición Humana en el mundo en desarrollo*. Recuperado el 27 de Abril de 2017, de Colección FAO: Alimentación y nutrición N° 29: <http://www.fao.org/docrep/006/w0073s/w0073s0u.htm>

Lawton, J. W. (1992). Viscoelasticity of Zein-Starch Doughs. *Cereal Chemistry*, 351-355.

Lazaridou, A., & Biliaderis, C. G. (2009). Gluten-Free Doughs: Rheological Properties, Testing Procedures – Methods and Potential Problems. En E. Gallagher, *Gluten Free Food Science and Technology* (págs. 52-82). Dublin: Blackwell Publishing Professional.

Lazaridou, A., Duta, D., Papageorgiou, M., Belc, N., & Biliaderis, C. G. (2007). Effects of hydrocolloids on dough rheology and bread quality parameters in gluten-free formulations. *Journal of Food Engineering*, 1033-1047.

Levent, H. (2017). Effect of partial substitution of gluten-free flour mixtures with chia (*Salvia hispanica* L.) flour on quality of gluten-free noodles. *Journal Food Science Technology*, 1971-1978.

Liang, S., & Liang, K. (2019). Millet grain as a candidate antioxidant food resource: a review. *International Journal of Food Properties*, 1652-1661.

Lie, J. M., & Nie, P. S. (2016). The functional and nutritional aspects of hydrocolloids in foods. *Food Hydrocolloids*, 53, 46-61.

Ljunghall, K., Scheynius, A., Jonsson, J., Schilling, W., & Forsum, U. (1983). Gluten-Free Diet in Patients With Dermatitis Herpetiformis. *Archives of Dermatology*.

Lorenzo, G., Zaritzky, N. E., & Califano, A. N. (2009). Rheological characterization of refrigerated and frozen non-fermented gluten-free dough: Effect of hydrocolloids and lipid phase. *Journal of Cereal Science*, 255-261.

Lupano, C. E. (2003). Discs for `Empanadas` with Whey Protein Concentrate. *Journal of Technology*, 182-186.

Lutz, M., & León, A. (2009). *Aspectos nutricionales y saludables de los productos de panificación*. Chile: Universidad de Valparaíso Chile.

Mahmoud, R. M., Yousif, E. I., Gadallah, M. E., & Alawneh, A. R. (2013). Formulations and quality characterization of gluten-free Egyptian balady flat bread. *Annals of Agricultural Science*, 19-25.

- Maphosa, Y., & Jideani, V. (2017). The Role of Legumes in Human Nutrition. En *Functional Food - Improve Health through Adequate Food* (págs. 103-121). Intech.
- Maradini Filho, A. M. (2017). Quinoa: Nutritional Aspects. *Journal of Nutraceuticals and Food Science*, 1-5.
- Marco, C., & Rosell, C. M. (2008). Effect of different protein isolates and transglutaminase on rice flour properties. *Journal of Food Engineering*, 132-139.
- Mariotti, M., Pagani, M. A., & Lucisano, M. (2013). The role of buckwheat and HPMC on the breadmaking properties of some commercial gluten-free bread mixtures. *Food Hydrocolloids*, 393-400.
- Marketsandmarkets. (2015). *Gluten-Free Products Market by Type (Bakery Products, Pizzas & Pastas, Cereals & Snacks, Savories, and Others), Source (Oilseeds & Pulses, Rice & Corn, Dairy & Meat Products, and Other Crops), & by Region - Global Trends & Forecast to 2020*.
- Martins, I., Matos, M., Costa, R., Silva, F., Ananias, P., Estevinho, L., & Branco, A. (2014). Transglutaminases: Recent achievements and new sources. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 6957-6964.
- Masih, J., & Sharma, A. (2016). Study on Consumer Behaviour and Economic Advancements of Gluten Free Products. *American Journal of Experimental Agriculture*, 1-10.
- Matos, M. E., & Rosell, C. M. (2012). *Quality Indicators of Rice-Based Gluten-Free Bread-Like Products: Relationships Between Dough Rheology and Quality Characteristics*. Springer Science+Business Media.
- Matos, M. E., Sanz, T., & Rosell, C. M. (2014). Establishing the function of proteins on the rheological and quality properties of rice based gluten free muffins. *Food Hydrocolloids*, 150-158.
- Millward, C., Ferriter, M., Calver, S., & Conell-Jones, G. (2008). Gluten- and casein-free diets for autistic spectrum disorder. *Cochrane database of systematic reviews*, 1-29.

Mintel. (2020). *Lanzamiento de productos sin gluten a nivel mundial del 2009 al 2019*. Base de datos Informes Mintel, Ciudad de México.

