



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTTLÁN**

**"ELABORACIÓN DE PAN DE CAJA SIN GLUTEN  
ADICIONADO CON FRUCTANOS DE AGAVE"**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERA EN ALIMENTOS**

**PRESENTA:**

**HERNÁNDEZ ROCHÍN MELLANY MICHELLE**

**ASESORA:**

**DRA. MARÍA GUADALUPE SOSA HERRERA**

**COASESORA**

**IBQ. NORMA BEATRIZ CASAS ALENCÁSTER**

**CUAUTTLÁN IZCALLI , ESTADO DE MÉXICO**

**2019**



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
SECRETARÍA GENERAL  
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLÁN

ASUNTO: VOTO APROBATORIO



M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE

ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA  
Jefa del Departamento de Exámenes Profesionales  
de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: Trabajo de Tesis

Elaboración de pan de caja sin gluten adicionado con fructanos de agave.

Que presenta la pasante: Mellany Michelle Hernández Rochín  
Con número de cuenta: 414074615 para obtener el Título de la carrera: Ingeniería en Alimentos

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 14 de Agosto de 2018.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	M. en F. Graciela Martínez Cruz	
VOCAL	Dra. María Eugenia Ramírez Ortíz	
SECRETARIO	Dra. María Guadalupe Sosa Herrera	
1er. SUPLENTE	I.A. Patricia Muñoz Aguilar	
2do. SUPLENTE	I.A. Miriam Alvarez Velasco	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

## **Agradecimientos**

- ❖ *A Dios por darme la vida, guiarme durante esta etapa de mi vida y poner a las personas correctas en mi vida y así nunca dejarme sola.*
  - ❖ *Infinitamente a mi madre Erika Yazmín Rochín Ruíz por todo el amor incondicional, el apoyo y el sacrificio para que yo pudiera seguir adelante y cumplir este sueño, por todas las horas de trabajo, los regaños, la compañía, los consejos... simplemente por ser el gran ejemplo de mujer que quiero ser, y quiero que sepas mamá que este logro es tuyo también.*
  - ❖ *A mis amados hermanos, Elliot por tus consejos sobre la escuela y la vida, por siempre tener palabras de motivación y crear momentos divertidos, Dennyse por ser mi confidente y mi mejor amiga, Erik y Yazmín aunque nunca lo digo siempre he querido ser un buen ejemplo para ustedes gracias por acompañarme en algunas desveladas y escuchar mis anécdotas escolares, porque cuando me dicen que están orgullosos de mi me motivan a ser una mejor persona. Hermanos me siento amada por ustedes, siempre los apoyare como ustedes a mi sin condición alguna.*
  - ❖ *A mi abuelita Jose, desde que tengo memoria me alentaste a estudiar, escuchaste mis sueños desde niña, cuando quise ser diseñadora de moda, escritora y cantante, siempre confiaste en mis sueños, por recibirme en tu hogar para seguir estudiando, procurar mi bienestar y siempre hacerme sentir querida.*
  - ❖ *A mi tío Miguel por aquellas largas pláticas para ser una mejor persona y los consejos para prepararme para la vida.*
  - ❖ *A mi tío Franco por recibirme en tu hogar, por el apoyo económico, emocional y siempre acudir cuando te necesitamos.*
  - ❖ *A Jonathan por acompañarme en aquellos momentos importantes de mi vida y por siempre estar ahí cuando te necesito.*
  - ❖ *A Eliseo, gracias por caminar a mi lado todo este tiempo, motivarme a ser ingeniera, ayudarme a estudiar, por no dejarme caer cuando sentía que no podía más o que no era para mí la carrera.*
-

- ❖ *A la maestra IBQ. Norma Alencáster, maestra gracias por ser tan paciente conmigo, por enseñarme tantas cosas que contribuyeron a mi formación profesional, admiro mucho el amor con el que enseña y le repito que estoy muy agradecida porque, aunque fue el último semestre tuve la dicha de tenerla como maestra y de aprender académicamente pero también como persona.*
  - ❖ *A la Dra. Guadalupe Sosa, por ser tan paciente, una excelente persona que demuestra el amor por lo que hace y acompañarme en este proceso de elaborar una tesis hasta el final, por motivarme a participar en un congreso y romper miedos, por dedicar su tiempo a todas las revisiones y siempre recibirme con una sonrisa.*
  - ❖ *A mis sinodales, M. en F. Graciela Martínez Cruz; Dra. María E. Ramírez Ortíz; I.A Patricia Muñoz Aguilar; I.A Miriam Álvarez Velasco, por dedicar tiempo a revisar esta tesis y mejorarla, también por los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera y durante este proyecto.*
  - ❖ *Al Programa Interno de Apoyo para Proyectos de Investigación (PIAPI), de la FES Cuautitlán, UNAM. Por su apoyo al proyecto " Propiedades Reológicas y Funcionales en Alimentos" con clave PIAPI1818.*
  - ❖ *A mis amigos, David, Karina y Bárbara, gracias por acompañarme durante estos 5 años, por soportar mi mal carácter y nunca dejarme, jamás olvidare tan bonitos momentos con ustedes, estudiar a su lado fue un gran honor, definitivamente las mejores personas que pude conocer de la generación.*
  - ❖ *A la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, por todos los aprendizajes, por permitirme coincidir con grandes personas, que gran orgullo pertenecer a la máxima casa de estudios y que gran orgullo ser una Ingeniera egresada de tan reconocida universidad.*
-

## ÍNDICE

ÍNDICE DE CUADROS	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	3
CAPÍTULO I ANTECEDENTES	5
1.1 Importancia del pan en México	5
1.2 Pan blanco de caja o molde	7
1.2.1 Materias primas para elaborar pan de caja	10
1.2.2 Formulación de pan blanco de caja	13
1.2.3 Proceso de elaboración de pan de caja o molde	14
1.2.4 Características físicas, reológicas y texturales del pan de caja	18
1.3 Gluten	23
1.4 Celiaquía	27
1.4.1 Descripción de la enfermedad	27
1.4.2 Celíacos en México	28
1.5 Pan blanco libre de gluten	28
1.5.1 Formulación de pan blanco libre de gluten	29
1.5.1.1 Goma xantana	33
1.5.1.2 Hidroxipropilmetilcelulosa	33
1.5.1.3 Almidón nativo de papa	35
1.5.1.4 Hojuelas de papa	35

1.5.2 Características físicas, reológicas y texturales	36
1.6 Fructanos	37
1.6.1 Beneficios y funcionalidad tecnológica	39
1.6.2 Fructanos de agave	40
1.6.3 Importancia de los fructanos de agave	42
1.6.4 Fructanos de agave en México	43
1.6.5 Aplicación de los fructanos de agave	43
CAPÍTULO II METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	44
2.1 Objetivos	44
2.2 Materia prima	45
2.3 Elaboración de muestras	45
2.4 Métodos de evaluación	53
2.4.1 Volumen específico	53
2.4.2 Pérdida de peso	53
2.4.3 Altura	53
2.4.4 Color	54
2.4.5 Análisis de imagen	54
2.4.6 Textura	55
2.4.6.1 Análisis de perfil de textura	56
2.4.6.2 Consistencia de la masa	57
2.4.7 Viscoelasticidad de la masa	59
2.5 Análisis de resultados	59
CAPÍTULO III RESULTADOS Y ANÁLISIS	61
3.1 Objetivo 1. Efecto de la concentración y tipo de goma	61

3.1.1 Apariencia de la hogaza	61
3.1.2 Volumen específico, altura y pérdida de peso	61
3.1.3 Color de la corteza y la miga	64
3.1.4 Textura	64
3.1.5 Estructura de la miga	67
3.2 Objetivo 2. Efecto de la proporción de almidón nativo de papa y hojuelas de papa	70
3.2.1 Apariencia de la hogaza	71
3.2.2 Volumen específico, altura y pérdida de peso	71
3.2.3 Color de la corteza y la miga	74
3.2.4 Textura	75
3.2.5 Estructura de la miga	78
3.3 Objetivo 3. Efecto de la concentración de fructanos de agave	80
3.3.1 Apariencia de la hogaza	80
3.3.2 Volumen específico, altura y pérdida de peso	80
3.3.3 Color de la corteza y la miga	82
3.3.4 Textura	83
3.3.5 Estructura de la miga	85
3.4 Objetivo 4	87
3.4.1 Comportamiento viscoelástico de la masa	90
3.4.2 Propiedades texturales de la masa	92
CONCLUSIONES	94
REFERENCIAS	96

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Especificaciones del pan blanco de caja (NMX-F-159-5-1983)	10
Cuadro 2. Formulaciones de pan blanco de caja	13
Cuadro 3. Valores de L, a y b reportados para pan blanco de caja con gluten	20
Cuadro 4. Condiciones empleadas para la prueba de análisis de perfil de textura para pan de caja con gluten	22
Cuadro 5. Formulaciones de pan de caja sin gluten	32
Cuadro 6. Condiciones empleadas para la prueba de análisis de perfil de textura para pan de caja sin gluten	38
Cuadro 7. Materia prima utilizada	46
Cuadro 8. Formulación de pan de caja con gluten	46
Cuadro 9. Formulación de pan de caja control sin gluten	49
Cuadro 10. Formulaciones por objetivo	52
Cuadro 11. Parámetros que obtener del análisis de perfil de textura	57
Cuadro 12. Parámetros que obtener de la prueba de consistencia	58
Cuadro 13. Efecto de la concentración de goma en el volumen específico, altura y pérdida de peso en pan con 36.58% almidón de papa y 18.27% hojuelas de papa	63
Cuadro 14. Efecto de la concentración de gomas sobre el color de la corteza en pan con 36.58% almidón de papa y 18.27% hojuelas de papa	64
Cuadro 15. Efecto de la concentración de gomas sobre el color de la miga en pan con 36.58% almidón de papa y 18.27% hojuelas de papa	65
Cuadro 16. Parámetros de análisis de perfil de textura. Efecto de la concentración de gomas sobre la textura del pan	67
Cuadro 17. Efecto de la concentración de gomas sobre la estructura de la miga	70

Cuadro 18. Efecto de la proporción de almidón de papa y hojuelas de papa sobre el volumen específico, altura y pérdida de peso en pan con 1.85% X y 0.62% HPMC	72
Cuadro 19. Efecto de la proporción de almidón de papa y hojuelas de papa sobre el color de la corteza en pan con 1.85% X y 0.62% HPMC	74
Cuadro 20. Efecto de la proporción de almidón de papa y hojuelas de papa sobre el color de la miga en pan con 1.85% X y 0.62% HPMC	75
Cuadro 21. Parámetros de análisis de perfil de textura. Efecto de la proporción de almidón de papa y hojuelas de papa sobre la textura del pan	77
Cuadro 22. Efecto de la concentración de gomas sobre la estructura de la miga	79
Cuadro 23. Efecto de la concentración de fructanos de agave sobre el volumen específico, altura y pérdida de peso en pan con 1.85% X, 0.62% HPMC, 54.85% almidón y formulación extra	81
Cuadro 24. Efecto de la concentración de fructanos de agave en pan con 1.85% X, 0.62% HPMC, 54.85% almidón y formulación extra	83
Cuadro 25. Efecto de la concentración de fructanos de agave sobre el color de la miga en pan con 1.85% X y 0.62% HPMC, 54.85% almidón y formulación extra	83
Cuadro 26. Parámetros de análisis de perfil de textura. Efecto de la concentración de fructanos de agave sobre la textura del pan	85
Cuadro 27. Efecto de la concentración de fructanos de agave sobre la estructura de la miga	86
Cuadro 28. Parámetros texturales de la prueba de consistencia-adhesividad en las masas seleccionadas en cada objetivo	93

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación por sector de procedencia de productos de panificación	6
Figura 2. Pan blanco de caja o molde	8
Figura 3. Espacio de color CIELAB	19
Figura 4. Comparación de masa elaborada con harina de trigo y masa sin gluten a distintas concentraciones de almidón	24
Figura 5. Estructura de un fragmento del gluten	25
Figura 6. Representación esquemática de como los polímeros de la glutenina comienzan a alinearse como resultado del trabajo mecánico impuesto durante el mezclado de la masa	26
Figura 7. Vellosidades del intestino de personas que padecen celiaquía	28
Figura 8. Estructuras de goma xantana e hidroxipropilmetilcelulosa respectivamente	34
Figura 9. Hojuelas de papa	36
Figura 10. Estructura química propuesta para los fructanos de agave azul ( <i>Tequilana Weber</i> variedad azul)	41
Figura 11. Diagrama de proceso para la elaboración de pan de caja con gluten	47
Figura 12. Diagrama de proceso para la elaboración de pan de caja sin gluten	50
Figura 13. Curva de análisis de perfil de textura de pan comercial a diferente compresión	56
Figura 14. Curva típica de adhesividad por penetración y retirada	58
Figura 15. Efecto de la concentración y tipo de goma en la apariencia de la hogaza con 36.58% almidón de papa y 18.27% hojuelas de papa	62

Figura 16. Efecto de la concentración y tipo de goma sobre la textura del pan	66
Figura 17. Efecto de la concentración y tipo de goma sobre la estructura de la miga	68
Figura 18. Efecto de la proporción de almidón de papa y hojuelas de papa en la apariencia de la hogaza con 1.85% X y 0.62% HPMC	73
Figura 19. Efecto de la proporción de almidón de papa y hojuelas de papa sobre la textura del pan	76
Figura 20. Efecto de la proporción de almidón de papa y hojuelas de papa sobre la estructura de la miga	78
Figura 21. Efecto de la concentración de fructanos de agave en la apariencia de la hogaza con 1.85% X, 0.62% HPMC, 54.85% almidón de papa y formulación extra	82
Figura 22. Efecto de la concentración de fructanos de agave sobre la textura del pan	84
Figura 23. Efecto de la concentración de fructanos de agave sobre la estructura de la miga	86
Figura 24. Evolución del pan de caja sin gluten	89
Figura 25. Espectros mecánicos de las masas de las formulaciones seleccionadas en cada objetivo	91
Figura 26. Tangente del ángulo de desfase en función de la frecuencia angular para las masas control con gluten y las correspondientes a las formulaciones seleccionadas en cada objetivo	91
Figura 27. Curvas de consistencia-adhesividad en las masas seleccionadas en cada objetivo	93

## RESUMEN

En el presente trabajo se adicionaron fructanos de agave en pan de caja libre de gluten para obtener un doble beneficio a aquellas personas que padezcan celiaquía, para ello se utilizó harina de arroz como base, complementando con la adición de goma xantana, hidroxipropilmetilcelulosa, almidón nativo de papa y hojuelas de papa.

A los panes obtenidos se les midió la altura, volumen específico, pérdida de peso por horneado y color, mientras que a rebanadas de pan se les realizó un análisis de perfil de textura y análisis de imagen de la miga.

Como primer objetivo se elaboraron panes con distintas proporciones de goma xantana (2.46%, 0%, 1.23%, 0.62%, 1.85%) e hidroxipropilmetilcelulosa (0%, 2.46%, 1.23%, 1.85%, 0.62%) con una base de 36.58% de almidón y 18.27% de hojuelas de papa; se concluyó que la formulación con 1.85% xantana y 0.62% HPMC dio un pan con características aceptables en cuanto a color, volumen específico, altura, dureza, elasticidad, cohesividad, masticosidad, fineza y uniformidad por lo cual se tomó como base para el siguiente objetivo. En el segundo objetivo se varió la proporción de almidón de papa (54.85%, 41.15%, 36.58%, 27.42%, 18.27%, 13.73% y 0%) y hojuelas de papa (0%, 13.73%, 18.27%, 27.42%, 36.58%, 41.15%, 54.85%); se concluyó que la formulación con 54.85% de almidón de papa y sin hojuelas de papa presentó las características más cercanas al pan con gluten, ésta formulación se tomó para el siguiente objetivo. En el tercer objetivo se varió la concentración de fructanos de agave (4.99%, 7.48% y 9.98%); se concluyó que la formulación con 4.99% de fructanos de agave mejoró en gran manera la apariencia del producto final, sin embargo, con el fin de no excluir a las hojuelas de papa se decidió hacer una última formulación que consistió en 1.85% xantana, 0.62% HPMC, 47.99% almidón de papa, 6.87% hojuelas de papa y 4.99% fructanos de agave. Se manejaron dos formulaciones control una con gluten y otra sin éste.

Para tratar los datos estadísticamente se manejó por etapas donde cada objetivo fue una etapa y los resultados obtenidos se analizaron por medio de la determinación de las diferencias estadísticas por análisis de la varianza (ANOVA) de un solo factor con 95% de confianza, seguido de las comparaciones entre medias con prueba de Tukey al 5% de nivel de significancia, utilizando el software Minitab 16. Se concluyó que la formulación con 1.85% de xantana, 0.62% HPMC, 54.85% almidón de papa y 4.99% fructanos de agave fue la que presentó una mayor altura, alto volumen específico, poca dureza, alta elasticidad y cohesividad, además de la estructura de miga más parecida al pan elaborado con harina de trigo.

Finalmente se elaboraron las masas sin levadura tanto de los panes control como de los panes seleccionados en cada objetivo y se les realizó pruebas de cizalla oscilatoria encontrando que en todos los casos predominó el módulo elástico, también se realizó una prueba de consistencia a la masa (adhesividad por penetración y retirada) siendo el control con gluten y la masa del objetivo 1 las formulaciones más consistentes.

## INTRODUCCIÓN

La panificación es una de las ramas más productivas del sector de alimentos, al mantener en operación 50% de su capacidad instalada, lo cual supera a la industria en general, que promedia en este rubro 63%, en los cuales destaca el pan blanco de caja. En materia de precios, los panes muestran un comportamiento atípico, pues su encarecimiento casi nunca se refleja en una reducción del volumen de ventas y ello se debe a que la población mexicana tiene la costumbre de acompañar casi cualquier platillo con pan blanco (bolillo, telera, de molde) (ANPROPAN, 2016).

Sin embargo, el 10% de la población mundial padece celiacía (en México el 0.68% de la población) (Hernández *et al.*, 2017). La celiacía es una enfermedad auto-inmunitaria donde el cuerpo es intolerante al gluten ya que éste provoca una lesión severa en la mucosa del intestino delgado. El gluten es la principal proteína que forma la estructura en la harina, y es responsable de las características elásticas de la masa, además contribuye a la apariencia y la estructura de la miga de muchos productos horneados (Gallagher *et al.*, 2004). Las personas que padecen celiacía se ven forzadas a cambiar su dieta por completo, evitando principalmente productos a base de harina de trigo, cebada, centeno y avena como pastas, productos lácteos, confitería y productos de panificación.

Actualmente se han realizado estudios para elaborar productos de panificación sin gluten, y se ha buscado incorporar fructanos (principalmente de achicoria). Los fructanos son oligosacáridos que funcionan como probióticos en el cuerpo humano, las funciones benéficas causadas por los fructanos en la dieta de los seres humanos consta en la formación de un gel viscoso en el intestino que disminuye la absorción de glucosa, provocando baja concentración de glucosa en sangre, su aporte calórico es bajo, son no cariogénicos, mejoran el ambiente intestinal y modifican la microbiota de tal manera que predominen bacterias benéficas y no patógenas; estimulan la absorción de ciertos minerales, tales como calcio, magnesio y hierro (Qiang *et al.*, 2009). De tal manera, el consumo de fructanos puede reducir el riesgo de enfermedades gastrointestinales, cardiovasculares y

podría evitar el cáncer de colon y obesidad (Arrizón *et al.*, 2014), sin embargo, existen pocos estudios sobre los fructanos de agave en productos de panificación sin gluten. Por esto, el objetivo del presente trabajo fue desarrollar una formulación de pan de caja blanco sin gluten a base de harina de arroz que presente las propiedades físicas, texturales y en el caso de la masa, propiedades reológicas similares al pan elaborado con harina de trigo, mediante la adición de goma xantana, hidroxipropilmetilcelulosa, almidón nativo de papa, hojuelas de papa y fructanos de agave.

# CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

## 1.1 IMPORTANCIA DEL PAN EN MÉXICO

El pan, desde la antigüedad, ha sido uno de los principales sustentos del hombre. Con la evolución de la humanidad, la forma de hacer el pan también se ha modificado, pero nunca ha perdido el peso y la importancia que tiene en la alimentación humana. La industria panadera siempre ha estado relacionada con lo artesanal y a las empresas familiares. Esta industria en la actualidad se encuentra en la fase de expansión y crecimiento, ya que la industria panadera es representativa de la alimentación y se caracteriza por una gran variedad de productos (ANPROPAN, 2016).

La industria panificadora en el mundo vale 461,000 millones de dólares, con un mercado integrado en 91% por panaderías familiares o artesanales, supermercados y tiendas de abarrotes, sumando 277,000 empresas de acuerdo con la consultora IBIS World (Global Trends, 2015). En México tiene un valor en el mercado de 6,500 millones de dólares y el consumo per cápita anual asciende a 34 kg. El consumo de esta industria se relaciona con el pan blanco (entre un 70 y 75%), el resto corresponde a pan dulce, galletas, pasteles, entre otros. La industria Panificadora Mexicana es de producción artesanal en su gran mayoría, razón por lo que es muy importante la mano de obra. Esta cadena industrial es la tercera fuerza empleadora de mano de obra en el país después de la construcción y la automotriz (ANPROPAN, 2016).

Distintos productos de panificación son elaborados y consumidos en México de acuerdo con las cifras del INEGI y de las tiendas de autoservicio, en el año 2014 se identificaron 58 mil 622 establecimientos con actividad de panificación, ya sea en la elaboración o ventas, mismos que se pueden segmentar en panaderías (68%), pastelerías (18%), tortillerías (12%) y algunos negocios que preparan alguna variedad de pan, como pueden ser donas, churros, empanadas, pays, coyotas, bísquetos, entre otros (1.8%) (Carrillo, 2014).

En cuanto al tipo de proceso o sector de procedencia, el 91% de los establecimientos correspondió a la panadería de tipo tradicional, el 0.1% a la panadería industrial y el 9% a las panaderías dentro de los autoservicios. Esta clasificación también considera a los negocios que solamente venden el producto, aun cuando se elabore en el mismo sitio. En la Figura 1 se muestra la clasificación de proceso y sector de procedencia de productos de panificación.



Figura 1. Clasificación por sector de procedencia de productos de panificación (Carrillo, 2014).

De acuerdo con cifras del INEGI para el año 2013, el gasto total que los hogares mexicanos destinaron a comprar pan blanco se distribuyó de la siguiente manera: el 10% en hogares de nivel socioeconómico bajo, el 55% en medio bajo, el 28% en medio alto y el 7% en alto (Carrillo, 2014).

Comúnmente se dice que los ingredientes principales para elaborar un pan son harina, grasa, azúcar y huevo, con el paso del tiempo han variado las proporciones de estos ingredientes y se han adicionado otros como leche, levadura, gomas

entre otros. De acuerdo con la NMX-F-516-1992, los productos de panificación se clasifican según su composición como sigue:

TIPO I: Pan blanco, bolillo y telera

TIPO II: Pan de harinas integrales

TIPO III: Pan, productos de bollería

TIPO IV: Pan dulce

TIPO V: Galletas

TIPO VI: Pastas secas

TIPO VII: Pastel

TIPO VIII: Pay o tarta

Dada la versatilidad del pan blanco (bolillo, telera o baguette) que puede utilizarse para acompañar casi cualquier alimento durante el día, como postre al agregarle algún tipo de ingrediente de sabor dulce o como alimento principal en las bien conocidas tortas o molletes, por ejemplo, es uno de los productos de panificación más consumido por los hogares mexicanos.

## **1.2 PAN BLANCO DE CAJA O MOLDE**

El pan blanco, bolillo y telera son productos alimenticios cocidos por horneado de la masa fermentada, elaborada con harina de trigo, agua potable, sal yodada, azúcar, levadura, ingredientes opcionales y aditivos alimentarios permitidos por la Secretaría de Salud (NMX-F-516-1992).

El pan blanco es uno de los más consumidos en nuestro país, no se cuenta con estadísticas acerca de que pan blanco (caja o molde, telera, bolillo) se consuma más, sin embargo, el pan blanco de molde o caja es el que más se comercializa y distribuye debido a sus características de conservación y fácil manejo. La diferencia del pan blanco de caja o molde radica en que éste es horneado en un molde y no se somete a un boleado, y se presenta en rebanadas delgadas generalmente envasado en bolsas de polietileno, por lo tanto, las características

físicas y texturales son diferentes. En la Figura 2 se presenta el pan blanco más conocido en México y se define de la siguiente manera:

El pan blanco de caja es el producto alimenticio elaborado mediante la cocción por horneado de la masa fermentada, elaborada con la harina de trigo, agua potable, sal yodada, levadura y otros ingredientes opcionales y aditivos permitidos para alimentos (NMX-F-159-S-1983).



Figura 2. Pan blanco de caja o molde

Según la NMX-F-159-S-1983 El pan blanco de caja debe cumplir con las siguientes especificaciones:

#### Características sensoriales

**Aspecto externo.** La pieza de pan blanco debe presentar la forma de un paralelepípedo simétrico, pudiendo ser rectangular o abombado con aristas ligeramente redondeadas, sin extremos bajos ni cuadrados. No debe presentar forma de tornillo, ni estar colapsado.

**Color exterior.** La superficie exterior y la corteza deben presentar un color amarillo rojizo, el cual deberá ser lo más uniforme posible por el horneado y en todas sus

caras, a excepción de la greña (fisuras formadas por el crecimiento de la masa), no deberá presentar manchas ni vetas y deberá tener cierto brillo.

Tipo de corteza. Debe ser delgada, suave, romperse fácilmente y no debe ser correosa.

Rebanado. Si el producto se presenta rebanado, el espesor de la rebanada debe ser uniforme por pieza de pan blanco.

Color de la miga. Debe ser blanco brillante, con un matiz uniforme, sin vetas, manchas ni coloraciones.

Grano. El grano debe ser tal de manera que las celdillas de la miga sean pequeñas, de tamaño uniforme, de forma ligeramente ovalada, de paredes delgadas y sin agujeros. La superficie de la rebanada no debe presentar desgarraduras.

Olor. Agradable, característico, no debe ser picante ni rancio.

Sabor. Agradable, característico, no debe ser ácido.

Textura:

a) Sensación al tacto: suave, firme y no desmoronable ni pegajoso.

b) Masticación: no debe ser masudo, seco, correoso o pegajoso.

El pan blanco debe cumplir con ciertas especificaciones en su composición, éstas comprenden entre un valor mínimo y máximo, que son independientes de su formulación o modificaciones en la misma, el Cuadro 1 muestran las especificaciones establecidas por la NMX-F-159-S-1983.

Se puede observar que este tipo de pan tiene bajo contenido de grasas y mayor cantidad de proteínas, ésto se debe a que habitualmente es elaborado con harina de trigo, ésta da las características que se conocen en el pan y determinan la composición del mismo.

Cuadro 1. Especificaciones del pan blanco de caja o molde (NMX-F-159-S-1983)

<b>Especificación</b>	<b>Mínimo %</b>	<b>Máximo %</b>
<b>Humedad</b>	30	38
<b>Cenizas</b>	1.8	2.5
<b>Proteínas</b>	8	9
<b>Grasa</b>	0.8	4
<b>Fibra cruda</b>	0.2	0.4
<b>pH</b>	4.5	5.8

### **1.2.1 Materias primas para elaborar pan blanco de caja o molde**

Los ingredientes básicos para la elaboración de pan blanco de caja o molde según las definiciones previamente mencionadas y la NMX-F-007-1982 son: harina de trigo, agua potable, levadura activa fresca o seca y sal yodatada. Se denominan básicos ya que tienen una función específica que se describe a continuación.

#### **Harina**

La harina da fuerza a la mezcla (con contenidos de proteína en torno al 13%) debido a su contenido en gluten brinda la capacidad de soportar su estructura y retener el gas que se genera durante la fermentación (Interempresas, 2015).

Para Quaglia (1991) existe una variedad de harinas panificables, siendo la harina de trigo la original, debido a su contenido de proteínas que brinda las características básicas del pan de caja. La denominación harina, sin otro

calificativo, designa exclusivamente el producto obtenido de la molienda del endospermo del grano de trigo limpio. Si se trata de otros granos de cereales o de leguminosas hay que indicarlo, por ejemplo: harina de maíz, harina de cebada, entre otros. Si en la harina aparece no sólo el endospermo, sino todos los componentes del grano se llama harina integral. El centeno se considera como la segunda después del trigo en importancia en la producción de pan, contiene las mismas proteínas que el trigo, aunque en proporciones diferentes y de escasa estabilidad, pero es posible obtener un pan de volumen suficientemente aceptable.

#### Agua

La incorporación del agua marca el punto de partida de todo proceso de panificación y con ello una innumerable serie de reacciones, hidrata todos los componentes de la harina y se pueden apreciar durante el amasado gracias a esta acción se activan las enzimas de la harina, de la levadura e hidrata el gluten (Barriga, 2003).

#### Sal

Es el componente que armoniza el conjunto de sabores aportados por el resto de ingredientes del amasado y desarrollados durante la fermentación y la cocción (Barriga, 2003). Aumenta la absorción de agua y mejora la manejabilidad y firmeza de la masa durante el amasado, reduce la acidez causada por la levadura ya que retarda las fermentaciones del ácido láctico y butírico, tiene efecto antioxidante, favorece al color de la corteza y sirve como conservador (Tejero, 2016).

#### Azúcar

Tienen la función de conferir un sabor dulce y ser alimento para las levaduras, tienen efecto sobre la propiedad de absorción, sobre el tiempo de desarrollo de la masa y sobre las características organolépticas del producto (Quaglia, 1991).

## Grasa

Se utiliza para trabajar con harinas tenaces, es decir facilitando así el amasado y aportando una mayor extensibilidad y consecuentemente un mejor formado en los moldes en caso de ser pan de caja o un mejor boleado en caso de ser bolillos o teleras (Barriga, 2003).

## Levadura

En panadería se llama levadura al componente microbiano aportado a la masa con el fin de hacerla fermentar de modo que se produzca etanol y CO<sub>2</sub>. Este CO<sub>2</sub> queda atrapado en la masa la cual se esponja y aumenta de volumen. A este fenómeno se le denomina levantamiento de la masa. Los microorganismos presentes en la levadura son principalmente levaduras que son las responsables de la fermentación alcohólica, pero también se pueden encontrar bacterias que actúan durante la fermentación dando productos secundarios que van a conferir al pan determinadas características organolépticas, en concreto una cierta acidez (Mesas y Alegre, 2002).

La NMX-F-159-S-1983 indica que pueden adicionarse algunos ingredientes opcionales como lo son: grasas como manteca de cerdo comestible, grasa vegetal parcialmente hidrogenada comestible. Sin embargo, los más comunes actualmente son aceite vegetal y mantequilla. Leche y/o sus derivados como yogurt, queso entre otros. Algunos edulcorantes nutritivos como sacarosa, lactosa y maltosa. Harina de soya desengrasada, la cual podrá agregarse hasta un 3% de la harina de trigo empleada en la formulación, aditivos alimentarios; también adicionarse alguno de los siguientes aditivos establecidos por la Secretaría de Salubridad y Asistencia, emulsivos, conservadores, enzimas amilolíticas y proteolíticas, gluten de trigo, acidulantes, alcalinizantes, ácido láctico. Sin embargo, en recientes investigaciones se ha incorporado huevo y distintos tipos de gomas.

Los ingredientes previamente mencionados se pueden o no usar para la elaboración del pan de caja, la diferencia entre panes resulta en la combinación y exclusión de ingredientes o incluso adicionando extras.

### 1.2.2 Formulación de pan blanco de caja o molde

Actualmente se cuenta con numerosas formulaciones de pan blanco de caja, donde se puede ver que los ingredientes varían según las características a las que se quieran llegar; en el Cuadro 2 se reúnen distintas formulaciones de pan de caja elaboradas con harina de trigo.

Cuadro 2. Formulaciones de pan blanco de caja

<b>Ingredientes</b>	<b>Hallberg &amp; Chinachoti, 2002 (%)</b>	<b>Moore et al, 2004 (%)</b>	<b>Mozo, 2015 (%)</b>	<b>López, 2017 (%)</b>
<b>Levadura</b>	1	0.9	1.7	1.7
<b>Leche</b>	---	---	23.4	---
<b>Harina de trigo</b>	57.5	60.2	46.9	55.6
<b>Sal</b>	1	1.2	0.4	0.9
<b>Azúcar</b>	2.7	0.9	9.8	3.6
<b>Mantequilla</b>	3	---	9.8	---
<b>Aceite</b>	---	---	---	3.6
<b>Huevo</b>	---	---	8.1	---
<b>Agua</b>	34.5	36.7	---	33
<b>Mejorante</b>	---	---	---	0.5
<b>Total</b>	100	100	100	100

Se puede observar en el Cuadro 2 que las formulaciones toman como base la levadura, harina de trigo, sal y agua con excepción de Mozo (2015) ya que utilizó leche y huevo para hidratar el resto de ingredientes; sin embargo, se encontró que al usar algún tipo de mejorante se obtiene un pan de mejor aspecto, y como grasa se puede usar aceite vegetal o mantequilla, Moore *et al.* (2004), presenta su formulación para elaborar un pan control por lo que es un pan con características muy básicas ya que no buscó mejorar la formulación.

### **1.2.3 Proceso de elaboración de pan de caja**

Según Scanlon & Zghal (2001), los ingredientes básicos que se usan para crear pan son: harina, levadura, agua y cloruro de sodio. Existen diversos procesos que incluyen diferentes operaciones; las operaciones se llevan a cabo de tal manera que la masa pueda poseer las propiedades viscoelásticas apropiadas que le permitirán retener el gas y así producir una hogaza de pan bien expandida con una estructura de miga uniforme, se buscan tres objetivos en las operaciones de procesamiento. Reconocen 3 etapas básicas en el proceso de elaboración que se describen a continuación

#### 1) Mezcla y desarrollo de la masa (mezclado)

- Hidratación

El desarrollo de la masa requiere el aporte de trabajo mecánico y cierto grado de modificación química de algunos de los biopolímeros en la harina. Tradicionalmente, esto se logra amasando la mezcla (aporte de trabajo) y dejando tiempo (tiempo de fermentación) para la modificación bioquímica y química de las propiedades fisicoquímicas de los biopolímeros.

La gran cantidad de agua que se agrega a la harina debe ser absorbida por los polímeros de la misma. En una harina blanca típica, aproximadamente el 71% del peso de la harina son carbohidratos de los cuales la mayoría es almidón, 13 proteínas, 1% son lípidos y 14% es agua y algunos otros componentes que conforman el resto, la mayoría del agua añadida para formar la masa es absorbida

por los grupos hidrofílicos en las moléculas de proteína, aunque el grado de cizallamiento de los cristales de almidón que se produce en el proceso de molienda alterará el grado de absorción de agua por el almidón y el desarrollo de las proteínas del gluten. Aun cuando algunas de las proteínas de la harina son solubles en agua, la mayoría de los estudios que tratan de explicar como el aporte de trabajo mecánico convierte harina y agua en una masa cohesiva, están centrados en las proteínas insolubles. Cuando la masa es óptimamente desarrollada por el mezclado, las proteínas (que parecen formar complejos con la grasa de la harina y algunos carbohidratos) forman una masa coherente y viscoelástica que encapsula el aire, los gránulos de almidón y otros materiales de relleno. Un gluten óptimamente desarrollado por el mezclado es vital para el desarrollo de la estructura de la miga.

- Oclusión de aire

Un ingrediente que en términos volumétricos es un componente significativo de la masa es el aire. Este surge del aire atrapado en el volumen total de la masa de harina o del arrastre durante el proceso de mezcla. No se generan nuevas celdas de gas en operaciones posteriores además de la acción de los agentes de fermentación. Por lo tanto, los núcleos para las células de gas en desarrollo que componen la fase de aire en la miga de pan deben generarse en la mezcladora y su fracción volumen en la masa es función del tipo de mezclado.

## 2) Formación de una estructura de espuma en el moldeado de la masa (fermentación)

El agente de fermentación genera gas ( $\text{CO}_2$ ) dentro de la fase líquida, que se difunde en solución a los núcleos debido a un gradiente de concentración; como resultado, los núcleos se expanden en celdas de gas y se reduce la densidad de la masa. En un verdadero proceso de panificación, el panadero se esfuerza por optimizar la estructura de la miga en el pan final. Por lo tanto, las operaciones de

ponchado, laminado y moldeado son menos influyentes en los procesos mecánicos de desarrollo de masa, de modo que la configuración de las celdas de gas del mezclador debe controlarse más cuidadosamente. Independientemente de si los núcleos de las celdas de gas se presentan en la última etapa de fermentación, provienen del mezclado o de la realización de las celdas en el ponchado, moldeado o laminado, la etapa final de fermentación es responsable de la estructura de la miga, otro factor que influye en la estructuración y tamaño de las celdas de aire durante la fermentación es la influencia de la gravedad en el tamaño de la celda, ya que hay una diferencia de presión entre la parte superior e inferior de la masa y las celdas de la parte inferior se expanden. Cuando las celdas de gas se expanden hasta una fracción volumen por arriba de 0.74, la expansión de cada celda es influenciada por la celda vecina y se muestran poliédricas además la coalescencia se vuelve un problema. Aunque algunos ingredientes ejercen una influencia estabilizante, otros como los componentes no almidones del endospermo pueden generar agujeros. La aumentación de polímeros del gluten da lugar a endurecimiento que mantiene la integridad de las celdas de gas (Scanlon & Zghal, 2001).

3) Estabilización de la estructura porosa mediante la alteración de la configuración molecular de los componentes poliméricos en las paredes de las celdas mediante la aplicación de calor (horneo)

En el horno es donde la estructura final de la miga de pan se establece mediante la conversión de la fase líquida en una sólida. Esto ocurre porque a las temperaturas y los contenidos de humedad típicos de la panificación, se producen transiciones térmicas. Se sabe que una clase de biopolímeros dentro de las proteínas del gluten experimenta agregación, la rigidez se confiere a la estructura cuando estas moléculas se entrecruzan más eficazmente, pero también se espera la asociación de cadenas de moléculas de gluten con muchos otros componentes. La otra clase principal de polímeros en las paredes de las celdas de la masa también se ve afectada por el régimen de calor y humedad del proceso de cocción.

Se induce la fusión parcial de los gránulos de almidón hidratados, pero no su homogeneización completa, por lo que los gránulos individuales son fácilmente reconocibles en el pan. Las moléculas exudadas de los gránulos de almidón también contribuyen a la gran cantidad de asociaciones moleculares, asegurando que el material de la pared de las celdas es realmente un compuesto complejo. Una vez que se han producido estas transiciones térmicas, la posterior expansión de las celdas de gas está limitada por la gran viscosidad de las paredes de las celdas, lo que implica que el esfuerzo adicional de la expansión de gas puede conducir a una ruptura por fricción y a la apertura de las paredes de las celdas. Debido a que los gránulos de almidón originales pueden presentar diferentes tamaños, la retención de una morfología de gránulos de almidón reconocible indica que la distribución de tamaños de gránulos de almidón dentro de la fase sólida ejercerá un efecto sobre las propiedades de las paredes de las celdas de la miga y por lo tanto, influye sobre las propiedades físicas macroscópicas de las paredes celulares de la miga. Debido a que las propiedades mecánicas de los geles de almidón se ven afectadas por el grado de fusión y la concentración de almidón, se esperaría que las propiedades mecánicas de las migas varíen microscópicamente y macroscópicamente; macroscópicamente porque los espesores finitos de las paredes celulares determinarán la fracción volumen de los gránulos en las paredes, y microscópicamente porque la variación en el contenido de humedad de la miga en el pan determinará las diferencias en el grado de fusión de los gránulos de almidón. Por lo tanto, no solamente se esperan gradientes dentro de la hogaza para la fase gaseosa sino también para la fase sólida y ambas afectarán las propiedades mecánicas de la miga. Otro factor que contribuye a la estructura de la miga es el tiempo finito para transferir el calor dentro de la masa, como resultado de esto, la estructura de celdas de la miga formada en las regiones exteriores de la hogaza será comprimida por la presión ejercida por el fenómeno de crecimiento en el horno que ocurre en la región interna de la hogaza, de manera que las celdas exteriores serán elongadas con su eje mayor paralelo a los planos de la corteza (Scanlon y Zghal, 2001).

#### **1.2.4 Estructura de la miga, características físicas, reológicas y texturales del pan blanco**

La estructura final de la miga del pan es, a nivel macroscópico, un sistema de dos fases, es decir, un gas disperso aleatoriamente a una fracción volumen alta ( $\geq 0.8$ ) en una matriz cuyas paredes celulares tienen un espesor de 20-200  $\mu\text{m}$ . A nivel microscópico las paredes celulares no son homogéneas y están compuestas por gránulos de almidón semi-hinchados interconectados por una mezcla compleja de moléculas agregadas. Esta estructura determina la apariencia del pan, la cual contribuye con el 20% del peso agregado al juzgar la calidad del pan y determina sus propiedades físicas y su textura.

El pan como un sólido es suave. Cuando se ve una sección transversal de pan cortado es evidente que la fase sólida ésta conectada por completo. Dicha fase sólida debe ser de tamaño uniforme y expandida (Scanlon y Zghal, 2001).

Para determinar que un pan cuenta con las características deseadas, las propiedades físicas juegan un papel muy importante, entre éstas se encuentran, el volumen específico, el color y la pérdida de peso por horneado. Dentro de las propiedades texturales la dureza o firmeza es de vital importancia además de cohesividad y elasticidad, pero en ello influyen otros parámetros, mientras que en reología de la masa es importante reconocer los módulos elástico y viscoso, es decir, su comportamiento viscoelástico.

##### **Volumen específico**

La levadura genera dióxido de carbono y es la responsable de expandir el volumen del pan, la retención de este gas es de interés ya que determina la estructura de la miga y el volumen del pan (Hedjrani *et al.*, 2016). El volumen específico es el volumen ocupado por unidad de masa de un material. Cuando se habla de pan de caja el método común para determinarlo es desplazamiento de semillas, donde

se han encontrado valores de 2.5-3.18 cm<sup>3</sup>/g según Lassoued *et al.* (2007) y Moore *et al.* (2004).

## Color

En alimentos, el color se considera como una impresión sensorial, percibida por los ojos del consumidor, esta propiedad puede ser medida por métodos como la paleta Pantone o colorimetría, esta prueba puede realizarse en la corteza y/o en la miga del pan, generalmente se emplean colorímetros de reflectancia y el color es reportado en el espacio L, a, b, donde L representa la luminosidad (de negro a blanco), a (de rojo a verde) y b (de amarillo a azul) como se puede ver en la Figura 3, donde se esquematiza el método CIELAB que se describe como un método para expresar el color de un objeto usando una notación numérica por medio de L, a y b (Konica Minolta, 2014).

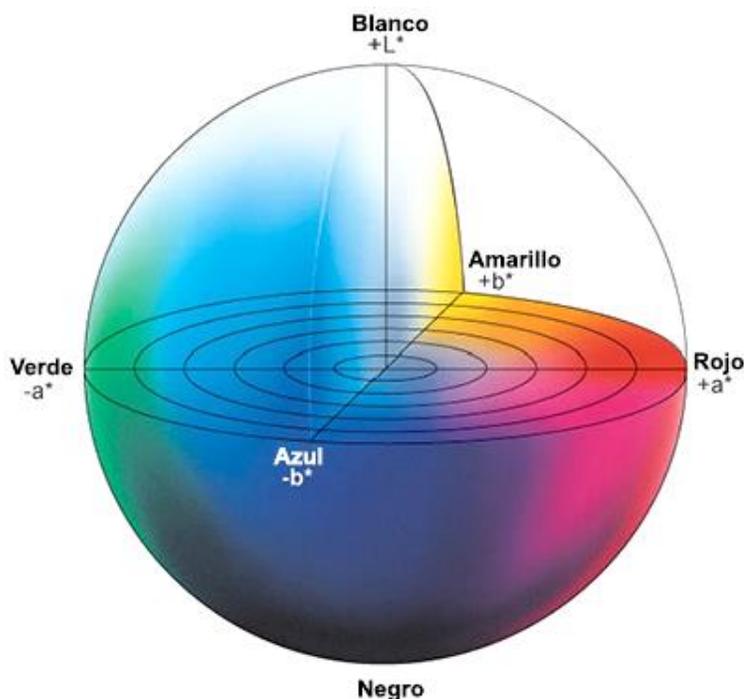


Figura 3. Espacio de color CIELAB (Konica Minolta, 2014).

En el Cuadro 3 se presentan valores de L, a y b obtenidos de la corteza y miga de pan de caja elaborado con harina de trigo, donde se puede observar que cuando

se trata de la corteza los valores de L se encuentran positivos y mayores a 50, a y b son positivos y menores a L, mientras que para la miga de pan se encuentran valores de L mayores, valores de a negativos, valores de b positivos. Es decir que la miga suele presentar mayor luminosidad mientras que en la corteza destaca el aumento de tonos rojizos en comparación con la miga.

Cuadro 3. Valores de L, a, b reportados para pan blanco de caja

Harina de trigo	*L	*a	*b	Autor
<b>Corteza</b>	54.32	5.49	18.62	Hejrani <i>et al</i> , 2016
<b>Miga</b>	79.57	-1.27	14.82	Ziobro <i>et al</i> , 2013

\*L: luminosidad, a: rojo (+), verde (-) b: amarillo (+), azul (-)

#### Estructura de la miga

Los términos textura de la miga o grano de la miga son empleados para describir la estructura de la celda de la miga de la superficie de una rebanada de pan y es un criterio de calidad importante empleado a nivel comercial y en laboratorios de investigación para juzgar la calidad del pan, junto con otros factores como color y textura. Para evaluar la miga, los parámetros importantes son número y tamaño de poros, uniformidad de tamaño, espesor de las paredes de las celdas, forma de las celdas. Tradicionalmente se ha hecho por medio de jueces entrenados; la industria moderna requiere de métodos más rápidos, precisos y consistentes, por lo que recientemente se ha adoptado el análisis de imágenes digitales para la evaluación objetiva y cuantitativa de la estructura de la miga, empleando programas específicos diseñados para este fin (Scanlon y Zghal, 2001).

Los sistemas de análisis de imagen están diseñados para extraer información y transformarla en valores numéricos lo que nos permite cuantificar la información contenida en una imagen, esta información puede ser entregada en forma de

imágenes retocadas o con falsos colores se puede obtener información como el área de los objetos contenidos en la imagen, forma, diámetro, número de objetos, fracción vacía, homogeneidad, porosidad y altura, entre otros (Serrano, 1999).