Mir, S. A., Shah, M. A., Naik, H. R., & Zargar, I. A. (2016). Influence of hydrocolloids on dough handling and technological properties of gluten-free breads. *Trends in Food Science Technology*, 49-57.

Mohamed, T. K., Zhu, K., Issoufou, A., Fatmata, T., & Zhou, H. (2009). Functionality, in Vitro Digestibility and Physicochemical Properties of Two Varieties of Defatted Foxtail Millet Protein Concentrates. *International Journal of Molecular Science*, 5224-5238.

Mohammadi, M., Sadeghnia, N., Azizi, M. H., Neyestani, T. R., & Mortazavian, A. M. (2014). Development of gluten-free flat bread using hydrocolloids: Xanthan and CMC. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 1812-1818.

Moore, M. M., Heinbockel, M., Dockery, P., Ulmer, H. M., & Arendt, E. K. (2006). Network Formation in Gluten-Free Bread with Application of Transglutaminase. *Cereal Chemistry*, 28-36.

Moore, M. M., Schober, T. J., Dockery, P., & Arendt, E. K. (2004). Textural Comparisons of Gluten-Free and Wheat-Based Doughs, Batters and Breads. *Cereal Chemistry*, 567-575.

Moreira, R., Chenlo, F., & Torres, M. D. (2013). Effect of chia (*Sativa hispanica* L.) and hydrocolloids on the rheology of gluten-free doughs based on chestnut flour. *LWT - Food Science and Technology*, 160-166.

Moreno, M., Comino, I., & Sousa, C. (2014). Alternative Grains as Potential Raw Material for Gluten-Free Food Development in The Diet of Celiac and Gluten-Sensitive Patients. *Austin Journal of Nutrition and Food Sciences*, 1-9.

Muñoz, L., Cobos, A., Díaz, O., & Aguilera, J. (2012). Chia seeds: Microstructure, mucilage, extraction and hydration. *Journal of Food Engineering*, 216-224.

Nambiar, V. S., Sareen, N., Daniel, M., & Gallego, E. B. (2012). Flavonoids and phenolic acids from pearl millet (*Pennisetum glaucum*) based foods and their functional implications. *Functional Foods in Health and Disease*, 251-264.

Nicolae, A., Radu, G., & Nastasia, B. (2016). Effect of sodium carboxymethyl cellulose on gluten-free dough rheology. *Journal of Food Engineering*, 16-19.

Novozymes. (2004). *Novamyl in gluten-free bread*. Cereal Food 2004-43278-01.

Nurse, E. (21 de Diciembre de 2015). *CNN Alimentos*. Recuperado el Agosto de 2019, de <https://cnnespanol.cnn.com/2015/12/21/el-superalimento-etiope-cuya-exportacion-estaba-prohibida-ya-esta-a-la-venta-en-varios-paises/>

Nuss, E., & Tanumihardjo, S. (2010). Maize: A paramount staple crop in the context of global nutrition . *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 417-436.

Olatunji, O., Koleoso, O. A., & Oniwinde, A. B. (1992). Recent experience on the milling of sorghum, millet, and maize for making nonwheat bread, cake, and sausage in Nigeria in Utilization of sorghum and millets (Gomez, M.I., House, L.R., Rooney, L.W., and Dendy, D.A.V., eds.). Patancheru, A.P. 502 324. *India: International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics*, 83-88.

Oom, A., Pettersson, A., Taylor, J. R., & Stading, M. (2008). Rheological properties of kafirin and zein prolamins. *Journal of Cereal Science*, 109-116.

Paredes López, O., Guevara, L. F., & Bello, P. L. (Marzo de 2009). <http://www.revistaciencias.unam.mx>. Recuperado el 27 de Agosto de 2017, de <http://www.revistaciencias.unam.mx/en/41-revistas/revista-ciencias-92-93/205-la-nixtamalizacion-y-el-valor-nutritivo-del-maiz-05.html>

Patinen, P., Björkstén, F., Malmström, M., Savilahti, E., & Reunala, T. (1995). Salivary and serum IgA antigliadin antibodies in dermatitis herpetiformis. *European Journal of Oral Sciences*, 280-284.

Pérez, S., & Bertoft, E. (2010). The molecular structures of starch components and their contribution to the architecture of starch granules: A comprehensive review. *Starch/Starke*, 389-420.

Pietrzyk, S., Fortuna, T., Juszczak, L., Galkowska, D., & Królikowska, K. (2015). Effect of complexation of oxidised corn starch with mineral elements on physicochemical properties. *International Journal of Food Science and Technology*, 934-941.

Písaríkova, B., Krácmár, S., & Herzig, I. (2005). Amino acid contents and biological value of protein in various amaranth species. *Czech Journal of Animal Science*, 169-174.