Lo anterior ha sido utilizado para obtener información sobre las características de la miga de pan, por ejemplo, la segmentación de imagen que consta en un proceso que separa o clasifica objetos de interés dentro de una imagen de su fondo, lo que típicamente produce una imagen binaria. El umbral y la detección de bordes son métodos de segmentación que se basan en la discontinuidad de los valores de nivel de grises dentro de una imagen digital, el objetivo al segmentar una imagen de miga de pan con base a celdas individuales es detectar con precisión el gas y las fases sólidas y definir la distribución del tamaño de las celdas, así como las paredes de las mismas (Scanlon & Zghal, 2001).

### Textura de pan

Si bien la característica textural más evaluada en el pan es la firmeza, medida de la fuerza necesaria para comprimir una distancia especificada, la prueba de perfil textura es la más adecuada, pues permite obtener parámetros como cohesividad, elasticidad y masticosidad.

El análisis de perfil de textura simula la masticación del producto y da a conocer si será aceptado por el consumidor; cabe mencionar que no existen parámetros de referencia, ya que las condiciones de prueba como dispositivo empleado, velocidad de prueba y nivel de compresión, varían de un estudio a otro e influyen en los valores de los parámetros medidos, sin embargo, la AACCC (1983), propone condiciones las cuales han sido utilizadas y modificadas por diversos autores, en el Cuadro 4 se registran condiciones aplicadas por diferentes investigadores para la prueba de perfil de textura de pan de caja.

Cuadro 4. Condiciones empleadas para la prueba de análisis de perfil de textura para pan con gluten

Autor	Equipo	Dispositivo	Condiciones
<b>Ziobro et al., 2013</b>	Stable Micro Systems TA-XT2 plus	Cilindro de aluminio 20 mm	Velocidad 5 mm/s 50% compresión Rebanadas 20 mm de grosor
<b>Demirkesen et al., 2008</b>	Stable Micro Systems TA-XT2i	Cilindro de aluminio 10 mm	Velocidad 0.9 mm/s 25 % compresión Rebanadas 25 mm de grosor
<b>Moore et al., 2004</b>	Stable Micro Systems TA-XT2i Surrey UK	Cilindro de aluminio 35 mm	Velocidad 2 mm/s 60% compresión

Se han encontrado resultados de análisis de perfil de textura en pan de caja de trigo donde según Moore *et al.* (2004), reporta valores de dureza de 6 N, masticabilidad de 4.5 N, cohesividad de 0.5, mientras que presenta alta elasticidad (0.9), bajo las condiciones presentadas en el Cuadro 4, dichas pruebas se realizaron a la miga de rebanadas de pan.

#### Reología de la masa

Aunque algunas de las proteínas de la harina son solubles en agua, las proteínas insolubles son el foco de estudio dirigido a describir cómo el trabajo mecánico convierte la harina y el agua en una masa cohesiva. Cuando la masa es óptimamente desarrollada, las proteínas (las cuales parecen estar formando complejos con lípidos y algunos carbohidratos de la harina) forman una masa

viscoelástica. El desarrollo óptimo del gluten de la estructura se ve notablemente afectado por la desagregación insuficiente de los polímeros de gluten nativos. Aunque se espera que la composición y la estructura de la fase líquida cambien con las operaciones de procesamiento posteriores, la masa viscoelástica es la matriz para la formación de la pared de las celdas en la miga final (Scanlon & Zghal, 2001). Los métodos más comunes para estudiar la extensibilidad, tenacidad y elasticidad de la masa son farinografía o mixografía, y para estudios más específicos se aplican pruebas de cizalla oscilatoria que sirve para conocer la viscoelasticidad de la masa.

Es conveniente conocer la reología de la masa para obtener un producto deseado, ya que de este modo se puede detectar alguna anomalía en la formulación que pueda influir en el producto final, también es utilizado en la estandarización del proceso y en el control de la calidad. El comportamiento viscoelástico de la masa se evalúa generalmente por medio de pruebas de cizalla oscilatoria de las cuales se obtiene la contribución del comportamiento elástico (módulo elástico,  $G'$ ) y el comportamiento viscoso (módulo viscoso  $G''$ ) en la zona de viscoelasticidad lineal. Witzak *et al.* (2012), evaluaron el comportamiento viscoelástico de masa para pan elaborado con harina de trigo sin levadura, a 25 °C con placas paralelas; realizaron inicialmente un barrido de esfuerzos de 0.1 a 100 Pa a frecuencia de 1 Hz para encontrar la zona de viscoelasticidad lineal, y posteriormente un barrido de frecuencias de 0.1-100 rad/s bajo deformación de 0.1%. Encontraron que en la masa predominó el módulo elástico sobre el viscoso y ambos fueron ligeramente dependientes de la frecuencia, ejemplo de ello se puede ver en la Figura 4 donde el pan control elaborado con harina de trigo está representado por un triángulo.

### **1.3 GLUTEN**

Las proteínas de la harina de trigo son cruciales para determinar la calidad de panificación de la harina ya que la cantidad de proteína y las características cualitativas son importantes. La capacidad de la harina de trigo para hornear pan

se debe a las propiedades fisicoquímicas de su fracción de proteína de gluten y las diferencias en la calidad de la panificación entre las variedades de trigo han demostrado ser debidas a las diferencias en esta misma fracción (Blanshard *et al.*, 1987).

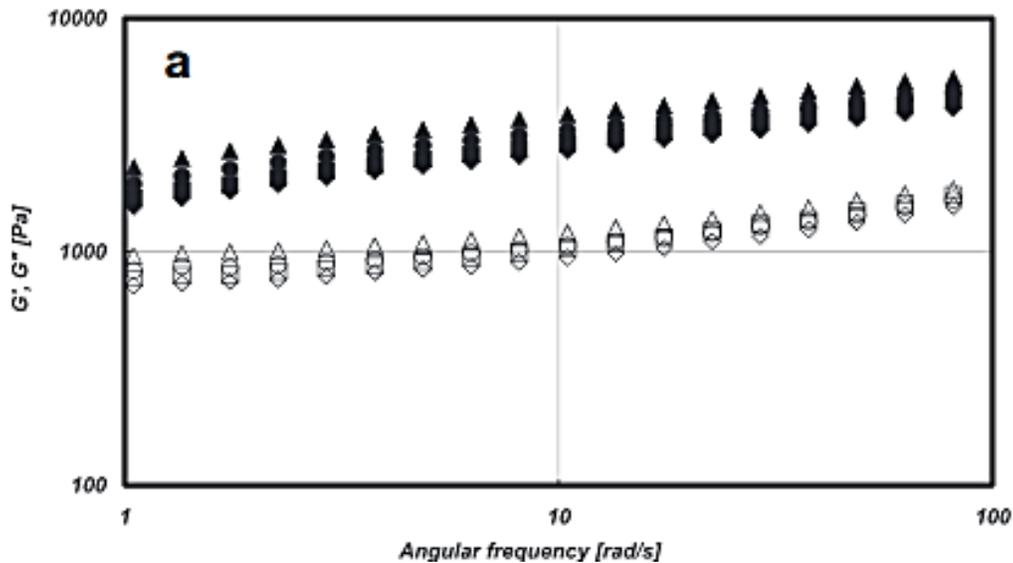


Figura 4. Comparación de masa elaborada con harina de trigo (triángulo) y masa sin gluten a distintas concentraciones de almidón (Witzak *et al.*, 2012), módulo elástico (figuras rellenas), módulo viscoso (figuras vacías).

El gluten es la principal proteína que forma la estructura en la harina, y es responsable de las características elásticas de la masa, además contribuye a la apariencia y la estructura de la miga de muchos productos horneados. La eliminación del gluten causa problemas importantes para los panaderos, y en la actualidad, muchos productos sin gluten disponibles en el mercado son de baja calidad, con escasa sensación y sabor en la boca (Gallagher *et al.*, 2004); en la Figura 5 se muestra una fracción del gluten.

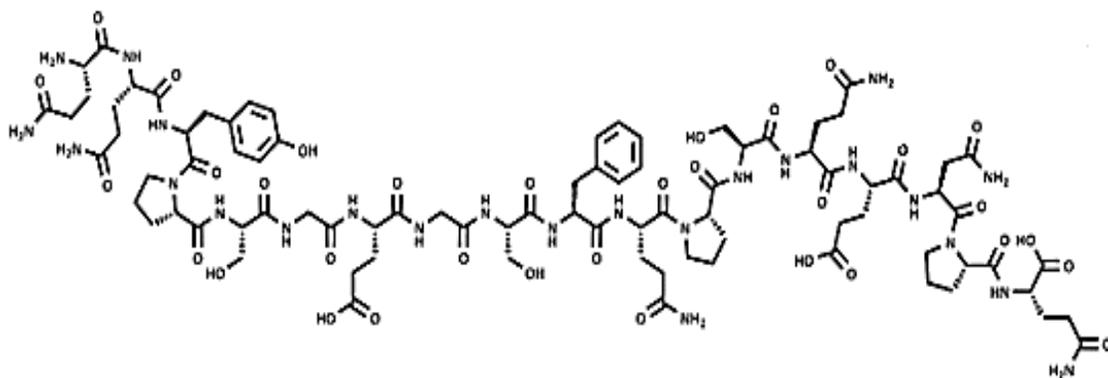


Figura 5. Estructura de un fragmento del gluten (CanStockPhoto, 2017)

El gluten está compuesto de gliadina, que contiene la mayor parte de los productos que resultan tóxicos para los celíacos, y glutenina, que es extremadamente elástica (Quaglia, 1991).

Son las proteínas del gluten las que se reconocen generalmente como aquellas de importancia en la panificación. Representan alrededor del 80-90% de las proteínas totales de la harina blanca y comprenden esencialmente dos grupos principales de proteínas, gliadinas y gluteninas, que están presentes en cantidades aproximadamente iguales; sin embargo, existen importantes diferencias químicas y físicas entre las proteínas gliadina y glutenina, que son relevantes para sus características funcionales. La fracción de gliadina comprende proteínas monoméricas: cuando están presentes, los enlaces disulfuro son intra-catenarios. La fracción de glutenina, por otro lado, comprende proteínas poliméricas, cuyas subunidades componentes casi con seguridad están unidas por enlaces disulfuro inter-catenarios ya que no pueden disociarse en disolventes fuertemente disociantes, sino que se disocian fácilmente con la adición de agentes reductores (Blanshard *et al.*, 1987).

Las propiedades reológicas del gluten (su combinación de propiedades viscosas, elásticas y cohesivas) generalmente se consideran responsables de conferir calidad de panificación a la harina de trigo, y tanto las fracciones de gliadina como

de glutenina contribuyen a la naturaleza viscoelástica del gluten. En una masa recién humedecida se considera que los polímeros de glutenina están orientados aleatoriamente entre sí. Aunque existen numerosas interacciones entre las moléculas en sus puntos de contacto a través de enlaces débiles no covalentes, la contribución global de tales fuerzas secundarias a la resistencia mecánica de la masa es pequeña debido a la orientación aleatoria de las moléculas. Al aplicar la cizalla, durante el mezclado de la masa, los enlaces secundarios débiles entre los polímeros se rompen fácilmente y los polímeros tienden a alinearse en el plano de la tensión de cizalladura. Se forman nuevos enlaces secundarios a medida que los polímeros entran en contacto, pero ahora estas fuerzas individualmente débiles actúan cooperativamente debido a las concatenaciones. El resultado es que la resistencia de la masa se incrementa sustancialmente; dicho mecanismo esencialmente explica el desarrollo de la masa a nivel molecular, en la Figura 6 se esquematiza la alineación de los polímeros y se ejemplifican los enlaces formados (Blanshard *et al.*, 1987).

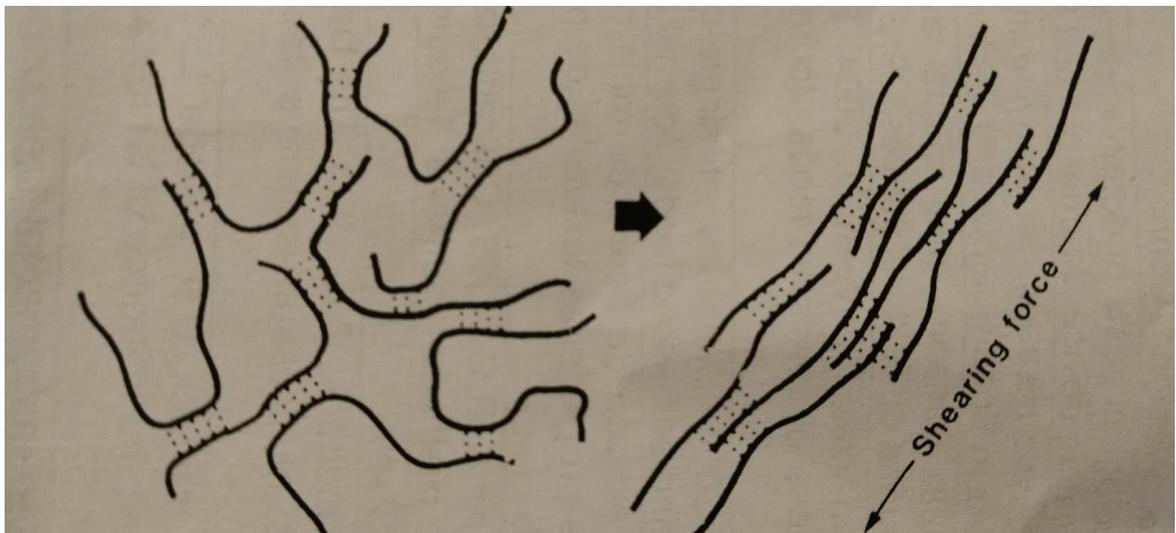


Figura 6. Representación esquemática de como los polímeros de la glutenina comienzan a alinearse como resultado del trabajo mecánico impuesto durante el mezclado de la masa (Blanshard *et al.*, 1987)

## **1.4 CELIAQUÍA**

La enfermedad celíaca o celiacía se define como una enfermedad auto inmunitaria observable en poblaciones genéticamente predispuestas que revierte con la supresión del gluten de la dieta habitual, produce una inflamación grave con atrofia vellositaria en el intestino delgado que suele manifestarse con algún grado de mala absorción. La celiacía pasó de ser un problema emblemático de absorción, a una peculiar entidad auto inmunitaria que compromete la respuesta inmunitaria innata y la adaptativa (Eduardo *et al.*, 2008).

Según Gutiérrez y Villanueva (2003), la enfermedad celíaca se define como una enteropatía sensible a proteínas de origen vegetal presentes en el trigo, cebada, centeno, avena y derivados, provocando una lesión severa de la mucosa del intestino delgado en determinados individuos, que son predispuestos genéticamente.

### **1.4.1 Descripción de la enfermedad**

Una vez que las enzimas digestivas han digerido los nutrientes presentes en la dieta, la mucosa intestinal cumple la función de absorberlos. Si un paciente con esta enfermedad ingiere gluten por descuido, provoca irritabilidad en las vellosidades y microvellosidades intestinales, causando una deficiente absorción de los nutrientes (proteínas, grasas, carbohidratos, sales minerales y vitaminas), diarreas y retraso del crecimiento, entre otros. Este desorden intestinal inducido por intolerancia puede movilizar mecanismos de autoinmunidad (capaces de fabricar anticuerpos contra partes del propio cuerpo). Por lo que es una enfermedad pre-cancerosa (Bender, 1995).

Las paredes del intestino están dobladas formando proyecciones semejantes a dedos (vellosidades) que contienen vasos capilares, un vaso linfático y un área superficial muy grande. Los nutrientes no grasos, como el producto de la digestión de las proteínas y carbohidratos pasan directamente a la sangre a través de las vellosidades del intestino. Mientras que los ácidos grasos pasan de las

vellosidades al vaso linfático donde vuelven a formar moléculas grasas. Cuando hay una mala absorción, intervienen factores como: menor área de absorción por acortamiento o desaparición de vellosidades, alteración del metabolismo de las células epiteliales y deficiencia de disacáridos, debido a la alteración de las microvellosidades como se puede ver en la Figura 7.

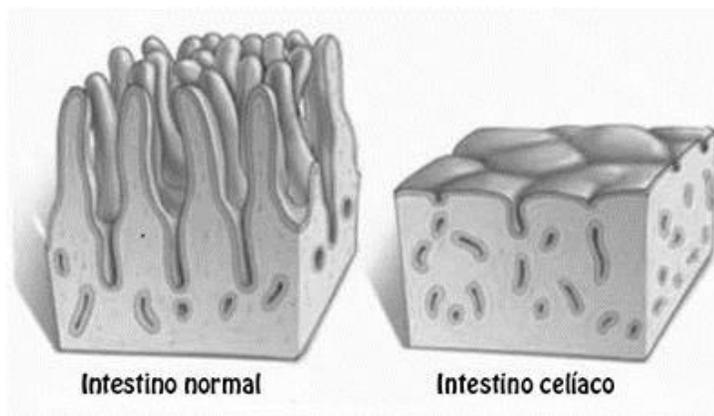


Figura 7. Vellosidades del intestino de personas que padecen celiarquía

#### 1.4.2 Celíacos en México

Se calcula que, aproximadamente 10% de la población mundial padece celiarquía, pero la mayoría es asintomática y lo ignora. En México, se determinó que el 0.68% de la población es celíaca; es decir, uno de cada 140 mexicanos está en esta condición de vida (Hernández *et al.*, 2017). Las personas que padecen celiarquía se ven forzadas a cambiar su dieta por completo, evitando principalmente productos de panificación debido al contenido de gluten que poseen, se han encontrado diversos estudios que elaboran productos de panificación libres de gluten tales como muffins, tortillas, galletas entre otros.

#### 1.5 PAN BLANCO DE CAJA LIBRE DE GLUTEN

Debido al porcentaje de la población que padece celiarquía se ha buscado desarrollar pan de caja libre de gluten, a pesar de los pocos estudios acerca de

este tipo de pan, el objetivo primordial es que éste contenga las características físicas y texturales lo más parecidas a un pan de caja normal.

En la elaboración de panes libres de gluten, se usan harinas de otros cereales diferentes del trigo, leguminosas, oleaginosas o combinación de estas. La harina de arroz ha sido frecuentemente usada en la panificación sin gluten debido a que su prolamina (orzenina) no es tóxica para los celíacos. A diferencia de las gliadinas de la harina de trigo donde sus secuencias de péptidos son ricos en glutamina y prolamina que son responsables de su toxicidad, la harina de arroz presenta un menor porcentaje de estos dos aminoácidos (Schuppan *et al.*, 2000).

Al carecer de la estructura tan importante en la panificación como lo es el gluten, estas masas elaboradas con harinas compuestas reducen la cohesividad y la propiedad de retener el bióxido de carbono producido, dando como resultado productos menos apetecibles, panes muy densos y pesados (Gallagher *et al.*, 2003). La miga de estos productos pierde cohesividad y tienden a ser quebradizos. La gomosidad durante la masticación suele ser otro problema.

Para lograr que el pan sin gluten sea aceptado por el consumidor, se trata de brindar al pan las características lo más cercanas posibles al pan con gluten, para ello es posible adicionar hidrocoloides o gomas, los cuales son polisacáridos de alto peso molecular que poseen propiedades coloidales, además de ser fáciles de dispersar, las cuales se utilizan para enlazar, espesar y emulsionar los ingredientes (Gluten-free bakery, 2013). Se ha notado una mejora considerable al adicionar gomas especialmente goma xantana y goma guar y en ocasiones hidroxipropilmetilcelulosa en incluso se ha observado sinergismo al combinarlas (Hager *et al.*, 2012; Demirkesen *et al.*, 2008)

### **1.5.1 Formulación de pan de caja libre de gluten**

La formulación de productos de panadería sin gluten presenta un desafío formidable tanto para el técnico de cereales como para el panadero. En los últimos

años ha habido mucho más producto libre de gluten, lo que implica un enfoque diverso que ha incluido el uso de almidones, proteínas lácteas, prebióticos y combinaciones de los mismos, como alternativas al gluten, para mejorar la estructura, sensación en la boca, aceptabilidad y vida útil de productos de panadería sin gluten. Tal investigación y desarrollo también han llevado a un aumento en la gama de productos sin gluten que se venden en tiendas de salud y supermercados (Gallagher *et al.*, 2003).

Los almidones e hidrocoloides son ampliamente utilizados en la industria de la panadería para impartir propiedades de textura y apariencia a los alimentos a base de cereales. Varios autores han utilizado una variedad de almidones con gomas o hidrocoloides para elaborar productos de panadería sin gluten. Se han realizado estudios utilizando almidones de trigo y almidones que no provengan de trigo, siendo éste último más deseable ya que algunos celíacos no pueden tolerar el almidón de trigo debido a que puede contener pequeñas fracciones gliadina lo cual a largo plazo crea problemas; un estudio sobre las funciones del almidón en la elaboración del pan demostró que los panes podrían prepararse a partir de almidón y otras sustancias formadoras de geles. Los almidones de arroz están ampliamente disponibles y ofrecen un gran potencial en la formulación de productos horneados sin gluten (Gallagher *et al.*, 2004).

Las gomas y espesantes son empleados en productos sin gluten debido a las diferentes funciones que pueden desarrollar, tal como espesar, gelificar, retener agua y mejora de textura. Estudios demostraron que muchos tipos de goma incluyendo hidroxipropilmetilcelulosa y algarrobo que dieron una formación exitosa de pan de arroz donde la hidroxipropilmetilcelulosa proporcionó una expansión de volumen óptima. Por su lado, la goma guar promueve una estructura de la miga con más poros y mayor distribución de los mismos, mientras que el algarrobo aumenta la altura (Gallagher *et al.*, 2004).

Las proteínas lácteas son ingredientes altamente funcionales y debido a su versatilidad pueden incorporarse fácilmente en muchos productos alimenticios. se pueden usar en productos de panadería tanto para beneficios nutricionales como

funcionales que incluyen mejora del sabor y la textura y mejora del producto en almacenamiento. Los productos lácteos pueden usarse en formulaciones de pan sin gluten para aumentar la absorción de agua y, por lo tanto, mejorar las propiedades de manejo de la mezcla. Sin embargo, la suplementación de panes sin gluten con los polvos de alto contenido de lactosa no es adecuada para los celíacos que tienen un daño significativo en sus vellosidades intestinales, ya que pueden ser intolerantes a la lactosa. En general, el polvo con un alto contenido de proteína y baja lactosa (caseinato de sodio, leche) da panes con una forma y volumen general mejorados, además de una textura firme en la miga (Gallagher *et al.*, 2003).

Diversos autores han elaborado formulaciones para pan de caja libre de gluten, algunos ingredientes como harina de arroz, harina de trigo sarraceno, hojuelas de papa, sorgo, soya, azúcar, sal, levadura, grasa de origen vegetal, gomas, almidones, proteínas y enzimas ya que ayudan a la mejora de las características de la masa y producto final para lograr características cercanas al pan de caja con harina de trigo, en el Cuadro 5 se reúnen algunas formulaciones control reportadas en diversos artículos donde se puede ver que la mayoría opta por sustituir la harina de trigo por harina de arroz y otras combinaciones de la misma con harina de trigo sarraceno, soya y de maíz; además de los ingredientes básicos, adicionan gomas como guar, xantana, HPMC y pectina, almidones de maíz, papa, proteínas e incluso hojuelas de papa para brindar las características más parecidas al pan con gluten; dos autores (Moore *et al.*, 2004; López, 2014) agregan huevo o clara de huevo para conferir viscoelasticidad a la masa y obtener mejores resultados en el producto final.

Cuadro 5. Formulaciones de pan sin gluten.

Ingredientes (%)	Moore et al., 2004	Torbica et al., 2010	Mozo, 2015	Rózylo et al., 2017	Lopez, 2014	Hadjiandreou, 2014	Ziobro et al., 2013
Harina de arroz	17.7	30.1	40.2	12.6	18.8	27.5	---
Hojuelas de papa	8.8	---	---	---	8.7	27.5	---
Almidón de maíz	4.4	---	---	---	---	---	32.9
Almidón de papa	---	---	---	---	14.2	---	8.2
Harina de soya	4.4	---	---	---	---	---	--
Levadura	1.2	2.7	1.5	3	1.6	0.8	2.3
Aceite	---	1.3	---	---	3.3	---	1.2
Sal	0.6	1	0.3	2	0.4	1.2	0.8
Azúcar	0.4	1.3	5.4	---	3.3	---	0.9
Goma xantana	0.3	---	---	---	0.7	---	---
Agua	37.1	60.2	---	50	31.3	43	47.3
Leche entera	13.3	---	44.2	---	---	---	---
Mantequilla	---	---	5.6	---	---	---	---
HPMC	---	---	1.2	---	---	---	---
Harina de maíz	---	---	---	12.6	---	---	---
Harina de trigo sarraceno	---	3.3448	---	10.8	---	---	---
Fibra	---	---	1.6	5	---	---	---
Goma guar	---	---	---	2	---	0.8	---
Pectina	---	---	---	2	---	0.8	---
Huevo	10.6	---	---	---	---	---	---
*Proteína	---	---	---	---	---	---	4.6
Clara de huevo	---	---	---	---	17.4	---	---
Polvo de hornear	0.7	---	---	---	--	---	---
Konjac	0.5	---	---	---	---	---	---
Total	100	100	100	100	100	100	100

\*mezcla de proteínas: albumina, soya, altramuz, colágeno, chícharo.

### 1.5.1.1 Goma xantana

La goma de xantano es un heteropolisacárido extracelular de alto peso molecular secretado por el microorganismo *Xanthomonas campestris*. Consiste en unidades repetidas de D-glucosa, vinculadas a la cadena principal celulósica de  $\beta$ -1,4-D-glucano (ver figura 8). Cadenas laterales ( $\beta$ -D-manosa (1,4) - $\beta$ -D ácido glucurónico- (1,2) - $\alpha$ -D-manosa) se adjuntan a residuos de glucosa. El resto de manosa terminal puede llevar residuos de piruvato unidos a la posición C4 y C6. En la parte interna la manosa está acetilada en C6. Algunos sustituyentes de acetilo y piruvato están vinculados en cantidades variables a las cadenas laterales, dependiendo de las condiciones de fermentación y tensión utilizadas. En cuanto a su estructura secundaria, la molécula puede estar en conformación ordenada o desordenada, dependiendo de la matriz. La xantana está presente en su forma ordenada nativa debajo del punto de fusión, una temperatura que depende de la fuerza iónica de los enlaces. Es una estructura rígida de doble hélice estabilizada por enlaces no covalentes (es decir, enlaces de hidrógeno, interacción electrostática y efectos estéricos). La transformación inducida por la temperatura de su conformación ordenada a desordenada se atribuye a una completa o separación parcial de los doble filamentos. La renaturalización puede ocurrir en condiciones favorables, es decir, temperaturas por debajo de la temperatura de transición y altas concentraciones de sal. La xantana es soluble en agua fría y las soluciones exhiben altamente flujo pseudoplástico en solución, las moléculas son capaces de formar enlaces intermoleculares que resultan en la formación de un enlace débil y una red compleja que resultan es sustancias espesas y con comportamiento viscoelástico (Born *et al.*, 2002).

### 1.5.1.2 Hidroxipropilmetilcelulosa

La hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC) es un éter de celulosa obtenido por enlaces químicos de grupos hipdroxipropil y metilo a la cadena principal de celulosa  $\beta$ -1,4-D-glucano, esta modificación química conduce a un polímero hidrosoluble con alta actividad superficial y propiedades únicas con respecto a su característica de



### **1.5.1.3 Almidón de papa**

El almidón es el principal polisacárido de reserva de la mayoría de los vegetales, y la principal fuente de calorías de la mayoría de la humanidad. Gran parte de las propiedades de la harina y de los productos de panadería y repostería pueden explicarse conociendo el comportamiento del almidón. A nivel mundial, son importantes fuentes de almidón el maíz, trigo y papa; el almidón no es realmente un polisacárido sino la mezcla de dos, la amilosa y la amilopectina (20% y 30% respectivamente), ambos están formados por unidades de glucosa, en el caso de la amilosa unidas entre ellas por enlaces  $\alpha$  1-4, lo que da lugar a una cadena lineal, en el caso de la amilopectina, aparecen ramificaciones debidas a enlaces  $\alpha$  1-6, las ramificaciones aparecen cada 20 ò 30 glucosas. El resultado son moléculas enormes de un peso molecular entre 10 millones y 500 millones. En algunos almidones, como el de patata, la amilopectina tiene también algunos ésteres de fosfato. En el caso de la patata, la presencia de grupos fosfato crea repulsiones entre cargas negativas, lo que facilita la separación de las cadenas y su interacción con el agua (Calvo, 2016).

El almidón o fécula de papa es el producto obtenido mediante la extracción del carbohidrato de la papa, en el cual se elimina la fibra mediante el rompimiento de los gránulos y lavados con agua, posteriormente se aplica un secado cuidadoso, mismo que le permite mantener sus propiedades funcionales obteniendo como resultado un polvo blanco como se observa en la imagen 9 (QuimiNet, 2011); el almidón de papa es de fácil hidratación y confiere dispersiones muy viscosas y geles poco resistentes por lo que son utilizados para dar estabilidad a salsas, productos lácteos, productos untables como mermeladas y jaleas, así como a productos de panificación (Calvo, 2016).

### **1.5.1.4 Hojuelas de papa**

Las hojuelas de papa son trocitos planos de puré deshidratado; se fabrican de la siguiente manera: se cuecen y muelen papas hasta hacer puré, se aplasta el puré

con rodillos sobre la superficie de un tambor, se seca la capa de puré rápidamente hasta que su contenido en humedad llega al nivel deseado, se raspa del tambor la película de puré seco, se rompe dicha película en un tamizador y se empacan los trozos u hojuelas obtenidos como se observa en la Figura 8. Aunque muchas de las células de las papas se rompen en el proceso de fabricación, la textura del producto reconstituido es lo suficientemente firme debido al pre cocido y al enfriamiento posterior (Odar, 2008).



Figura 9. Hojuelas de papa y almidón de papa respectivamente

### **1.5.2 Características de masa y producto final de pan de caja sin gluten**

Las características de los panes libres de gluten varían según el tipo de harina que es empleado, así como la adición de gomas, almidones, proteínas de diferente origen y emulsificantes, también influyen las condiciones de prueba y tipo de molde empleado. El volumen específico reportado por diversos autores para pan sin gluten a base de harina de arroz con gomas y almidones se encuentra muy por debajo de los panes regulares con gluten con valores entre 1.29-2.19  $\text{cm}^3/\text{g}$  (Rezentti *et al.*, 2007; Hager *et al.*, 2012; Demirkesen *et al.*, 2008) por lo que un bajo volumen específico se debe a la falta de propiedades viscoelásticas que no brinda la harina de arroz por sí sola. Otros autores han adicionado gomas como xantana e hidroxipropilmetilcelulosa obteniendo que la xantana mejora el volumen específico, según lo reportan Hager *et al.* (2012) y Demirkesen *et al.*

(2008); Hager *et al.* (2012), también reportan el uso de trigo sarraceno el cual mejora el volumen específico al adicionar hidroxipropilmetilcelulosa (1.69-1.96 cm<sup>3</sup>/g). Jubete *et al.* (2009), con el uso de harina de arroz y almidón de papa sin adición de gomas obtuvieron un volumen específico de 1.29 cm<sup>3</sup>/g.

Las características texturales evaluadas por análisis de perfil de textura se ven afectadas al excluir el gluten del pan de caja, generalmente muestran mayor dureza y disminuye su elasticidad y cohesividad, en el Cuadro 6 se exponen los equipos y condiciones utilizados por diversos autores al trabajar con pan sin gluten basándose en AACC (1983).

Demirkesen *et al.* (2008), reportan valores de dureza entre 1.2 y 1.3 N al usar harina de arroz, xantana e hidroxipropilmetilcelulosa, mientras que Moore *et al.* (2004) reportan valores de 3.5-4 N utilizando harina de trigo sarraceno, harina de arroz y goma xantana. Mientras que para masticosidad reporta valores entre 4 y 11 N. Moore *et al.*, (2004) reportan valores de cohesividad 0.5 a 0.8 (adimensional) y elasticidad de 0.9 (adimensional).

El color también se ve afectado principalmente en la miga, según Jubete *et al.* (2009) y Storck *et al.* (2010) los valores L, a y b se encuentran entre 69.7 -79.3, -0.98 – 3, 10.89 – 16.88, respectivamente.

En cuanto a la reología de la masa sin gluten, Rezzenti *et al.* (2007), Demirkesen *et al.* (2008) y Storck *et al.* (2010) concuerdan en que en la masa predomina el módulo elástico, G'; encontraron que el comportamiento viscoelástico lineal se encuentra entre 0.1 y 1 Hz de frecuencia.

## 1.6 FRUCTANOS

Los fructanos son un grupo de oligosacáridos y polisacáridos con residuos de  $\beta$ -fructofuranosil. Muchos hongos, bacterias y plantas sintetizan estas moléculas. En las plantas, los fructanos se acumulan en la vacuola, pero también son

encontrados en el floema, y sirven como carbohidratos de almacenamiento, así como también intervienen en la tolerancia al frío y a la sequía (Alvarado *et al.*, 2014).

Cuadro 6. Condiciones empleadas para la prueba de perfil de textura para pan de caja sin gluten

<b>Autor</b>	<b>Equipo</b>	<b>Dispositivo</b>	<b>Condiciones</b>
<b>Demirkesen <i>et al.</i>, 2008</b>	Stable Micro Systems TA-XT2	Cilindro de aluminio 10 mm	Velocidad 0.9 mm/s 25 % compresión Rebanadas 25 mm de grosor
<b>Hager <i>et al.</i>, 2012</b>	Stable Micro Systems TA-XT2i	Cilindro de aluminio 35 mm	Velocidad 5 mm/s 50 % compresión Rebanadas 25 mm de grosor
<b>Jubete <i>et al.</i>, 2009</b>	Stable Micro Systems TA-XT2i	Cilindro de aluminio 36 mm	Velocidades de 2 mm/s acercamiento, prueba 1 mm/s y retirada 5mm/s 40 % compresión
<b>Moore <i>et al.</i>, 2004</b>	Stable Micro Systems TA-XT2i Surrey UK	Cilindro de aluminio 35 mm	Velocidad 2 mm/s 60% compresión
<b>Rezentti <i>et al.</i>, 2007</b>	Stable Micro Systems TA-XT2i	Cilindro de aluminio 35 mm	Velocidad 2 mm/s 40 % compresión Rebanadas 25 mm de grosor
<b>Storck <i>et al.</i>, 2010</b>	Stable Micro Systems TA-XT2	Cilindro de acrílico 35 mm	Velocidad 2 mm/s 60% compresión

Basados en el enlace glicosídico entre sus unidades de fructosa, los fructanos pueden dividirse en:

- Inulinas, con enlaces  $\beta$  2→1;

- Levanos, con enlaces  $\beta$  2→6;
- Graminanos, con ambos tipos de enlaces (Vereyken *et al.*, 2003).

Otra forma de clasificarlos es por la longitud de sus cadenas: cadenas largas (grados de polimerización mayores a 10) y cortas (con grados de polimerización de 3 a 10) comúnmente nombrados como fructo-oligosacáridos (Alvarado *et al.*, 2014).

Los fructanos se extraen generalmente de los vegetales por molienda y solubilización en agua caliente. Posteriormente se trata el extracto con una mezcla de enzimas que incluye, entre otras, sacarasa, amilasa y maltasa para hidrolizar los carbohidratos presentes, menos los fructanos. Los azúcares resultantes se eliminan por lavado con etanol al 80%, o bien a través de elusión por una columna de intercambio iónico. Los fructanos obtenidos son tratados con una enzima purificada o inmovilizada si se desean transformar en fructanos de menor peso molecular (Chacón, 2006).

Los fructanos son obtenidos de diferentes plantas, incluyendo la achicoria, la alcachofa de Jerusalem, el ajo, la cebolla, los espárragos, las plantas de la especie *agavaceae* (Praznik *et al.*, 2002) y también son producidos por algunas especies de hongos y bacterias. A pesar de sus similitudes, los fructanos son distintos el uno del otro en su origen, la estructura y las características de fermentación. Sólo unas pocas plantas que contienen fructanos se utilizan actualmente en la industria de alimentos funcionales, incluyendo la achicoria (*Cichorium intybus*), la alcachofa de Jerusalén (*Helianthus tuberosus*) y el agave (*Agave tequilana*). La achicoria y la alcachofa de Jerusalén contienen fructanos tipo inulina, siendo predominantemente no ramificados. Mientras que, los fructanos de agave poseen una estructura de tipo mixta que les provee la característica de ser ramificados (Roberfroid, 2007).

### **1.6.1 Beneficios y funcionalidad tecnológica de fructanos**

El uso de los fructanos como prebióticos se debe a la singular característica de que no son digeridos ni absorbidos hasta llegar al intestino grueso, por lo que son

considerados a su vez como fibra dietética, donde inducen la fermentación y estimulan selectivamente el crecimiento de bacterias benéficas (*Bifidobacterium* y *Lactobacillus*) (Qiang *et al.*, 2009).

Los fructanos son utilizados como sustitutos no cariogénicos e hipocalóricos de azúcares, en productos de confitería, chocolatería y bebidas de aceptación sensorial en general admisible en comparación con productos edulcorados de forma convencional (Hernandez *et al.*, 2010). En alimentos de contenido de humedad muy elevado, especialmente en helados y otros derivados lácteos, así como en embutidos, los fructanos hidrolizados adoptan una textura muy similar a la de la grasa por lo que se pueden emplear como sustitutos de ésta (Cherbut, 2002).

A diferencia de otras fibras, los fructanos no dejan sabores residuales y pueden agregarse a la formulación de un producto convencional sin que esto involucre un incremento en la viscosidad del mismo por lo cual su uso permite aumentar el contenido de fibra sin que éste sea evidente (Hernández *et al.*, 2010). Entre otras aplicaciones industriales de los fructanos puede mencionarse su uso como ingredientes en mayonesas ligeras, quesos bajos en calorías, productos de pastelería, panificación y embutidos, contribuyendo a la reducción del contenido calórico y a la retención de agua de estos productos; su adición a las formulaciones de helado para evitar la formación de cristales de hielo, su empleo como emulgentes en la fabricación de margarinas, entre otros (Olesten *et al.*, 2000).

### **1.6.2 Fructanos de agave**

Una fuente natural rica en fructanos son las plantas de agave, abundantes en las regiones áridas de Latinoamérica. La producción de jarabe de agave se lleva a cabo por medio de hidrólisis de fructanos. El *Agave tequilana* Weber variedad azul es el más utilizado para la producción de jarabe y fructanos. En esta planta se acumulan entre 13% y 17% p/p de fructanos en plantas maduras, similar a la

proporción de inulina en achicoria (Rodríguez *et al.*, 2014). Los fructanos se sintetizan y almacenan en los tallos con una mezcla compleja de neofructanos ramificados con un grado de polimerización que va desde las 3 a las 29 unidades, el agave variedad *tequilana* posee un alto contenido promedio de éstos.

Según Toriz *et al.* (2007), más del 80% en peso del contenido de carbohidratos en agave azul se origina de fructanos. Estos fructanos son erróneamente conocidos comercialmente como inulina, ya que esa denominación implica que el polisacárido es un fructano lineal. También encontraron una estructura química para los fructanos de agave mediante cromatografía de exclusión de tamaños, dispersión de luz y análisis de resonancia magnética nuclear la cual se presenta en la Figura 10.

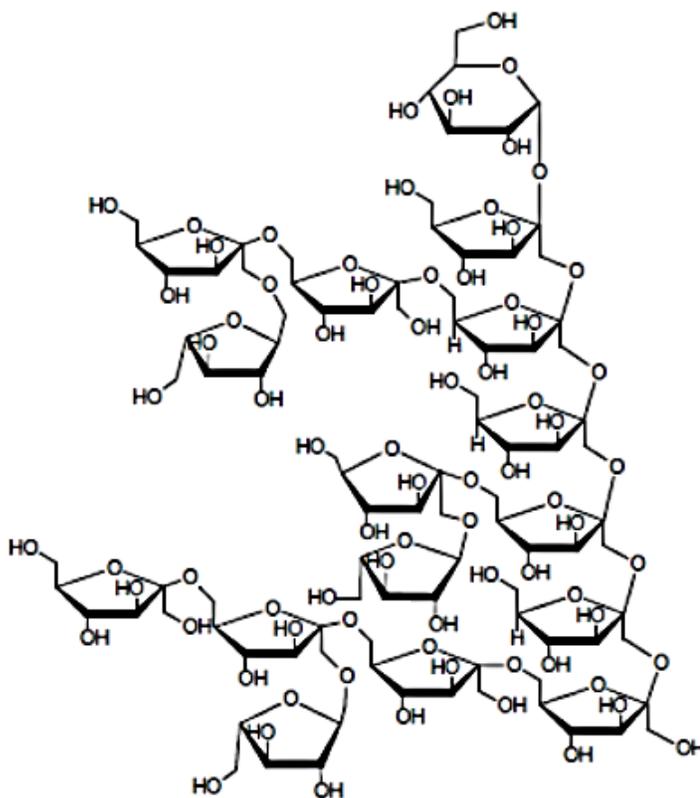


Figura 10. Estructura química propuesta para los fructanos de Agave azul (*Tequilana weber var. Azul*) (Toriz *et al.*, 2007).

Los fructanos tienen una alta solubilidad, lo cual podría indicar que sus grupos hidroxilo están disponibles para interactuar con las moléculas de agua circundantes y cabezas de grupos fosfolípidos. Esta unilateralidad en cuanto a los restos hidroxilo e hidrógeno puede ser responsable de la alta afinidad interfacial (Demel *et al.*, 1998).

### **1.6.3 Importancia de los fructanos de agave para el consumidor**

Entre los carbohidratos no digeribles (celulosa, almidón), los oligosacáridos presentan importantes características fisicoquímicas benéficas para la salud de quien los consume, por esta razón su aplicación como ingredientes funcionales ha ido en aumento (Qiang *et al.*, 2009). Los fructanos como ingredientes no digeribles pueden beneficiar al consumidor mediante la estimulación selectiva de crecimiento de bacterias benéficas en el intestino grueso; de esta forma se promueve un balance de la microflora intestinal y disminución de infecciones gastrointestinales (Roberfroid, 2007).

Según Qiang *et al.* (2009), las funciones benéficas causadas por los fructanos de agave en la dieta de los seres humanos puede resumirse de la siguiente forma: forman una especie de gel viscoso en el intestino que disminuye la absorción de glucosa, provocando baja concentración de glucosa en sangre; su aporte calórico es bajo; son no cariogénicos, mejoran el ambiente intestinal y modifican la microbiota de tal manera que predominen bacterias benéficas y no patógenas; estimulan la absorción de ciertos minerales, tales como calcio, magnesio y hierro. Es por ello que el consumo de fructanos reduce el riesgo de enfermedades gastrointestinales, cardiovasculares y podría evitar el cáncer de colon (Pérez, 2010). Además de ser benéfico para las personas que padecen diabetes debido a su capacidad de disminuir la absorción de glucosa.

#### **1.6.4 Fructanos de agave en México**

El género *Agave* se considera originario de México, donde se encuentran 272 de las 310 especies reportadas, con 135 especies endémicas (García, 2002). Varias especies son económicamente importantes, entre ellas el *Agave tequilana Weber Azul*, el cual constituye la materia prima para la producción de tequila. La parte aérea de la planta está integrada por dos fracciones principales: hojas y tallo. El tallo y las bases de las hojas que se unen a él comprenden la porción conocida con el nombre de cabeza o piña, la cual posee un alto contenido de fructanos, y una vez cosechada se utiliza para la producción de tequila y extracción de fructanos (Montañez *et al.*, 2011).

En México, el *Agave tequilana Azul* se cultiva de manera intensiva en una superficie superior a 120,000 hectáreas, y el precio del producto, regido por la oferta y la demanda, ocasiona altibajos en su producción, lo cual repercute en el abasto de esta materia prima a la industria (Consejo Regulador del Tequila, 2009).

#### **1.6.5 Aplicación de los fructanos de agave**

Los fructanos, al ser altamente solubles, poseen ventajas tecnológicas estrechamente relacionadas con las de los jarabes de azúcar y la glucosa, lo que significa que se pueden incorporar fácilmente en bebidas y productos lácteos. De hecho, los fructanos lineales tipo inulina han sido empleados como sustitutos de grasa. Esto conduce a propiedades mejoradas en el cuerpo y la sensación en la boca (Pérez, 2010).

Actualmente se ha buscado incorporar los fructanos de agave en productos lácteos, productos de bajo aporte calórico, productos de panificación, como muffins, galletas y pan de caja principalmente como fibra benéfica para la salud, lo que ha despertado interés para combinar con productos libres de gluten, como se mencionó anteriormente los fructanos ayudan a la baja absorción de glucosa, probióticos entre otros, mientras que la ausencia de gluten da pauta al consumo de pan en personas con celiaquía.

## **CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

### **2.1 OBJETIVOS**

#### **Objetivo general**

Evaluar el efecto de dos gomas, hojuelas de papa, almidón de papa y fructanos de agave sobre las propiedades reológicas de la masa y las propiedades físicas y texturales en un pan blanco de caja sin gluten a base de harina de arroz seleccionando la formulación que proporcione las características más cercanas al pan de caja con gluten.

#### **Objetivo particular 1**

Analizar la influencia de la concentración de goma xantana e hidroxipropilmetilcelulosa en las propiedades físicas, texturales y características de la miga de un pan de caja sin gluten a base de harina de arroz, seleccionando aquella que proporcione las características más cercanas al pan de caja con gluten.

#### **Objetivo particular 2**

Estudiar el efecto de la proporción de hojuelas de papa y almidón de papa en las propiedades físicas, texturales y características de la miga de un pan de caja sin gluten a base de harina de arroz con gomas, seleccionando aquella que proporcione las características más cercanas al pan de caja con gluten.

#### **Objetivo particular 3**

Seleccionar la concentración de fructanos de agave mediante su efecto en las propiedades físicas, texturales y características de la miga de un pan de caja sin

gluten a base de harina de arroz, hojuelas de papa y almidón de papa con la formulación seleccionada en el objetivo 2, encontrando la concentración de fructanos que proporcione las mejores características en el pan.

#### **Objetivo particular 4**

Determinar el comportamiento viscoelástico y la consistencia de las masas seleccionadas en cada uno de los objetivos anteriores, relacionándolas con las propiedades del pan.