Preedy, V. R., Watson, R., & Patel, V. B. (2011). *Flour and breads and their fortification in health and disease prevention*. USA: Academic Press Elsevier.

Primo-Martín, C., Valera, R., & Martínez-Anaya, M. A. (2003). Effect of Pentosanase and Oxidases on the Characteristics of Doughs and the Glutenin Macropolymer (GMP). *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 4673-4679.

Pujol, M. (1998). *Cultius herbacis per a Indústries Agroalimentaries*. Barcelona: Romanyà Valls, S. A.

Qi, Q., & Zimmermann, W. (2005). Cyclodextrin glucanotransferase: from gene to applications. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 475-485.

Ratnavathi, C. V., & Patil, J. V. (2013). Sorghum Utilization as Food. *Journal of Nutrition and Food Science*, 1-8.

Ratnayake, W. S., & Jackson, D. S. (2009). Starch Gelatinization. *Advances in Food and Nutrition Research*, 221-268.

Reig Otero, Y. (2015). *Sensibilidad al gluten no celiaca (SGNC): La patología silenciosa. Revisión actual y manejo nutricional de la enfermedad*. Cataluña: UOC.

Remes, J. M. (2008). Enfermedad Celíaca: ¿quién está fuera? *Revista de Gastroenterología de México*, 50-57.

Renzetti, S., Dal Bello, F., & Arendt, E. K. (2008). Microstructure, fundamental rheology and baking characteristics of batters and breads from different gluten-free flours treated with a microbial transglutaminase. *Journal of Cereal Science*, 48 (33-45).

Resch, J. J., & Daubert, C. R. (2002). Rheological and physicochemical properties of derivatized whey protein concentrate powders. *International Journal of Food Properties*, 419-434.

Rosell, C. M. (2009). Enzymatic Manipulation of Gluten-Free Breads. En G. Eimear, *Gulten-Free Food Science and Technology* (págs. 83-98). New Delhi, India: Wiley-Blackwell.

Rosell, C. M., Barro, F., Sousa, C., & Mena, M. C. (2014). Cereals for developing gluten-free products and analytical tools for gluten detection . *Journal of Cereal Science*, 354-364.

Rosell, C. M., Haros, M., Escrivá, C., & Benedito de Barber, C. (2001). Experimental Approach To Optimize the Use of  $\alpha$ -Amylases in Breadmaking. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 2973-2977.

Rubio Tapia, A., Hill, I., Kelly, C., Calderwood , A., & Murray, J. (2013). ACG clinical guidelines: diagnosis and management of celiac disease. *American College of Gastroenterology.*, 656-676.

Saleh, A. S., Zhang, Q., Chen, J., & Shen, Q. (2013). Millet Grains: Nutritional Quality, Processing, and Potential Health Benefits. *Comprehensive Health Reviews in Food Science and Food Safety*, 12, 281-295.

San Mauro, I., Garicano, E., Collado, L., & Ciudad, M. J. (2014). ¿Es el gluten el gran agente etiopatogenico de enfermedad en el siglo XXI? *Nutrición Hospitalaria*, 1203-1210.

Sandri, L. T., Santos, F., Fratelli, C., & Capriles, V. (2017). Development of gluten-free bread formulations containing whole chia flour with acceptable sensory properties. *Food Science and Nutrition*, 1021-1028.

Schober, T. J. (2009). Manufacture of Gluten-Free Specialty Breads and Confectionery Products. En E. Gallagher, *Gluten-free Food Science and Technology* (págs. 130-180). Oxford: Wiley-Blackwell.

Schober, T. J., Bean, S. R., Boyle, D. L., & Park, S. H. (2008). Improved viscoelastic zein–starch doughs for leavened gluten-free breads: Their rheology and microstructure. *Journal of Cereal Science*, 755-767.

Schober, T. J., Messerschmidt, M., Bean, S. R., Park, S.-H., & Arendt, E. K. (2005). Gluten-Free Bread from Sorghum: Quality Differences Among Hybrids. *Cereal Chemistry*, 82(4), 394-404.

Singh, N., & Singh, P. (2011). Amaranth: Potential Source for Flour Enrichment. *Flour and Breads and their Fortification in Health and Disease Prevention*, 101-111.

Sotelo Cruz, N., Calderón de la Barca, A., & Hurtado Valenzuela, J. (2013). Celiac disease in children from the northwest of. *Revista de Gastroenterología Mexicana*, 78(4):211-8.

Storck, C. R., Zavareze, E., Gularte, M. A., Elias, M. C., Rosell, C. M., & Guerra, A. R. (2013). Protein enrichment and its effects on gluten-free bread characteristics. *LWT-Food Science and Technology*, 346-354.

Sun, H., Wiesenborn, D., Tostenson, K., Gillespie, J., & Rayas-Duarte, P. (1997). Fractionation of squalene from. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 413-418.