Cabe aclarar que a partir del objetivo 2 se utilizó la concentración de goma xantana y de hidroxipropilmetil celulosa que proporcionaron mejores características al pan y en el objetivo 3, se mantuvo esta proporción de hidrocoloides, además de la proporción de almidón y hojuelas de papa que dio los mejores resultados en el objetivo 2.

## **2.2 MATERIA PRIMA**

En el Cuadro 7, se enlista la materia prima, con su respectiva marca, que se empleó para elaborar el pan de caja control con y sin gluten además de las gomas y almidones a utilizar.

## **2.3 ELABORACIÓN DE MUESTRAS**

Para tener referencia en el análisis de resultados se prepararon y evaluaron dos formulaciones control, una con harina de trigo (CC) que fue el control con gluten y otra con harina de arroz (CS) que fue el control sin gluten. Con base en lo reportado en la literatura se obtuvo una formulación de pan con gluten (De panadero a panadero, 2004) la cual se resume en el Cuadro 8 expresada en porcentaje global y en porcentaje con base en la harina, mientras que la formulación control de pan sin gluten a base de harina de arroz se encuentra en el Cuadro 9, el proceso de elaboración de pan control con gluten se ilustra en la

Figura 11, mientras que en la Figura 12 se presenta el proceso de pan control sin gluten.

Cuadro 7. Materia prima utilizada

<b>Materia prima</b>	<b>Marca</b>
<b>Azúcar refinada</b>	Great Value
<b>Harina de arroz</b>	Tres estrellas
<b>Harina de trigo</b>	Selecta
<b>Hojuelas de papa</b>	United States Potato Board
<b>Leche entera en polvo</b>	Alpura
<b>Levadura en polvo</b>	Tradi-pan
<b>Sal yodatada</b>	La fina
<b>Aceite de canola</b>	Capullo
<b>Agua baja en sodio</b>	Epura
<b>Clara de huevo líquida pasteurizada</b>	San Juan
<b>Limón fresco</b>	Mercado local
<b>Hidroxipropilmetilcelulosa</b>	Hercules
<b>Xantana</b>	Makymat
<b>Fécula de papa</b>	Makymat
<b>Fructanos de agave</b>	Mieles Campos Azules

Cuadro 8. Formulación de pan con gluten (De panadero a panadero, 2004)

<b>Ingredientes</b>	<b>%</b>	<b>% Base de harina</b>
<b>Harina trigo</b>	55.62	100.0
<b>Azúcar</b>	3.58	6.4
<b>Levadura</b>	1.65	3.0
<b>Sal</b>	0.88	1.6
<b>Agua</b>	33.04	59.4
<b>Aceite</b>	3.58	6.4
<b>Mejorante</b>	0.55	1.0
<b>Leche en polvo</b>	1.1	2.0
<b>Total</b>	100	179.8

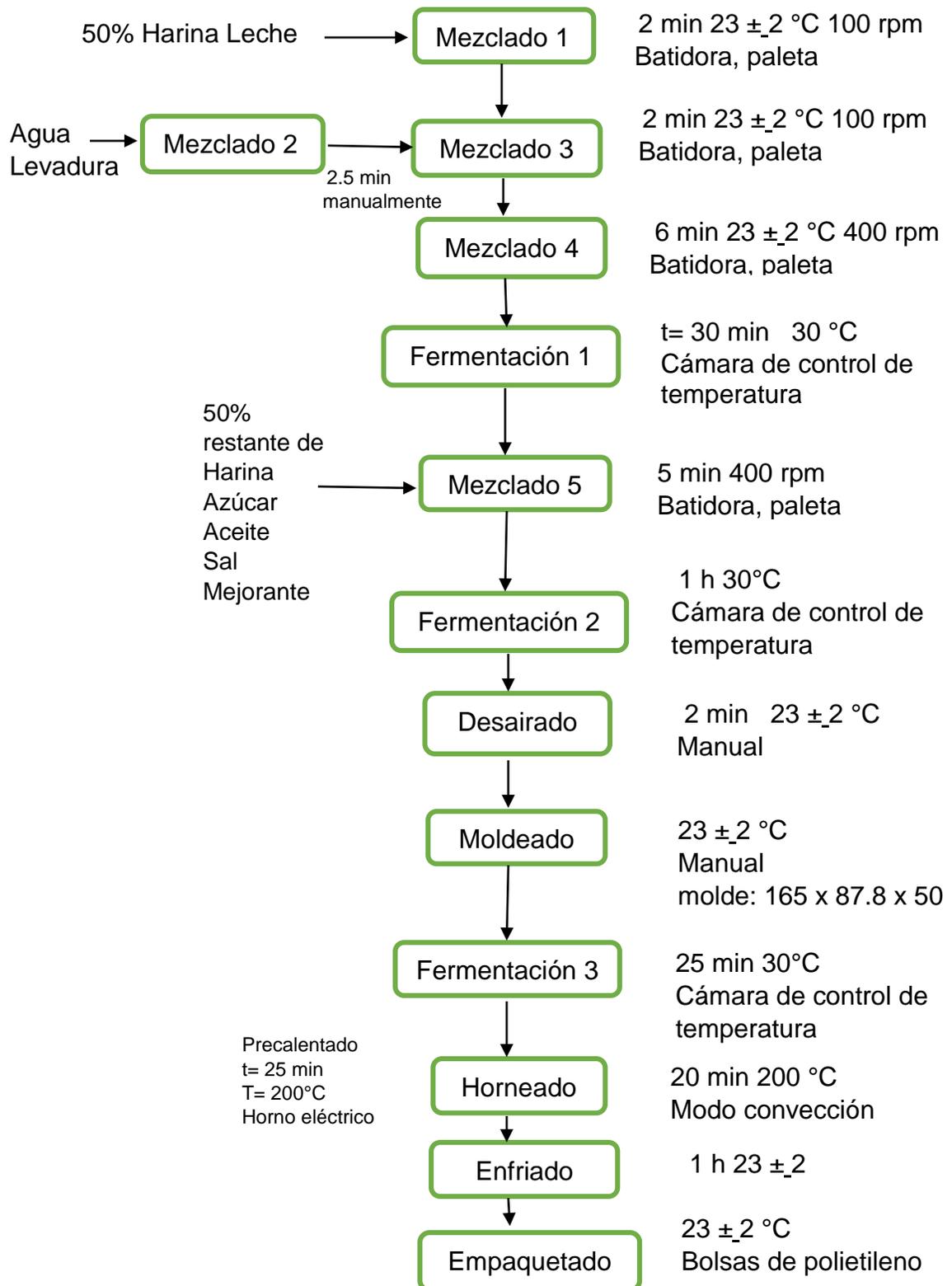


Figura 11. Diagrama de proceso para la elaboración de pan de caja con gluten

### **Descripción del diagrama de proceso para la elaboración de pan con gluten**

Mezclado 1. Se agregó el 50% de la harina de trigo y el total de la leche en polvo en un tazón, se mezclaron en la batidora KitchenAid modelo K5SSWH, con la una paleta a 100 rpm, durante 2 min.

Mezclado 2. Se realizó la mezcla líquida diluyendo el total de la levadura en el agua total, mezclando manualmente durante 2 min.

Mezclado 3. Se incorporó la mezcla 2 a la mezcla 1, procurando no dejar grumos en un tiempo de 2 min a 100 rpm.

Mezclado 4. Con el gancho para masas, se mezcló la mezcla 3 durante 5 min a 400 rpm, el objetivo del amasado es incorporar los ingredientes totalmente brindando la consistencia adecuada de la masa aportando trabajo mecánico para incorporar aire y desarrollar las propiedades viscoelástica de la masa.

Fermentación 1. La fermentación se realizó en una cámara Croft Humicab-60D a una temperatura de 30 °C durante 30 min, con el fin de evitar la pérdida de humedad se colocó un recipiente con agua junto a la masa dentro de la cámara.

Mezclado 5. Con el gancho para masa se comenzó a mezclar la masa fermentada e incorporó gradualmente el resto de los ingredientes: azúcar, sal, aceite, mejorante y el 50% restante de la harina, mezclando durante 5 min a 400 rpm.

Fermentación 2. Se realizó en la cámara de control de humedad a 30 °C por 1 hora, colocando un recipiente con agua.

Desairado. También conocido como ponchado, consistió en comprimir manualmente la masa para redistribuir el gas generado por la fermentación, haciendo posteriormente dobleces y volviendo a comprimir con ambas manos, repitiendo la operación 3 veces.

Moldeado. La masa resultante de la fermentación 2 se colocó en un molde de 165 x 87.8 x 50 mm el cual dio la característica rectangular al pan de caja.

Fermentación 3. Se realizó en la cámara de control de humedad a 30 °C por 25 min, cubriendo la superficie del recipiente.

Horneado. Se realizó en un horno eléctrico Hamilton Beach, precalentado a 200 °C por 20 min en modo convección, el pan se horneó durante 30 min a 200 °C

Enfriado. El pan fue desmoldado y puesto en rejillas para evitar la condensación de agua durante el enfriamiento a temperatura ambiente, durante 20 a 25 min.

Empaquetado. El pan se guardó en bolsas de polietileno y se selló con cinta adhesiva, finalmente se etiquetó para el almacenamiento a temperatura ambiente  $23 \pm 2$  °C

Para realizar el pan control sin gluten se tomó como base la formulación reportada en De panadero a panadero (2014), donde se sustituyó la harina de trigo por harina de arroz, mientras que para el proceso (Figura 9) se tomó como referencia el proceso de López (2014), donde se omitió la desgasificación y se redujo a una fermentación, este proceso se siguió para las formulaciones de los objetivos posteriores, por lo que es un proceso general.

Cuadro 9. Formulación de pan de caja control sin gluten

<b>Ingredientes</b>	<b>%</b>	<b>% Base de harina</b>
<b>Harina de arroz</b>	42.30	100
<b>Agua</b>	50.76	120
<b>Azúcar</b>	0.85	2
<b>Levadura</b>	1.27	3
<b>Sal</b>	0.85	2
<b>Aceite</b>	2.71	6.4
<b>Mejorante</b>	0.42	1
<b>Leche</b>	0.85	2
<b>Total</b>	100	236.4

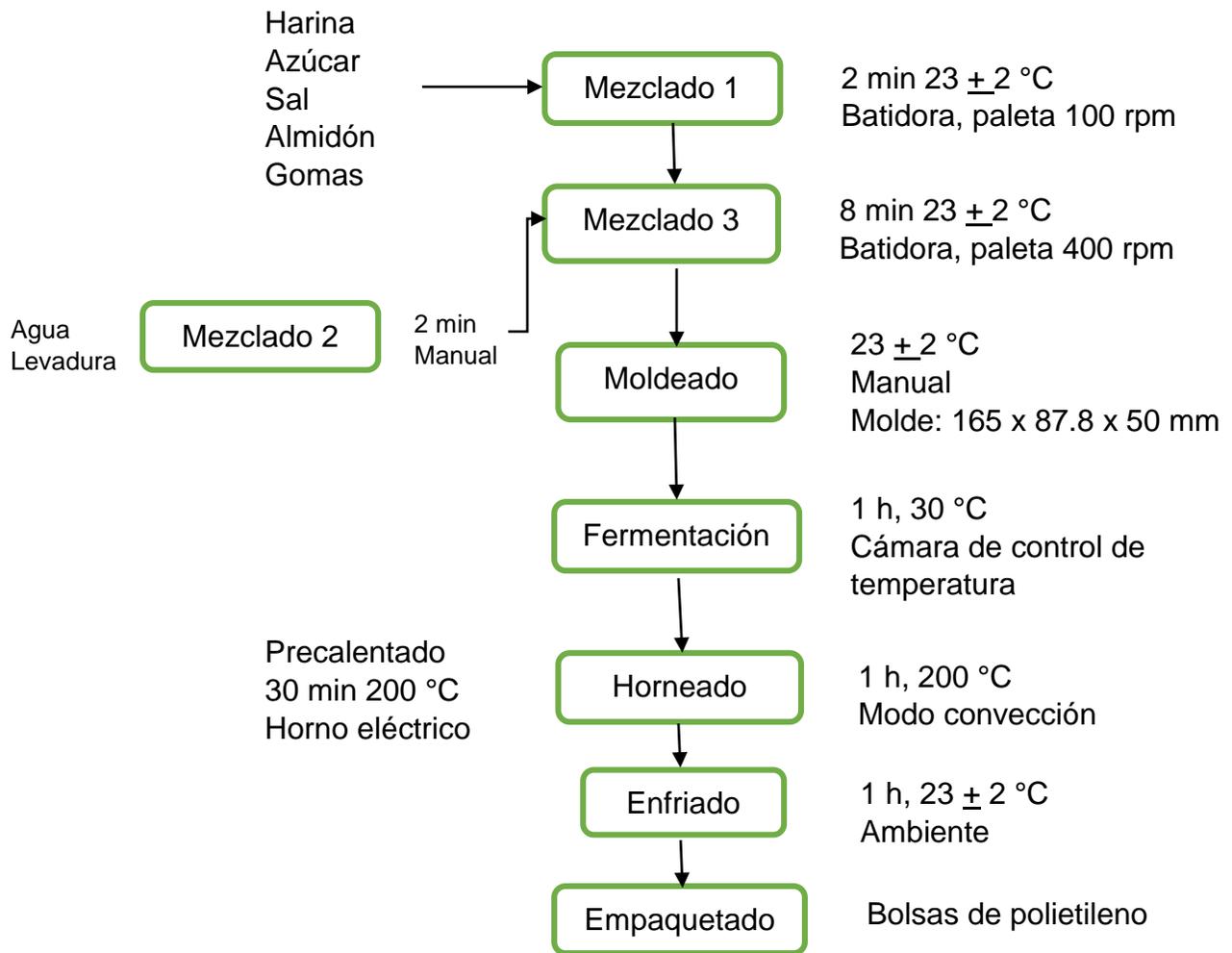


Figura 12. Diagrama de proceso para elaboración de pan de caja sin gluten.

### Descripción del diagrama de proceso para elaboración de pan sin gluten

Mezclado 1. Se agregó el total de ingredientes sólidos en un tazón y se mezclaron a 100 rpm por 2 min con la paleta en la batidora KitchenAid modelo K5SSWH.

Mezclado 2. Se realizó una mezcla líquida diluyendo el total de la levadura en el agua total manualmente durante 2.5 min.

Mezclado 3. Se incorporó la mezcla 2 a la mezcla 1, procurando no dejar grumos, en un tiempo de 8 min a 400 rpm con la paleta para batir

Fermentación. La fermentación se realizó en la cámara de control de humedad Croft Humicab-60D a una temperatura de 30 °C durante 1 hora, para evitar la pérdida excesiva de humedad se colocó un recipiente con agua, este ayudó a mantener húmeda la cámara de control; a diferencia del pan control con gluten aquí solo se realizó una fermentación debido a la baja consistencia de la masa al no tener gluten es innecesario un desairado y por lo tanto se omitió la segunda fermentación.

Moldeado. La masa resultante de la fermentación se vertió en un molde paralelepípedo de 165 x 87.8 x 50 mm, el cual dio la característica rectangular al pan de caja.

Horneado. Se realizó en un horno eléctrico Hamilton Beach, precalentado a 200 °C por 30 min en modo convección, el pan se horneó durante 1 hora a 200 °C.

Enfriado. El pan se desmoldó y puso en rejillas para evitar la condensación de agua durante el enfriamiento, 1 hora a temperatura ambiente  $23 \pm 2$  °C.

Empaquetado. El pan se guardó en bolsas de polietileno y se selló con cinta adhesiva y se etiquetó para el almacenamiento a temperatura ambiente  $23 \pm 2$  °C.

### **Formulaciones sin gluten a base de harina de arroz, almidón de papa, hojuelas de papa, gomas y fructanos de agave.**

Para estudiar el efecto de las gomas xantana (X) e hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC), proporción de harinas almidón de papa (A) y hojuelas de papa, fructanos de agave (F), se tomó como base una formulación reportada por López (2014), en la cual emplea harina de arroz, clara de huevo y papa fresca rayada, que incluye además goma xantana, guar, así como almidones de maíz y tapioca. La goma guar fue sustituida por hidroxipropilmetilcelulosa, los almidones de maíz y tapioca

por almidón de papa y la papa fresca por hojuelas de papa. Los ingredientes que se mantuvieron constantes (expresado con base en harinas HA, HP, A) fueron los siguientes: azúcar 7.89%, levadura 3.94%, sal 1.01%, aceite de canola 7.89%, clara de huevo 47.34%, jugo de limón 3.16%, agua 75.14%. En el objetivo 1 se varió la proporción de la goma xantana (X) e hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC) manteniendo constantes HA 45.13%, H 18.3% y A 36.6%; en el objetivo 2 se varió la proporción de hojuelas de papa y almidón de papa manteniendo constante el contenido de éstas (55% del total de harina) por medio de un diseño de mezclas y manteniendo constantes los demás ingredientes, con excepción del agua ya que en algunas formulaciones resultaba insuficiente por lo que se agregó agua extra para lograr una masa que se pudiera hornear; en el objetivo 3, partiendo de la formulación del objetivo 2 con las características más cercanas al pan de caja con gluten se varió la concentración de fructanos de agave (F) en 3 niveles, restando la cantidad correspondiente a la harina de arroz (HA); en el Cuadro 10 se resumen las variaciones por objetivo.

Cuadro 10. Formulaciones por objetivo

Objetivo/ Variantes	% (X)	% (HPMC)	%Almidón de papa (A)	%Hojuelas de papa (H)	%Harina de arroz (HA)	% Fructanos de agave (F)	Agua extra agregada (mL)
<b>Objetivo 1</b>	2.46	0	36.58	18.27	45	0	0
	0	2.46					
	1.23	1.23					
	0.62	1.85					
	1.85	0.62					
<b>Objetivo 2</b>	1.85	0.62	54.85	0	45	0	0
			41.15	13.73			0
			36.58	18.27			101.37
			27.42	27.42			135.29
			27.42	27.42			135.29
			18.27	36.58			143.59
			13.73	41.15			139.71
			0	54.85			206.39
			<b>Objetivo 3</b>	1.85			0.62
37.65	7.48						
35.15	9.96						

## 2.4 MÉTODOS DE EVALUACIÓN

### 2.4.1 Volumen específico por desplazamiento de semillas.

Se refiere a la medición del volumen final alcanzado por el producto después del horneado en relación con el peso del producto, la finalidad de este parámetro es conocer, junto con la prueba de altura, la capacidad de retención de vapor y gases durante los procesos de fermentación y cocción de la masa.

Esta prueba consiste en depositar la pieza de pan sin haber sido cortada ni aplastada en un recipiente cilíndrico después de haber sido pesada, posteriormente se vierten semillas de manera que cubran totalmente la pieza de pan, se marca el nivel al que llegan las semillas y se retira la pieza de pan marcando nuevamente el nivel de las semillas; una vez realizado esto, se vierte agua y se mide el volumen en cada marca, la diferencia entre ambas marcas nos da el volumen del pan y se aplica la ecuación 1.

$$ve = \frac{v}{w} \quad (1)$$

Donde:

ve= volumen específico [mL/g]

v= volumen [cm<sup>3</sup>]

w= peso [g]

### 2.4.2 Pérdida de peso por horneado

Se pesaron las masas fermentadas previas y posteriormente al horneado en una balanza analítica, se obtuvo la diferencia de pesos y se expresó en porcentaje.

### 2.4.3 Altura

Se deben cortar rebanadas de 15 mm de espesor lo más recto posible, posteriormente se mide la altura del pan en 3 de las rebanadas de la parte central con un Vernier, para un resultado se obtiene el promedio de las 3 mediciones, desviación estándar y coeficiente de variación.

#### **2.4.4 Color**

Equipo. Colorímetro Minolta CR-300

Fundamento. Una cámara de pulsos de xenón en una cámara de mezclado proporciona iluminación en la superficie de la muestra. Seis fotoceldas de silicón altamente sensibles, filtradas para igualar la respuesta del observador estándar, son usadas por el sistema de retroalimentación de doble haz para medir tanto la luz incidente como la reflejada (Storck *et al.*, 2010).

El colorímetro CR-300 se calibra con ayuda de una placa de porcelana, se debe seleccionar la fuente de iluminación C/D65, con la medición del colorímetro se obtendrá los valores correspondientes a la fuente de iluminación y estará listo para usarse. La determinación del color se realiza en la corteza y la miga del pan, se evalúa colocando la muestra bajo la fotocelda del colorímetro, la cual detecta el color de la muestra dando los valores numéricos de L, a, b. Se recurre a un diagrama tridimensional de colores para ubicar el correspondiente a la muestra.

#### **2.4.5 Análisis de imágenes**

Los sistemas de análisis de imagen están diseñados para extraer información y transformarla en valores numéricos lo que nos permite expresar la información contenida en una imagen, esta información puede ser entregada en forma de imágenes retocadas o con falsos colores se puede obtener información como el área de los objetos contenidos en la imagen, forma, diámetro, número de objetos, fracción vacía, homogeneidad, entre otros (Serrano, 1999).

#### **Método**

Se debe escanear una rebanada de pan, en este caso en impresora Hewlett-Packard modelo M1522 MFP esta debe estar configurada en origen plano, archivo

tipo TIF y una resolución de 300 ppp, posteriormente se abre dicha imagen en el programa “IMAGE PRO-PLUS 6” se segmenta estableciendo un nivel de escala de grises que permita diferenciar claramente los poros de sus alrededores. Finalmente se realiza un conteo y medición de poros. Para realizar la medición se debe pedir solo los objetos brillantes, seleccionar los parámetros que se desean medir, en este caso área, diámetro máximo y área del cada poro entre el área total medida, una vez seleccionados el programa presenta diámetro mayor, número de clases estadísticas y clasificación de poros con base en el área (Casas, 2017). Se debe aplicar las ecuaciones 2,3 y 4.

- $$\text{Fineza} = \frac{\text{Número de objetos medidos}}{\text{Área evaluada}} \quad (2)$$

- $$\text{Fracción vacía} = \frac{\text{área total de los poros}}{\text{área evaluada}} \quad (3)$$

- $$\text{Uniformidad} = \frac{\text{Número de poros menores 1mm}}{\text{Número poros mayores 1mm}} \quad (4)$$

#### 2.4.6 Textura

Equipo. Texturómetro TA-XT2 Marca Stable Microsystems

Fundamento. El equipo opera en modo de tensión o compresión y controla fuerza, distancia (deformación) y tiempo a velocidades entre 0.5 y 10 mm/s. Si se controla la fuerza aplicada al material, se mide la distancia en función del tiempo: mientras que, si se controla la distancia que el material se comprime o tensa, entonces se mide la fuerza en función del tiempo (Martínez, 2015). De esta forma, se pueden realizar una amplia variedad de pruebas dependiendo del modo de operación y dispositivo utilizado.

#### 2.4.6.1 Análisis de perfil de textura en pan

El análisis de perfil de textura (TPA) consiste en comprimir (alrededor de un 20%) dos veces consecutivas una muestra simulando dos masticaciones, y registrar una curva de la fuerza empleada en función del tiempo, las condiciones son velocidad de acercamiento, prueba y retirada de 1.7 mm/s, compresión de 6.2 mm, fuerza de contacto de 10 g; empleando 2 rebanadas centrales de pan y como aditamento un cilindro de acrílico de 1 in (AACC, 1983).

La curva típica obtenida de este ensayo aplicado a un pan se puede observar en la Figura 13, mientras que en el Cuadro 11 se resumen los parámetros que se obtendrán.

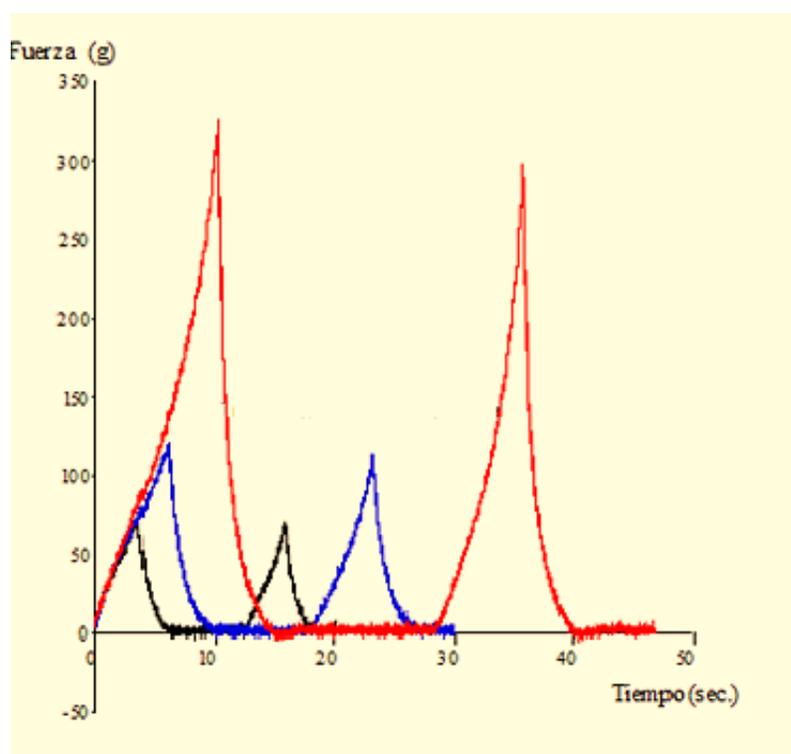


Figura 13. Curva de análisis de perfil de textura de pan comercial a diferente nivel de compresión (en rojo 6 mm; en azul 4 mm; 2 mm)

Cuadro 11. Parámetros obtenidos de TPA, adaptado de Mozo, 2015

Parámetro	Definición	Unidades
<b>Dureza</b>	Fuerza necesaria para alcanzar una deformación preseleccionada en el primer ciclo	N
<b>Elasticidad</b>	Capacidad de recuperación de la deformación después del periodo de espera entre la 1ª y 2ª compresión.	Adimensional <1
<b>Cohesividad</b>	Relación entre el área de compresión del segundo ciclo sobre el área de compresión del primer ciclo	Adimensional <1
<b>Masticosidad</b>	Dureza x cohesividad x elasticidad	N

#### 2.4.6.2 Consistencia de la masa

Esta prueba consiste en realizar una penetración y retirada, comúnmente utilizada para adhesividad, a una velocidad de acercamiento y retirada de 10 mm/s y velocidad de prueba de 2 mm/s y fuerza de contacto de 5 g, con cilindro de acrílico de 1 in, la muestra se coloca dentro de cajas Petri de diámetro interno de 48.5 mm y 15.2 mm de altura, al ras de su capacidad, la muestra es la masa preparada sin haber agregado levadura.

La curva típica que se obtiene se muestra en la Figura 14, mientras que en el Cuadro 12 se muestran los parámetros a obtener.

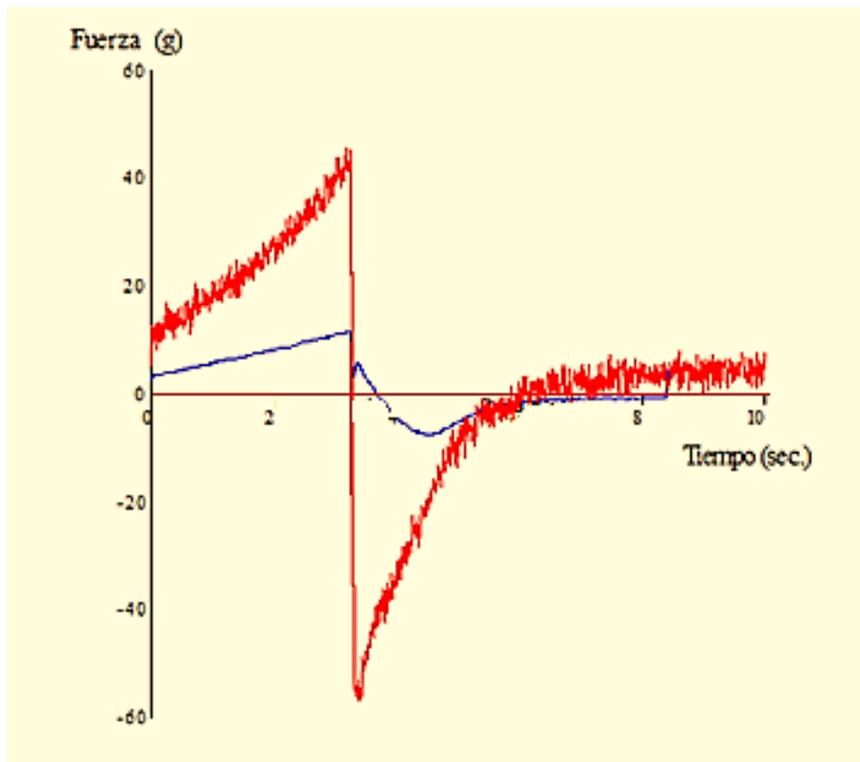


Figura 14. Curva típica de adhesividad por penetración y retirada

Cuadro 12. Parámetros que obtener de la prueba de consistencia (Casas, 2017).

Parámetro	Calculo	Unidades
<b>Firmeza</b>	Fuerza máxima durante la penetración	N
<b>Fuerza adhesiva</b>	Fuerza máxima durante la retirada	N
<b>Trabajo adhesivo</b>	Área bajo la curva de retirada antes de la fuerza máxima	N.s
<b>Trabajo cohesivo</b>	Área bajo la curva de retirada después de la fuerza máxima	N.s
<b>Adhesividad</b>	Trabajo adhesivo + trabajo cohesivo	N.s
<b>Estiramiento</b>	Distancia entre el inicio de la curva de retirada y el momento en que la fuerza cae a cero	mm
<b>Untabilidad</b>	Estiramiento/fuerza adhesividad	mm/N

### **2.4.7 Viscoelasticidad de la masa**

Para la determinación de las propiedades viscoelásticas es necesario identificar la zona de viscoelasticidad lineal por lo que se realiza un barrido de deformación de cizalla, aplicado de forma sinusoidal, considerando entre 0.01 y 5% de deformación, a una frecuencia constante (1 Hz o 6.28 rad/s). Se mide el esfuerzo de cizalla resultante (también de forma sinusoidal). El programa del reómetro proporciona directamente los valores de los módulos: elástico o de almacenamiento ( $G'$ ), viscoso o de pérdida ( $G''$ ), complejo ( $G^*$ ), así como la viscosidad compleja ( $\eta^*$ ), dinámica ( $\eta'$ ) y fuera de fase de la viscosidad compleja ( $\eta''$ ). La zona de viscoelasticidad lineal se delimita en donde los módulos elástico y viscoso, no son dependientes de la deformación aplicada (Martínez-Padilla, 2015). Para la obtención del espectro mecánico se mantiene la deformación de cizalla constante (sinusoidal), dentro de la zona de viscoelasticidad lineal, variando la frecuencia de oscilación, el instrumento mide el esfuerzo de cizalla resultante. Dependiendo del ángulo de desfase entre las curvas sinusoidales del esfuerzo de cizalla oscilatorio (medido) y la respectiva deformación de cizalla oscilatoria (aplicada), el material es viscoelástico ( $0 < \text{ángulo} < \pi/2$ ).

#### **Obtención del espectro mecánico en las masas experimentales**

Se utilizó un reómetro Anton Paar Physica, MCR 301, con una placa rugosa (PP50) de 46.976 mm de diámetro, la muestra consistió en masa sin levadura reposada por 1 hora a 30 °C, se realizó inicialmente un barrido de deformación para encontrar la zona viscoelástica lineal (0.001 a 0.2 %, 1Hz) y posteriormente un barrido de frecuencia (0.1 a 50 Hz, 0.007% deformación), 30 °C.

### **2.5 Análisis de resultados**

El análisis de resultados se manejó por etapas donde cada objetivo fue una etapa y los resultados obtenidos se analizaron por medio de la determinación de las diferencias estadísticas por análisis de la varianza (ANOVA) de un solo factor con

95% de confianza, seguido de las comparaciones entre medias con prueba de Tukey al 5% de nivel de significancia, utilizando el software Minitab.

- Etapa 1. Selección de proporción de gomas
- Etapa 2. Selección de la proporción de hojuelas de papa y almidón de papa
- Etapa 3. Selección de concentración de fructanos de agave
- Etapa 4. Estudio de la reología y consistencia de la masa

## CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 3.1 Efecto de la concentración y tipo de goma

En el objetivo 1 se varió el porcentaje de goma xantana (X) e hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC) manteniendo constante una formulación calculada en porcentaje con base a las harinas (45.13% de harina de arroz, 18.27% de hojuelas de papa y 36.58% de almidón de papa); los demás ingredientes de la formulación fueron: azúcar 7.89%, levadura 3.94%, sal 1.01%, aceite de canola 7.89%, clara de huevo 47.34%, jugo de limón 3.16% y agua 75.14%,

#### 3.1.1 Apariencia de la hogaza

En la Figura 15 se muestran fotografías de los productos obtenidos, iniciando con el pan control con gluten (CC), cuya hogaza mostró características uniformes y agradables siendo el color característico rojizo, la parte superior de la hogaza más uniforme en comparación con el resto, además de una altura mayor al resto de las formulaciones; la formulación con 1.85% de X y 0.62% de HPMC siguió en apariencia agradable al CC. La formulación con 2.26% de HPMC, aun cuando durante la fermentación mostró un notable incremento de volumen, en el horneado se sumió del centro, presentando una depresión de la altura en el centro de la hogaza.

#### 3.1.2 Volumen específico, altura y pérdida de peso

En el Cuadro 13 se presentan resultados de volumen específico, altura y pérdida de peso al variar la concentración y tipo de goma. En el caso de pan de caja con gluten se han reportado valores de volumen específico de 2.5-4.76 mL/g según Lassoued *et al.* (2017), mientras que para pan sin gluten valores entre 1.3- 2.19 mL/g (Rezenti *et al.*, 2007; Hager *et al.*, 2012; Demirkesen *et al.*, 2008), los valores que se obtuvieron en este trabajo se encuentran dentro de los reportados,



Control con gluten (CC)



Control sin gluten (CS)



2.46% xantana



2.46% hidroxipropilmetilcelulosa



1.23% xantana 1.23% hidroxipropilmetilcelulosa



0.62% xantana 1.85% hidroxipropilmetilcelulosa



1.85% xantana 0.62% hidroxipropilmetilcelulosa

Figura 15. Efecto de la concentración y tipo de goma en la apariencia del pan con 36.58% almidón de papa y 18.27% hojuelas de papa.

sin embargo, no se acercaron lo suficiente al CC pero superan los valores del CS; las formulaciones con gomas son estadísticamente iguales entre sí, mientras que en la pérdida de peso se notó una disminución de este valor en todas las formulaciones con goma debido a que las gomas tienden a retener agua por lo que se dio una baja pérdida de peso e incluso los panes podían percibirse húmedos.

Cuadro 13. Efecto de la concentración de goma en el volumen específico, altura y pérdida de peso en pan con 36.58% almidón de papa y 18.27% hojuelas de papa

Muestra		Ve (mL/ g)	Altura (mm)	Pérdida de peso (%)
Control con gluten		4.68±0.57 <sup>a</sup> (12%)	76.39±0.75 <sup>a</sup> (1%)	25.92
Control sin gluten		1.46	27.7±2.13 (8%)	12.9
Concentración de xantana (%)	Concentración de HPMC (%)			
2.46	0	1.99 ± 0.05 <sup>b</sup> (2%)	46.57 ± 0.36 <sup>b</sup> (1%)	23.2
0	2.46	2.75 ± 0.28 <sup>b</sup> (10%)	34.21 ± 3.33 <sup>d</sup> (10%)	18.65
1.23	1.23	2.43 ± 0.16 <sup>b</sup> (6%)	43.00 ± 1.15 <sup>b c</sup> (3%)	19.2
0.62	1.85	1.84 ± 0.30 <sup>b</sup> (16%)	41.01 ± 0.68 <sup>bc</sup> (2%)	17.96
1.85	0.62	2.14 ± 0.02 <sup>b</sup> (1%)	37.51 ± 0.06 <sup>cd</sup> (0.001%)	17.3

Los valores que comparten la misma letra son estadísticamente iguales con  $\alpha = 0.05$  Entre paréntesis, coeficiente de variación

Según lo obtenido en las mediciones de altura, la formulación con 1.85% de X y 0.63% de HPMC presentó un coeficiente de variación de 0.001% lo cual indica una forma de la hogaza más uniforme lo cual se atribuye a la goma xantana.

### 3.1.3 Color de la corteza y la miga

En el Cuadro 14 se presentan los resultados obtenidos del color de la corteza y en el Cuadro 15 del color de la miga, el color de la corteza del pan se mostró más oscura debido a las reacciones de Maillard, con valores de L más bajos, en comparación con la miga; los valores positivos de a y b y el predominio de b/a lo ubican como amarillo rojizo. En la miga, L fue más alto, los valores de b fueron muy bajos y el parámetro a, presentó valores negativos; lo anterior es indicativo de color blanco con ligeros tonos de amarillo verdoso. Los valores obtenidos concuerdan con los valores reportados por Storck *et al.* (2010).

Cuadro 14. Efecto de la concentración de goma sobre el color de la corteza

Muestra		L	a	b
Control con gluten		49.17±1.57 <sup>b</sup> (3%)	12.27±0.20 <sup>a b c</sup> (2%)	25.3±1.28 <sup>b</sup> (5%)
Control sin gluten		63.04±4.13 (7%)	0.6±0.23 (39%)	19.93±1.13 (6%)
Concentración de xantana (%)	Concentración de HPMC (%)			
2.46	0	50.2±2.9 <sup>b</sup> (6%)	13.4±0.4 <sup>a</sup> (3%)	25.7±0.30 <sup>a</sup> (1%)
0	2.46	52.4±3.7 <sup>a b</sup> (7%)	12.83±1.4 <sup>a b</sup> (11%)	29.3±1.3 <sup>a</sup> (4%)
1.23	1.23	55.5±3 <sup>a b</sup> (5%)	10.4±0.4 <sup>a b c</sup> (4%)	28.7±1.6 <sup>b</sup> (6%)
0.62	1.85	59.2±1.7 <sup>a b</sup> (3%)	10±1.3 <sup>a b</sup> (13%)	30.9±0.3 <sup>a</sup> (1%)
1.85	0.62	54.4±3.5 <sup>a</sup> (6%)	12.8±1.2 <sup>c</sup> (10%)	30±0.9 <sup>a</sup> (3%)

Los valores que comparten la misma letra son estadísticamente iguales con  $\alpha= 0.05$   
Entre paréntesis, coeficiente de variación

Cuadro 15. Efecto de la concentración de gomas sobre el color de la miga

Muestra		L	a	b
Control con gluten		68.53±3.54 <sup>a</sup> b (5%)	-2.59±0.26 <sup>b</sup> (10%)	13.08±0.47 <sup>a</sup> (4%)
Control sin gluten		67.98±3.05 (4%)	-1.41±0.16 (12%)	10.27±0.04 (0%)
Concentración de xantana (%)	Concentración de HPMC (%)			
2.46	0	71±2.3 <sup>a b</sup> (3%)	-2.1±0.3 <sup>a</sup> (16%)	8.9±0.7 <sup>c</sup> (8%)
0	2.46	66±2.7 <sup>b</sup> (4%)	- 2±0.20 <sup>a</sup> (10%)	8.5±0.2 <sup>c</sup> (2%)
1.23	1.23	70±1.3 <sup>a b</sup> (2%)	-2.2±0.04 <sup>a b</sup> (2%)	8.3±0.2 <sup>c</sup> (2%)
0.62	1.85	71.9±1.7 <sup>a</sup> (2%)	-2.5±0.02 <sup>a b</sup> (1%)	10.7±0.52 <sup>b</sup> (5%)
1.85	0.62	73.2±0.95 <sup>a b</sup> (1%)	-2.2±0.08 <sup>a b</sup> (4%)	10.5±0.05 <sup>b</sup> (1%)

Los valores que comparten la misma letra son estadísticamente iguales con  $\alpha=0.05$   
Entre paréntesis, coeficiente de variación

### 3.1.4 Textura

Al sustituir la harina de trigo por harina de arroz, una de las principales características afectadas fue la textura del pan; en la Figura 16 se muestran las curvas de perfil de textura de las formulaciones control con gluten y con gomas, donde puede observarse que el pan control con gluten (CC) presentó la curva más baja, seguida de la que contiene solamente HPMC y muy por arriba de éstas las demás formulaciones con gomas. No se muestra la formulación sin gluten y sin gomas debido a que es tan alta que por cuestiones de escala no permitiría apreciar las demás.

En el Cuadro 16, se presentan los parámetros texturales obtenidos de la prueba de perfil de textura. El pan control sin gluten (CS) presentó una dureza elevada (56.73 N) debido a que no se adicionó ninguna goma que mejorara el producto final, esta dureza supera por mucho la dureza del CC (2 N); la formulación con 2.46% de HPMC se obtuvo un producto con menor dureza e incluso cercana al

CC, sin embargo, la hogaza del mismo se sumió del centro durante el horneado; la formulación con 2.46% de X presentó mayor dureza después del CS debido a su alta retención de agua y su baja altura, resultado de la falta de viscoelasticidad en la masa previa al horneado; la cohesividad varió entre 0.54 y 0.7, valores relativamente altos, sin embargo, no hubo diferencia significativa entre formulaciones ya que las gomas brindan mayor cohesividad y se utilizaron en cantidades adecuadas para este fin; la elasticidad fue alta tanto para las formulaciones con gomas como la control sin gluten, las cuales resultaron estadísticamente iguales; cabe destacar que la formulación sin gluten y sin gomas presentó la elasticidad más baja ya que al no haber un agente que retuviera agua esta se perdió durante el horneado dando un pan seco, duro y por ende quebradizo.

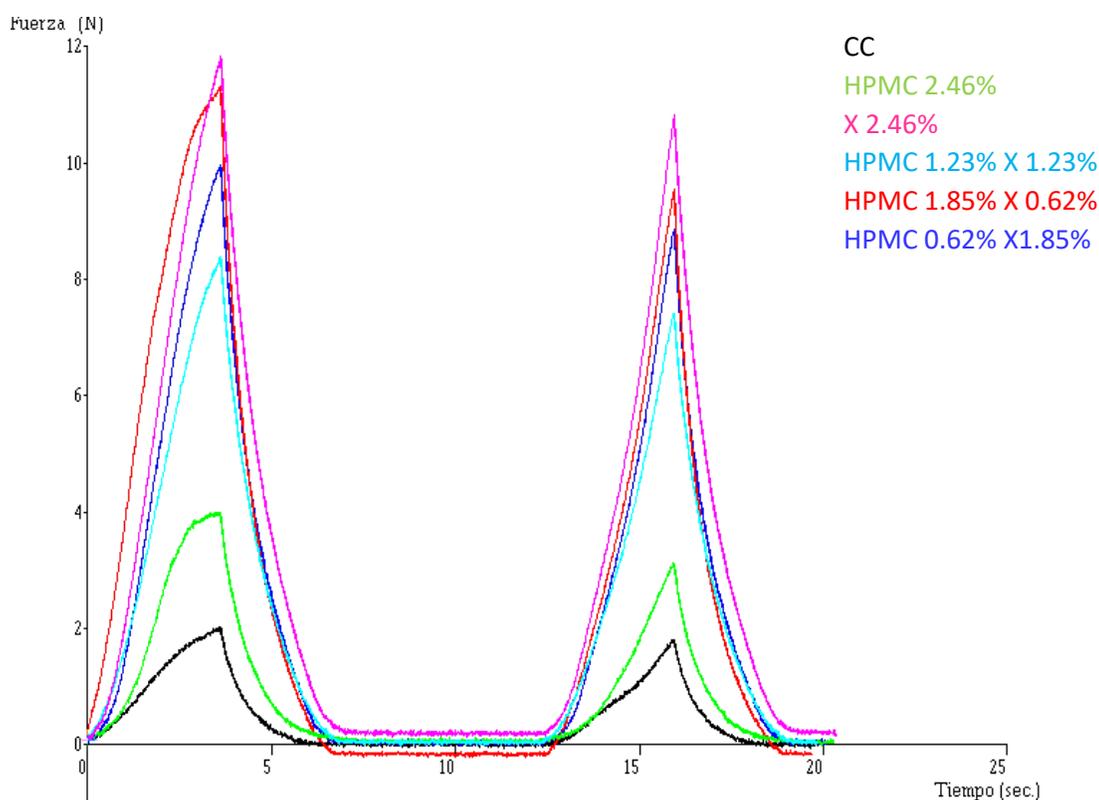


Figura 16. Efecto de la concentración y tipo de goma sobre la dureza, elasticidad, cohesividad y masticosidad del pan.

Los valores de masticosidad mostraron que el CS obtuvo el valor más alto seguido de la formulación con 2.46% de X ya que la xantana brinda estabilidad a la estructura de la miga y a altas concentraciones endureció más el producto y esto afecta los parámetros de cohesividad y masticosidad aumentando este último, los valores más bajos resultaron del CC y la formulación con 2.46% de HPMC, en este caso pasa lo contrario, la HPMC brinda menor estabilidad a la estructura de la miga y aunque la cohesividad fue la esperada al ser más suave resulto con menor masticosidad.

Cuadro 16. Parámetros del análisis de perfil de textura. Efecto de la concentración de goma sobre la textura del pan

Muestra		Dureza (N)	Cohesividad	Elasticidad	Masticosidad (N)
Control con gluten		2±0.11 <sup>d</sup> (6%)	0.65±0.04 <sup>a</sup> (6%)	0.86±0.04 <sup>a</sup> (5%)	1.11±0.08 <sup>c</sup> (7%)
Control sin gluten		56.73 ±5.44 (10 %)	0.54 ± 0.04 (8 %)	0.73 ± 0.06 (8 %)	22.70 ± 4.15 (18 %)
Concentración de xantana (%)	Concentración de HPMC (%)				
2.46	0	11.57 ±1.12 <sup>a</sup> (10 %)	0.71± 0.07 <sup>a</sup> (10 %)	0.95 ± 0.05 <sup>a</sup> (6 %)	7.8 ± 0.76 <sup>a</sup> (12 %)
0	2.46	3.1 ± 0.76 <sup>d</sup> (24 %)	0.56 ± 0.05 <sup>a</sup> (10 %)	0.86 ± 0.1 <sup>a</sup> (12 %)	1.53 ± 0.54 <sup>c</sup> (35 %)
1.23	1.23	8 ± 0.39 <sup>c</sup> (5 %)	0.70 ± 0.01 <sup>a</sup> (2 %)	0.9 ± 0.02 <sup>a</sup> (2 %)	5.3 ± 0.40 <sup>b</sup> (8 %)
0.62	1.85	11.2 ± 0.21 <sup>a</sup> (2%)	0.57± 0.04 <sup>a</sup> (8%)	0.9 ± 0.06 <sup>a</sup> (7 %)	5.75± 0.56 <sup>b</sup> (10%)
1.85	0.62	9.7± 0.33 <sup>b</sup> (3 %)	0.68±0.05 <sup>a</sup> (8%)	0.9 ± 0.03 <sup>a</sup> (3 %)	5.88±0.63 <sup>b</sup> (11%)

Los valores que comparten la misma letra son estadísticamente iguales con  $\alpha= 0.05$   
Entre paréntesis, coeficiente de variación

### 3.1.5 Estructura de la miga

En la Figura 17, se muestran imágenes de las rebanadas de pan una vez que se analizó la estructura de la miga. Los poros contados y medidos en el área de estudio aparecen coloreados. Cada color se refiere a una clase de poros con base

en el área de los mismos. Los poros más pequeños son de color rojo y los más grandes de color verde. Los que aparecen en blanco son aquellos que estaban conectados entre sí y parte de ellos quedaba fuera del área de estudio, por lo que no fueron tomados en cuenta por el software.