Tan, H. Z., Li, Z. G., & Tan, B. (2009). Starch noodles: History, classification, materials, processing, structure, nutrition, quality evaluating and improving. *Food Research International*, 551-576.

Taylor, J., Schober, T. J., & Bean, S. R. (2006). Novel food and non-food uses for sorghum and millets. *Journal of Cereal Science*, 252-271.

*tdahytu.es*. (2019). Obtenido de <http://www.tdahytu.es>

Thomas, R., Rajeev, B., & Kuang, Y. (2015). Composition of amino Acids, fatty acids, minerals and dietary fiber in some. *International Food Research Journal*, 1148-1155.

Tremblay, R., Boivin, M., & Peters, R. (19 de 02 de 2019). *Enciclopedia sobre el Desarrollo de la Primera Infancia [en línea]*. Obtenido de <http://www.encyclopedia-infantes.com/deficit-de-atencion-e-hiperactividad-tdah/sintesis>

USDA. (01 de Abril de 2007). *National Nutrient Database for Standard Reference*. Obtenido de [www.nal.usda.gov](http://www.nal.usda.gov)

Valdivia López, M. Á., & Tecante, A. (2015). Chia (*Salvia hispanica*): A Review of Native Mexican Seed and its Nutritional and Functional Properties. En J. Henry, *Advances in Food and Nutrition Research* (págs. 53-75). Academic Press.

Van Riemsdijk, L. E., van der Goot, A. J., & Hamer, R. J. (2011). The use of whey protein particles in gluten-free bread production, the effect of particle stability. *Food Hydrocolloids*, 1744-1750.

Vaquero, L., Begoña, Á., Rodríguez, L., Aparicio, M., & Jorquera, F. (2015). Revisión de las patologías relacionadas con la ingesta de gluten. *Nutrición Hospitalaria*, 2359-2371.

Vega Galvez, A., Miranda, M., Vergara, J., Uribe, E., Puente, L., & Martínez, E. (2010). Nutrition facts and functional potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). an ancient Andean grain: a review. *Journal Science Food Agriculture*, 90: 2541-7.

Vidal, N. (20 de Noviembre de 2015). Recuperado el 6 de Agosto de 2016, de <http://comunidad.ainia.es/web/ainiacomunidad/blogs/gestion-del-conocimiento/-/articulos/2vMk/content/sin-gluten-trending-en-alimentacion>

Vidal, N. (Abril de 2016). *AINIA Insights*. Obtenido de [https://www.ainia.es/html/ebooks/ainia\\_2016\\_insights\\_abril.pdf](https://www.ainia.es/html/ebooks/ainia_2016_insights_abril.pdf)

Volta, U., Tovoli, F., Cicola, R., Parisi, C., Fabbri, A., Piscaglia, M., & Caio, G. (Septiembre de 2012). Serological Tests in Gluten Sensitivity (Nonceliac Gluten Intolerance). *Journal of clinical gastroenterology*, 46(8), 680-685.

Winger, M., Khouryieh, H., Aramouni, F., & Herald, T. (Abril de 2014). Sorghum Flour Characterization and Evaluation in Gluten-Free Flour Tortilla. *Journal of Food Quality*, 37(2), 95-106.

Witczak, M., Ziobro, R., Juszczak, L., & Korus, J. (2016). Starch and starch derivatives in gluten-free systems - A review. *Journal of Cereal Science*, 46-57.

Wronkowska, M., Soral, M., & Krupa, U. (2010). Buckwheat, as a Food Component of a High Nutritional Value, used in the Prophylaxis of Gastrointestinal Diseases. *The European Journal of Plant Science and Biotechnology*.

Xie, S. X., Liu, Q., & Cui, S. W. (2005). Starch Modification and Applications. En S. W. Cui, *Food Carbohydrates* (págs. 357-407). Boca Raton, E.U.: Taylor & Francis.

Xiong, Y., Zhang, P., Warner, R. D., & Fang, Z. (2019). Sorghum Grain: From Genotype, Nutrition, and Phenolic Profile to Its Health Benefits and Food Applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 1-22.

Yan, S., Wu, X., Bean, S. R., Pedersen, J. F., Tesso, T., Chen, Y. R., & Wang, D. (2011). Evaluation of Waxy Grain Sorghum for Ethanol Production. *Cereal Chemistry*, 589-595.

Yongfeng, A., & Jay-lin, J. (2016). Macronutrients in Corn and Human Nutrition. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 581-598.

Zevallos, V., Herencia, I., Chang, F., & Ciclitira, P. (2014). Gastrointestinal Effects of Eating Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) in Celiac Patients. *The American Journal of Gastroenterology*, 270-278.