Puede notarse que el control con gluten tiene más poros y éstos son en general más pequeños, mientras que las formulaciones sin gluten y con gomas presentaron menos poros y éstos fueron de mayor tamaño, particularmente la formulación que solamente contenía HPMC, notándose una depresión en el centro de la rebanada ya que como se mencionó anteriormente no aporta estabilidad a la estructura de la miga del pan, esto se presentó principalmente a la temperatura de horneado.

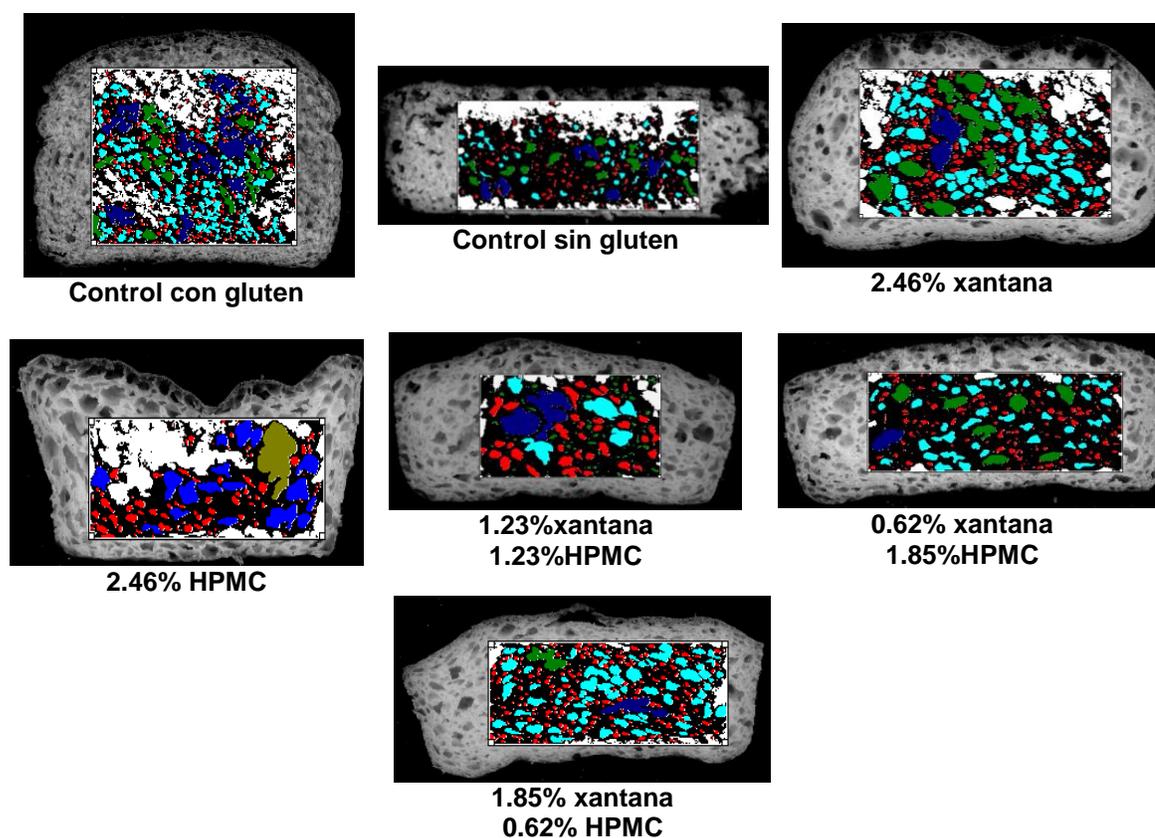


Figura 17. Efecto de la concentración y tipo de gomas en la estructura de la miga

Se observó una estructura de miga más cercana a CC cuando se empleó 1.85% de X y 0.62% HPMC, debido al tamaño y aparentemente más cantidad de poros en comparación con el resto de formulaciones esto se debe a que la combinación de HPMC, la cual permitió la expansión de la masa durante la fermentación y la goma xantana que brindo estabilidad permitiendo así una expansión moderada y evitando la depresión de esta durante el horneado.

En el Cuadro 17 se presentan los parámetros calculados a partir del conteo y medición de los poros, donde puede notarse que el número de poros /cm<sup>2</sup> es más pequeño en la formulación con solamente HPMC y más alto y cercano al control con gluten para la formulación que contiene 1.85% de X y 0.62 % de HPMC. En el caso de la fracción vacía, que representa la cantidad de gas contenida en los poros, no existió diferencia significativa, pero es importante aclarar que, en algunos panes, esta fracción vacía está dada por pocos poros muy grandes, mientras que, en otras por muchos poros pequeños, como puede observarse en la Figura 17. Con respecto a la uniformidad (número de poros menor de 1 mm/número de poros mayor de 1 mm), puede notarse que el control con gluten tiene 1.7 veces más poros menores de 1 mm y es estadísticamente diferente a las formulaciones sin gluten y con gomas, las cuales son estadísticamente iguales entre ellas. Puede notarse además que en dos formulaciones el valor fue menor de 1, indicando el predominio de poros grandes sobre los pequeños.

Con base en los resultados mostrados se seleccionó una formulación, aquella con características más cercanas al CC para tomarla como base en el siguiente objetivo; la hidroxipropilmetilcelulosa permitió que la masa se expandiera durante la fermentación, sin embargo, la aplicación de altas concentraciones de HPMC conllevan a una disminución de volumen debido a que las propiedades de la masa son muy sensibles a la temperatura y no permitían retener el gas durante el horneado, por lo que empleando solamente HPMC se obtuvo un producto deforme de baja altura, suave y de poros muy grandes.

Cuadro 17. Efecto de la concentración de gomas en la estructura de la miga

Muestra		Fineza (Poros/ cm <sup>2</sup> )	Frac. Vacía	Uniformidad
Control con gluten		12.62±0.10 <sup>b</sup> (1%)	0.2± 0.03 <sup>a</sup> (13%)	1.76±0.08 <sup>a</sup> (4%)
Control sin gluten		10.22±2.09 (20%)	0.13±0.01 (9%)	1.13±0.26 (23%)
Concentración xantana (%)	Concentración HPMC (%)			
2.46	0	13.23± 0.47 <sup>b</sup> (4%)	0.26±2.08 <sup>a</sup> (8%)	1.13 ±0.26 <sup>b</sup> (23%)
0	2.46	4.19±0.81 <sup>e</sup> (19%)	0.24± 8.74 <sup>a</sup> (36%)	1.02±0.31 <sup>b</sup> (30%)
1.23	1.23	7.88±0.37 <sup>d</sup> (5%)	0.22± 5.51 <sup>a</sup> (0.24)	0.94±0.13 <sup>b</sup> (13%)
0.62	1.85	10.65±0.70 <sup>c</sup> (7%)	0.22±2.89 <sup>a</sup> (13%)	0.94±0.04 <sup>b</sup> (4%)
1.85	0.62	15.50±0.54 <sup>a</sup> (3%)	0.25 <sup>a</sup> (0%)	1.07± 0.07 <sup>b</sup> (7%)

Los valores que comparten la misma letra son estadísticamente iguales con  $\alpha= 0.05$   
Entre paréntesis, coeficiente de variación

La formulación que contenía 1.85% de X y 0.62% de HPMC fue la que se acercó más a CC, ya que fue un producto uniforme con buena altura, con poca dureza, cohesivo y elástico como el resto de las formulaciones y con una estructura de la miga más uniforme, dicha formulación se seleccionó para el siguiente objetivo.

### 3.2 Efecto de la proporción de almidón nativo de papa y hojuelas de papa

Se tomó como base el uso de 1.85% de xantana y 0.62% HPMC y por medio de un diseño de mezclas en el programa Minitab se obtuvieron 8 formulaciones donde se varió la proporción de almidón de papa (A) y hojuelas de papa (H).

### **3.2.1 Apariencia de la hogaza**

En la Figura 18 se muestran las fotografías de los productos obtenidos al variar la proporción de almidón de papa y hojuelas de papa. Como primera impresión se tiene que la formulación con 54.85% de A y 0% de H se acercó más a la apariencia del CC, ya que presentó mayor altura en comparación al resto de las formulaciones, 41.15% de A y 13.73% de H; A 13.73% de A y 41.15% de H, fueron, aparentemente, las más alejadas al CC. Los panes con mayor contenido de hojuelas de papa estaban muy húmedos.

### **3.2.2 Volumen específico, altura y pérdida de peso**

En el Cuadro 18 se presentan los resultados de volumen específico, altura y pérdida de peso. El CC mostró el mayor volumen específico y altura, siendo estadísticamente diferente a los demás en ambas características. Conforme se agregó mayor cantidad de hojuelas de papa se notó una disminución del volumen específico y la altura, debido a que las hojuelas de papa retuvieron mucha agua y no permitían el crecimiento de la masa durante la fermentación, las formulaciones con 54.85% de A y 0% de H; 41.15% de A y 13.73% de H; 36.58% de A y 18.27% de H son estadísticamente iguales en volumen específico, estas formulaciones fueron las que contenían menor cantidad de hojuelas de papa, dicha retención de agua se presentó debido a la pre gelatinización del almidón en las hojuelas, el resto de las formulaciones son iguales entre sí ya que a mayor cantidad de hojuelas de papa se obtuvieron panes más pesados y compactos, la formulación con 54.85% de A y 0% de H tuvo más altura comparada con el resto, en altura no se mostró una tendencia clara ya que al adicionar diferentes cantidades de agua el crecimiento durante el horneado y la pérdida de peso variaron, se puede ver que en las formulaciones con 27.42% de A y 27.42% de H a pesar de una altura elevada no mostraron un volumen específico mayor, como se mencionó anteriormente las hojuelas de papa no permitieron el crecimiento de la masa durante la fermentación y durante el horneado la pérdida de peso debido a la pre gelatinización. Los valores reportados para pan con gluten son 2.5-4.76 mL/g

según Lassoued *et al.* (2017), mientras que para pan sin gluten se tienen valores entre 1.3- 2.19 mL/g (Rezentti *et al.*, 2007; Hager *et al.*, 2012; Demirkesen *et al.*, 2008); los valores encontrados en el presente estudio se encuentran dentro de lo reportado y en el caso de la formulación con 54.85% de A y 0% de H ya alcanzó los valores reportados para un pan con gluten.

Cuadro 18. Efecto de la proporción de almidón de papa y hojuelas de papa sobre el volumen específico, altura y pérdida de peso

Muestra		Ve (mL/ g)	Altura (mm)	Pérdida de peso (%)
<b>Control con gluten</b>		4.68±0.57 <sup>a</sup> (12%)	76.39±0.75 <sup>a</sup> (1%)	25.92
<b>Control sin gluten</b>		1.46	27.7±2.13 (8%)	23.2
Proporción de almidón de papa (%)	Proporción de hojuelas de papa (%)			
<b>54.85</b>	<b>0</b>	2.85 ± 0.06 <sup>b</sup> (2%)	55.56 ± 0.58 <sup>b</sup> (1%)	24.84
<b>41.15</b>	<b>13.73</b>	2.13 ± 0.01 <sup>b c</sup> (0.3%)	38.97 ± 0.96 <sup>c</sup> (2%)	23.13
<b>36.58</b>	<b>18.27</b>	2.14 ± 0.02 <sup>b</sup> (1%)	37.51 ± 0.06 <sup>b c</sup> (0.001%)	17.3
<b>27.42</b>	<b>27.42</b>	1.4 ± 0.23 <sup>c</sup> (16%)	43± 1.15 <sup>c</sup> (3%)	21.43
<b>27.42</b>	<b>27.42</b>	1.32 ± 0.36 <sup>c</sup> (27%)	42± 1.58 <sup>c</sup> (4%)	24.38
<b>18.27</b>	<b>36.58</b>	1.57 ± 0.08 <sup>c</sup> (5%)	33.93 ± 0.45 <sup>d</sup> (1%)	22.76
<b>13.73</b>	<b>41.15</b>	1.46 ± 0.3 <sup>c</sup> (20%)	30.62 ± 1.94 <sup>d</sup> (6%)	22.68
<b>0</b>	<b>54.85</b>	1.55 ± 0.02 <sup>c</sup> (1%)	38.63 ± 1.03 <sup>c</sup> (3%)	23.35

Los valores que comparten la misma letra son estadísticamente iguales con  $\alpha = 0.05$   
Entre paréntesis, coeficiente de variación



Control con gluten



Control sin gluten (CS)



54.85% almidón de papa, 0% hojuelas de papa



41.15% almidón de papa, 13.73% hojuelas de papa



36.58% almidón de papa, 18.27% hojuelas de papa



27.42% almidón de papa, 27.42% hojuelas de papa



27.42% almidón de papa, 27.42% hojuelas de papa



18.27% almidón de papa, 36.58% hojuelas de papa



13.73% almidón de papa, 41.15% hojuelas de papa



0% almidón de papa, 54.85% hojuelas de papa

Figura 18. Efecto de la proporción de almidón de papa y hojuelas de papa en la apariencia externa del pan con 1.85% de xantana y 0.62% HPMC

### 3.2.3 Color de la corteza y la miga

En los Cuadros 19 y 20 se muestran resultados de color de la corteza y la miga respectivamente, se encuentra nuevamente que las variaciones de los colores se encuentran en la corteza amarillo rojizo con valores de L más bajos a y b positivos y en la miga blanco con tonos ligeros de amarillo con valores de a negativos y valores de b más bajos estadísticamente no hubo gran variación entre los parámetros por lo que el color no se vio afectado por la formulación.

Cuadro 19. Efecto de la proporción de almidón de papa y hojuelas de papa sobre el color de la corteza

Concentración		L	a	b
Control con gluten		49.17±1.57 <sup>b</sup> (3%)	12.27±0.20 <sup>a b</sup> (2%)	25.3±1.28 <sup>b</sup> (5%)
Control sin gluten		63.04±4.13 (7%)	0.6±0.23 (39%)	19.93±1.13 (6%)
Proporción de almidón de papa (%)	Proporción de hojuelas de papa (%)			
54.85	0	60.81±4.11 <sup>a</sup> (7%)	8.86±2.06 <sup>c</sup> (23%)	27.16±0.82 <sup>a b</sup> (3%)
41.15	13.73	54.43±3.49 <sup>a b</sup> (6%)	12.77±1.22 <sup>a b</sup> (10%)	30.05±0.86 <sup>a</sup> (3%)
36.58	18.27	55.48±3.28 <sup>a b</sup> (6%)	13±1.29 <sup>a b</sup> (10%)	30.05±2.40 <sup>a</sup> (8%)
27.42	27.42	56.58±2.24 <sup>a b</sup> (4%)	12.84±0.36 <sup>b c</sup> (3%)	28.39±1.25 <sup>a b</sup> (4%)
27.42	27.42	56.99±4.75 <sup>b</sup> (8%)	11.85±1.72 <sup>ab</sup> (15%)	29.36±0.80 <sup>a b</sup> (3%)
18.27	36.58	52.94±2.12 <sup>a b</sup> (4%)	14.69±0.55 <sup>a b</sup> (4%)	31.5±1.31 <sup>a</sup> (4%)
13.73	41.15	52.97±3.32 <sup>a b</sup> (6%)	15.37±0.84 <sup>a</sup> (5%)	30.77±1.29 <sup>a</sup> (4%)
0	54.85	48.99±4.89 <sup>a b</sup> (10%)	14.11±0.67 <sup>a b</sup> (5%)	27.46±2.30 <sup>a b</sup> (8%)

Los valores que comparten la misma letra son estadísticamente iguales con  $\alpha = 0.05$   
Entre paréntesis, coeficiente de variación

Cuadro 20. Efecto de la proporción de almidón de papa y hojuelas de papa sobre el color de la miga

Muestra		L	a	b
Control con gluten		68.53±3.54 <sup>c</sup> (5%)	-2.59±0.26 <sup>c</sup> (10%)	13.08±0.47 <sup>a</sup> (4%)
Control sin gluten		67.98±3.05 (4%)	-1.41±0.16 (12%)	10.27±0.04 (0%)
Proporción de almidón de papa (%)	Proporción de hojuelas de papa (%)			
54.85	0	73.98±1.06 <sup>a b</sup> (1%)	-2.32±0.11 <sup>b c</sup> (5%)	9.2±0.31 <sup>e</sup> (3%)
41.15	13.73	73.16±0.95 <sup>a b</sup> (1%)	-2.24±0.08 <sup>b c</sup> (4%)	10.48±0.05 <sup>abcd</sup> (1%)
36.58	18.27	76.8±0.40 <sup>a b c</sup> (1%)	-2.16±0.13 <sup>b c</sup> (6%)	11.05±0.27 <sup>cde</sup> (2%)
27.42	27.42	76.23±0.43 <sup>b c</sup> (1%)	-1.55±0.09 <sup>a b</sup> (6%)	11.91±0.54 <sup>cde</sup> (5%)
27.42	27.42	71.51±3 <sup>a b</sup> (4%)	-2.04±0.29 <sup>c</sup> (14%)	10.2±0.66 <sup>de</sup> (6%)
18.27	36.58	75.84±0.41 <sup>a</sup> (1%)	-2.40±0.21 <sup>b c</sup> (9%)	11.3±1.53 <sup>bde</sup> (14%)
13.73	41.15	77.55±0.63 <sup>a</sup> (1%)	-2.03±0.14 <sup>a b</sup> (7%)	12.71±0.49 <sup>a b</sup> (4%)
0	54.85	74.78±0.87 <sup>a b</sup> (1%)	-2.56±0.11 <sup>a</sup> (4%)	9.96±0.38 <sup>a b c</sup> (4%)

Los valores que comparten la misma letra son estadísticamente iguales con  $\alpha = 0.05$  Entre paréntesis, coeficiente de variación

### 3.2.4 Textura de la miga

En la Figura 19 se muestran las curvas obtenidas en la prueba de perfil de textura, donde se ve claramente que con 54.8% de almidón de papa y sin hojuelas de papa se obtuvo la curva más similar y por ende los parámetros más cercanos al CC, esto indica que el almidón contribuyó a la altura y textura del pan.

En el Cuadro 21 se presentan los valores obtenidos del análisis de perfil de textura donde se observa que en dureza todas las formulaciones son estadísticamente diferentes al control con gluten ya que como se mencionó anteriormente la debido principalmente a las hojuelas de papa que absorbieron bastante agua y al llevar a

cabo la pre gelatinización del almidón se notó gelatinoso, por este motivo la más cercana al CC fue la que no contenía hojuelas de papa, mientras que la que contenía 13.73% de hojuelas de papa fue demasiado dura; en elasticidad todas las formulaciones presentaron un alto valor estadísticamente iguales entre ausencia de gluten da como resultado un pan duro, seco y quebradizo, sin embargo, en estos panes se observó que resultaron más húmedos y compactos.

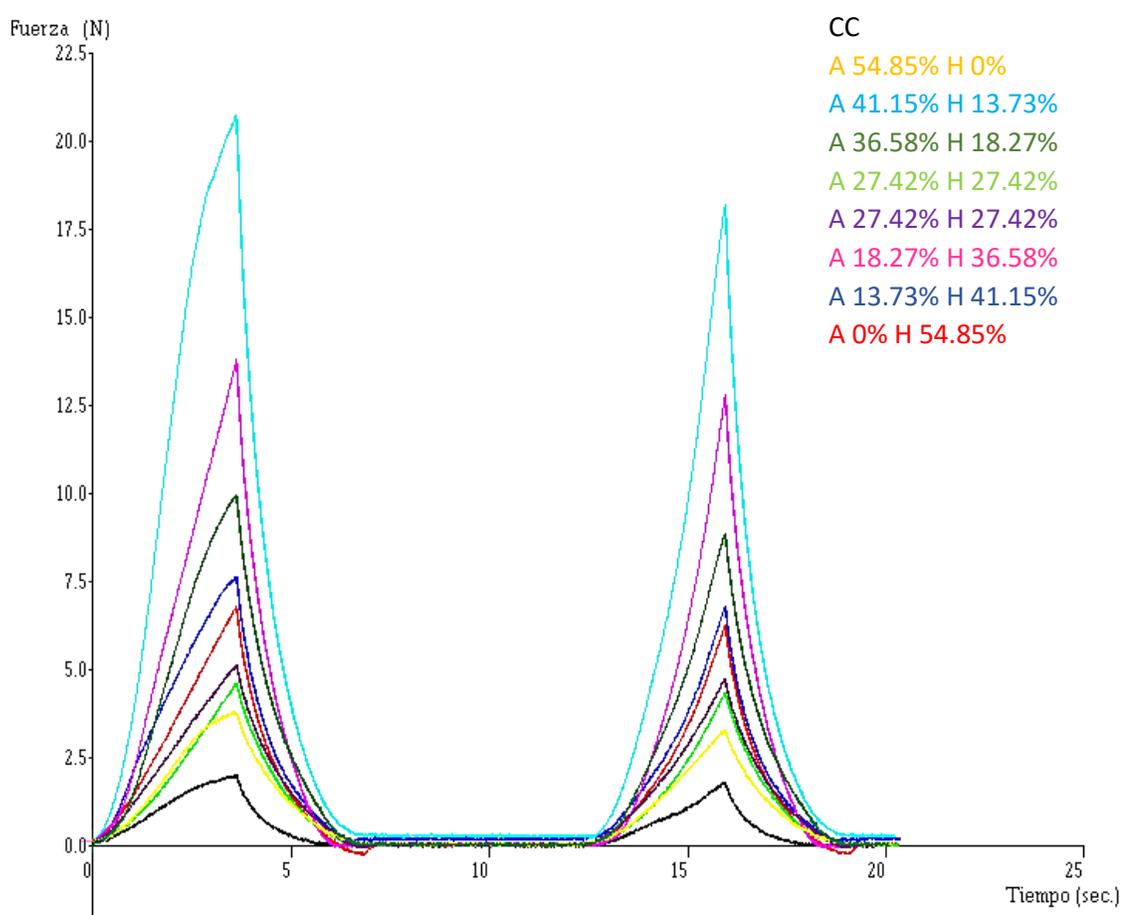


Figura 19. Efecto de la proporción de almidón de papa y hojuelas de papa sobre la dureza, elasticidad, cohesividad y masticosidad, A: almidón de papa; H: hojuelas de papa

La cohesividad se encontró entre 0.55 y 0.77. Claramente la formulación con parámetros más cercanos a CC fue la que contenía 54.85% de A y 0% de H debido

a su baja dureza y mayor altura además de poseer menor masticosidad. Los valores de dureza bajaron y subieron en el resto de las formulaciones por lo que no hubo una tendencia clara, esto se debió a las variaciones de agua agregada en cada formulación con la finalidad de obtener una masa con la consistencia necesaria para poderse moldear. A medida que se incrementó la proporción de almidón de papa, las formulaciones requirieron mayor cantidad de agua, por lo que el producto resultó gelatinoso y muy húmedo ya que no perdió suficiente humedad durante el horneado debido a la alta cantidad de hojuelas de papa.

Cuadro 21. Parámetros del análisis de perfil de textura. Efecto de la proporción de almidón de papa y hojuelas de papa la textura del pan

Muestra		Dureza (N)	Cohesividad	Elasticidad	Masticosidad (N)
Control con gluten		2±0.11 <sup>g</sup> (6%)	0.65±0.04 <sup>a b</sup> (6%)	0.86±0.04 <sup>a</sup> (5%)	1.11±0.08 <sup>f</sup> (7%)
Control sin gluten		56.73 ± 5.44 (10 %)	0.54 ± 0.04 (8 %)	0.73 ± 0.06 (8 %)	22.70 ± 4.15 (18 %)
Proporción de almidón de papa (%)	Proporción hojuelas papa (%)				
54.85	0	3.66 ± 0.15 <sup>f</sup> (4 %)	0.68± 0.11 <sup>a b</sup> (17 %)	0.92 ± 0.03 <sup>a</sup> (3 %)	2.29± 0.40 <sup>e f</sup> (17 %)
41.15	13.73	20.11± 0.33 <sup>a</sup> (3 %)	0.55±0.05 <sup>b</sup> (8%)	0.9 ± 0.03 <sup>a</sup> (1 %)	11.51±0.09 <sup>a</sup> (1%)
36.58	18.27	9.7± 0.33 <sup>c</sup> (3 %)	0.68±0.05 <sup>ab</sup> (8%)	0.9 ± 0.03 <sup>a</sup> (3 %)	5.88±0.63 <sup>a</sup> (11%)
27.42	27.42	5.27 ± 0.58 <sup>e</sup> (11%)	0.75 ± 0.04 <sup>a</sup> (5%)	0.9 ± 0.05 <sup>a</sup> (6%)	3.53 ± 0.03 <sup>d e</sup> (1%)
27.42	27.42	5.29± 0.21 <sup>e</sup> (4%)	0.77± 0.03 <sup>a</sup> (3%)	0.87 ± 0.7 <sup>a</sup> (8%)	3.54 ± 0.18 <sup>d e</sup> (5%)
18.27	36.58	7.81±0.41 <sup>d</sup> (5%)	0.67±0.04 <sup>a b</sup> (6%)	0.89±0.07 <sup>a</sup> (8%)	4.63±0.11 <sup>d</sup> (2%)
13.73	41.15	14.73± 0.79 <sup>b</sup> (5 %)	0.64± 0.01 <sup>a b</sup> (1 %)	0.83 ± 0.04 <sup>a</sup> (5 %)	7.8 ± 0.8 <sup>b</sup> (10 %)
0	54.85	6.71± 0.30 <sup>d</sup> (4 %)	0.68± 0.01 <sup>a b</sup> (1%)	0.90 ± 0.03 <sup>a</sup> (3%)	4.08 ± 0.23 <sup>d</sup> (6%)

Los valores que comparten la misma letra son estadísticamente iguales con  $\alpha = 0.05$  Entre paréntesis, coeficiente de variación

### 3.2.5 Estructura de la miga

En la Figura 20 se muestran las imágenes digitales después de medir y contar los poros en las rebanadas de pan de las diferentes formulaciones, donde se observa que la adición de hojuelas de papa compactó las rebanadas y produjo poros más ovalados y pequeños, esto se atribuyó al contenido de agua y al peso que no permitió el crecimiento de la masa; la formulación sin hojuelas de papa obtuvo poros más abiertos pero mayor altura y en consecuencia menor dureza ya que el almidón y menor cantidad de agua permiten el crecimiento de la masa durante la fermentación.

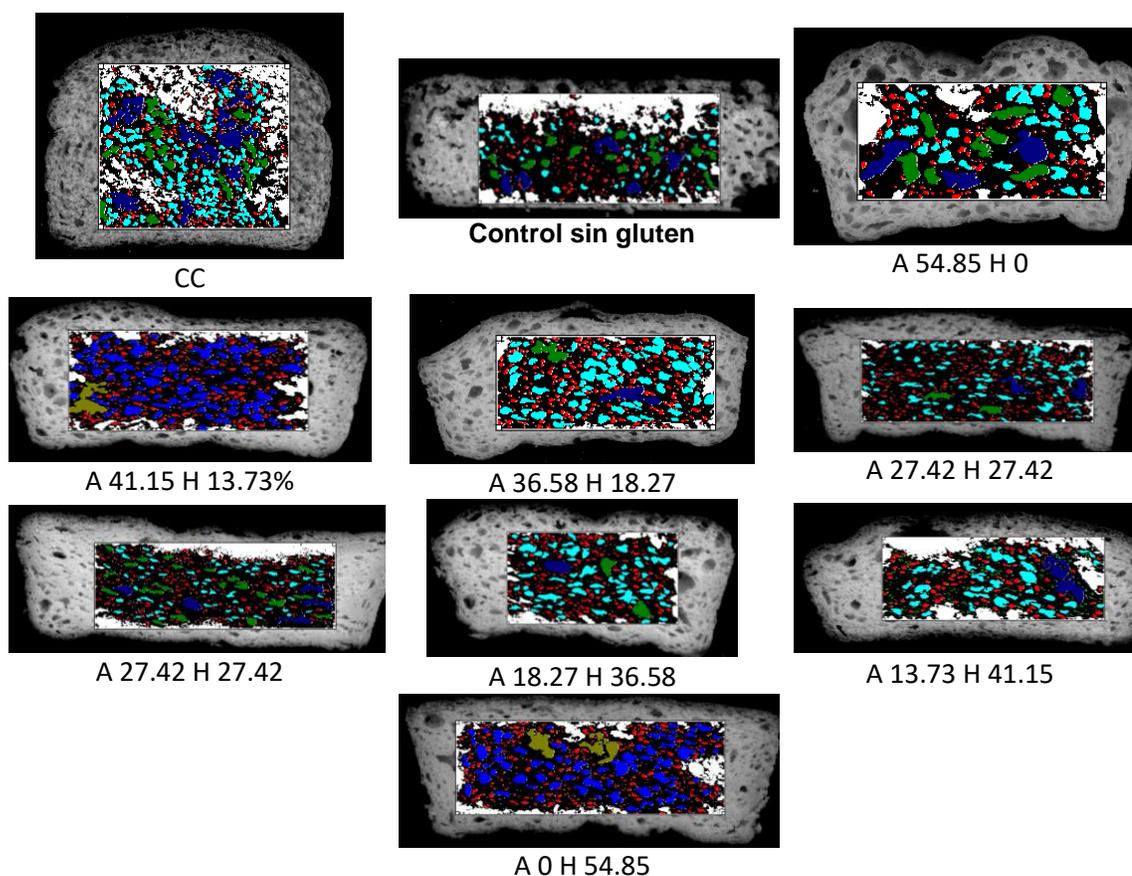


Figura 20. Efecto de la proporción de almidón de papa y hojuelas de papa en la estructura de la miga

En el Cuadro 22 se presentan los resultados obtenidos del análisis de imagen, donde se observa que, en fineza la mayoría de las formulaciones fueron iguales estadísticamente al CC con excepción de la formulación con 54.85% de A y 0% de H ya que ésta obtuvo menos poros y de mayor tamaño, lo que se puede notar en la Figura 20; en cuanto a fracción vacía y uniformidad se ve diferencia estadística, ya que algunas formulaciones presentaron más poros pero de menor tamaño; lo anterior se atribuyó a la cantidad de hojuelas de papa, ya que cuanto más se aumentó su concentración, la estructura de la miga lució más compacta y con poros de menor tamaño debido a que no permitió la correcta generación de gas durante la fermentación.

Cuadro 22. Efecto de la proporción de almidón de papa y hojuelas de papa sobre la estructura de la miga

Muestra		Fineza (Poros/ cm <sup>2</sup> )	Frac. Vacía	Uniformidad
Control con gluten		12.62±0.10 <sup>b</sup> (1%)	0.2± 0.03 <sup>b c</sup> (13%)	1.76±0.08 <sup>a b</sup> (4%)
Control sin gluten		10.22±2.09 (20%)	0.13±0.01 (9%)	1.13±0.26 (23%)
Proporción de almidón de papa (%)	Proporción hojuelas papa (%)			
54.85	0	6.63±0.23 <sup>c</sup> (3%)	0.26±2.08 <sup>a</sup> (8%)	1.39±0.17 <sup>c d e</sup> (13%)
41.15	13.73	16.34±1.43 <sup>a b</sup> (9%)	0.19±0.01 <sup>c d</sup> (3%)	1.70±0.02 <sup>b c</sup> (1%)
36.58	18.27	15.50±0.54 <sup>a b</sup> (3%)	0.25 <sup>a b</sup> (0%)	1.07±0.07 <sup>e</sup> (7%)
27.42	27.42	16.03±2.45 <sup>a b</sup> (15%)	0.22 <sup>a b</sup> (15%)	1.26±0.10 <sup>d e</sup> (3%)
27.42	27.42	16.39±1.43 <sup>a b</sup> (9%)	0.25±2.65 <sup>a b c</sup> (11%)	1.34±0.18 <sup>e</sup> (14%)
18.27	36.58	19.19±1.75 <sup>a b</sup> (9%)	0.19±0.03 <sup>c d</sup> (16%)	1.64±0.22 <sup>b c</sup> (13%)
13.73	41.15	19.09±2.13 <sup>a</sup> (11%)	0.12±1.53 <sup>e</sup> (12%)	2.09±0.10 <sup>a</sup> (5%)
0	54.85	18.91±1.32 <sup>a b</sup> (7%)	0.1±0.02 <sup>d e</sup> (15%)	1.67±0.05 <sup>b c d</sup> (3%)

Los valores que comparten la misma letra son estadísticamente iguales con  $\alpha= 0.05$  Entre paréntesis, coeficiente de variación

Con los resultados presentados anteriormente se seleccionó la formulación con 54.85% de A y 0% de H para continuar con el siguiente objetivo, ya que presentó mayor volumen específico y altura, menor dureza, elasticidad, cohesividad y masticosidad similar a CC y una estructura de miga aceptable, aunque no muy cercana a CC lo cual se buscó mejorar con la adición de fructanos de agave. El hecho que el almidón de papa no retuviera tanta agua como las hojuelas de papa se debió a que el almidón nativo de papa es estable a bajas temperaturas, capta agua y gelatiniza parcialmente hasta el momento del horneado (Witzack *et al.*, 2011), mientras que las hojuelas de papa al ya haber pasado por un proceso de cocción y secado ya se encuentran pregelatinizadas y se hidratan de manera inmediata al mezclarse con el agua, produciendo una masa muy viscosa y por lo tanto, requiriendo más de la misma, por este motivo, conforme aumentó la proporción de hojuelas de papa, se alejó del resultado deseado, no obstante, en este objetivo se concluyó que las hojuelas de papa daban al producto cierta firmeza y humedad ya que los panes no se desmoronaban, motivo por el cual se decidió que en el objetivo 3 se estudiaría el efecto de la concentración de fructanos de agave en la formulación sin hojuelas de papa.

### **3.3 Efecto de la concentración de fructanos de agave**

#### **3.3.1 Apariencia de la hogaza**

La adición de hasta 7.88 % de fructanos de agave (F) con 54.85% de almidón de papa y sin hojuelas de papa, dio mejores resultados, ya que se incrementó la altura y la apariencia resultó más parecida a CC.

#### **3.3.2 Volumen**

Se puede observar en la Figura 21 los cambios en el volumen, mientras que en el Cuadro 23 se muestran los resultados haciendo la aclaración de que debido a que se contaba con una cantidad limitada de almidón de papa, solo se elaboró una hogaza por lo que no fue posible obtener desviación estándar y coeficiente de

variación; cabe mencionar que como se observó en el objetivo anterior, las hojuelas de papa evitaron el desmoronamiento en el producto, por lo que se decidió realizar una formulación extra utilizando la mitad de la menor cantidad de hojuelas de papa estudiadas en el objetivo 2 (6.86% hojuelas de papa, 41.15% almidón de papa y 4.99% fructanos de agave). Los productos presentaron una gran mejora en el volumen específico, sin embargo, se presentó una baja en el volumen durante el horneado similar a cuando se usó HPMC pero en menor magnitud, este fenómeno se hizo más notorio conforme aumentó la concentración de fructanos de agave, este fue otro motivo por el que se decidió realizar una formulación extra; la formulación con 4.99% de F fue con la que se tuvo la mayor altura ya que la conservó durante el horneado y en consecuencia el mayor volumen específico siendo de 3.53 mL/g lo más cercano a CC durante toda la experimentación, la adición de hojuelas de papa no ayudó a mantener la altura, sin embargo, el pan si resultó menos desmoronable que el resto. En cuanto a pérdida de peso, presentaron una mayor pérdida las formulaciones con 7.48% de F; 9.98% de F; 6.86% de H con 41.15% de A y 4.99 de F, debido a la disminución en el volumen.

*Cuadro 23. Efecto de la concentración de fructanos de agave*

<b>Muestra</b>	<b>Ve (mL/ g)</b>	<b>Altura (mm)</b>	<b>Pérdida de peso (%)</b>
<b>Control con gluten</b>	4.68±0.57 12%	76.39±0.75 (1%)	25.92
<b>Control sin gluten</b>	1.46	27.7±2.13 (8%)	23.19
<b>4.99% fructanos de agave</b>	3.53	68.09±1.10 (2%)	20.17
<b>7.48% fructanos de agave</b>	2.71	59.02±0.76 (1%)	23.11
<b>9.98% fructanos de agave</b>	2.95	67.49±0.38 (1%)	22.14
<b>4.99% fructanos de agave, 47.99% almidón de papa, 6.87% hojuelas de papa</b>	3.21	60 ±1.4 (1%)	22.71

Entre paréntesis, coeficiente de variación



Control con gluten



Control sin gluten (CS)



4.99% Fructanos de agave



7.48% Fructanos de agave



9.98% Fructanos de agave



6.86% hojuelas de papa, 41.15% almidón de papa, 4.99% fructanos de agave

Figura 21. Efecto de la concentración de fructanos de agave en la apariencia externa del pan con 1.85% de xantana y 0.62% HPMC y 54% de almidón de papa.

### 3.3.3 Color de la corteza y la miga

En el Cuadro 24 y 25 se muestran resultados de color de la corteza y la miga respectivamente, se observa nuevamente que los colores que se encontraron en la corteza fueron amarillo rojizo con valores de L más bajos a y b positivos y en la miga blanco con tonos ligeros de amarillo con valores de a negativos y valores de b más bajos; estadísticamente no hay variación entre los parámetros.

Cuadro 24. Efecto de la concentración de fructanos de agave sobre el color de la corteza

Muestra	L	a	b
Control con gluten	49.17±1.57 <sup>a</sup> (3%)	12.27±0.20 <sup>c</sup> (2%)	25.3±1.28 <sup>a</sup> (5%)
Control sin gluten	63.04±4.13 (7%)	0.6±0.23 (39%)	19.93±1.13 (6%)
4.99% fructanos de agave	53.57±1.13 <sup>a</sup> (2%)	12.84±0.57 <sup>c</sup> (4%)	25.4±0.31 <sup>a</sup> (1%)
7.48% fructanos de agave	49.01±8.88 <sup>a</sup> (18%)	16.36±0.70 <sup>a</sup> (4%)	22.71±3.19 <sup>a</sup> (14%)
9.98% fructanos de agave	49.41±5.42 <sup>a</sup> (11%)	14.7±0.21 <sup>b</sup> (1%)	21.76±5.12 <sup>a</sup> (24%)
4.99% fructanos de agave, 47.99% almidón de papa, 6.87% hojuelas de papa	42.88±0.76 <sup>a</sup> (1.8%)	14.55±0.46 <sup>b</sup> (3.2%)	23.06±0.37 <sup>a</sup> (1.6%)

Los valores que comparten la misma letra son estadísticamente iguales con  $\alpha = 0.05$   
Entre paréntesis, coeficiente de variación

Cuadro 25. Efecto de la concentración de fructanos de agave sobre el color de la miga

Muestra	L	a	B
Control con gluten	68.53±3.54 <sup>a</sup> (5%)	-2.59±0.26 <sup>abc</sup> (10%)	13.08±0.47 <sup>a</sup> (4%)
Control sin gluten	67.98±3.05 (4%)	-1.41±0.16 (12%)	10.27±0.04 (0%)
4.99% fructanos de agave	68.12±2.73 <sup>a</sup> (4%)	-2.01±0.34 <sup>abc</sup> (17%)	4.61±0.94 <sup>c</sup> (20%)
7.48% fructanos de agave	71.54±3.58 <sup>a</sup> (5%)	-1.63±0.13 <sup>ab</sup> (8%)	6.09±0.19 <sup>c</sup> (3%)
9.98% fructanos de agave	73.74±1.36 <sup>a</sup> (2%)	-1.85±0.07 <sup>c</sup> (4%)	5.37±0.48 <sup>b</sup> (9%)
4.99% fructanos de agave, 47.99% almidón de papa, 6.87% hojuelas de papa	71.28±1.53 <sup>a</sup> (2%)	-2.4±0.30 <sup>b</sup> (13%)	7.74±1.04 <sup>b</sup> (13%)

Los valores que comparten la misma letra son estadísticamente iguales con  $\alpha = 0.05$   
Entre paréntesis, coeficiente de variación

### 3.3.4 Textura de la miga

En la Figura 22 se presentan las curvas de la prueba de perfil de textura donde se puede notar que la altura de las curvas ya no se alejó tanto de la formulación

control sin gluten. La adición de hojuelas de papa incrementó la dureza, cuyos valores se encontraron entre 2-5 N. Moore *et al.* (2004), reportan valores de 3.5-4 N utilizando harina de trigo sarraceno, harina de arroz y goma xantana, mientras que para masticosidad valores entre y 4-11 N, por lo que los valores obtenidos son similares a los reportados; se observa en el Cuadro 26 que la formulación extra (6.86% hojuelas de papa, 41.15% almidón de papa y 4.99% fructanos de agave) resultó con mayor dureza y mayor masticosidad además de ser la menos elástica después de CC; las formulaciones con 4.99% de F, 7.48% de F y 9.98% de F resultaron en panes más elásticos incluso que CC y no presentaron diferencia estadística entre ellos así como en masticosidad que incluso fueron iguales estadísticamente en este parámetro.

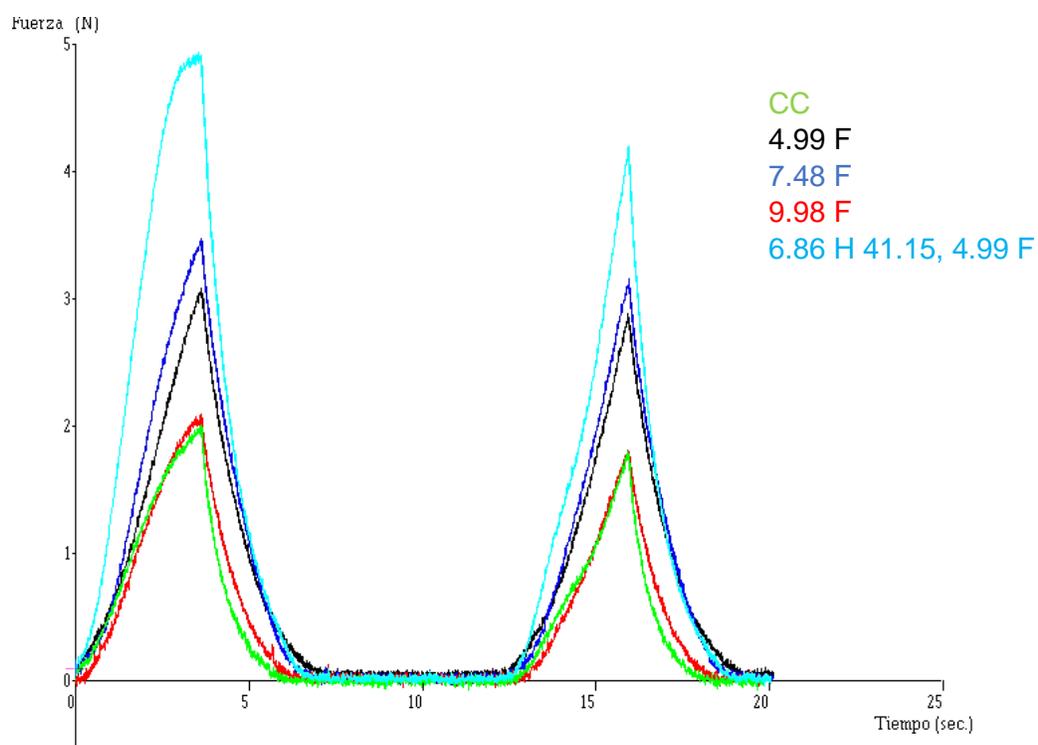


Figura 22. Efecto de la concentración de Fructanos de agave sobre la dureza, elasticidad, cohesividad y masticosidad del pan.

Cuadro 26. Efecto de la concentración de fructanos de agave sobre la textura del pan

Concentración de fructanos de agave (%)	Dureza (N)	Cohesividad	Elasticidad	Masticosidad (N)
CC C.V	2±0.11 <sup>c</sup> 6%	0.65±0.04 <sup>c</sup> 6%	0.86±0.04 <sup>b</sup> 5%	1.11±0.08 <sup>b</sup> 7%
CS C.V	56.73 ± 5.44 10 %	0.54 ± 0.04 8 %	0.73 ± 0.06 8 %	22.70 ± 4.15 18 %
4.99	3.20±0.23 <sup>b</sup> 7%	0.72±0.03 <sup>a</sup> 4%	0.90±0.03 <sup>a</sup> 3%	2.08±0.23 <sup>b</sup> 11%
7.48	2.07±0.17 <sup>c</sup> 8%	0.68±0.04 <sup>b</sup> 7%	0.92±0.01 <sup>a</sup> 1%	1.28±0.18 <sup>b</sup> 14%
9.98	1.95±0.13 <sup>c</sup> 7%	0.69±0.05 <sup>b</sup> 7%	0.89±0.07 <sup>a</sup> 8%	1.19±0.14 <sup>b</sup> 12%
4.99 F, 47.99 A, 6.87 H	5.03±0.16 <sup>a</sup> 3%	0.62±0.05 <sup>c</sup> 8%	0.88±0.04 <sup>b</sup> 4%	2.75±0.28 <sup>a</sup> 10%

Los valores que comparten la misma letra son estadísticamente iguales con  $\alpha = 0.05$

### 3.3.5 Estructura de la miga

En la Figura 23, se puede ver que la estructura de la miga más similar al CC es la de 7.48% F, sin embargo, no hubo gran diferencia entre ellas ya que presentaron una miga con muchos poros grandes.

En el cuadro 27, se puede notar que en fracción vacía y uniformidad no hubo diferencia significativa entre formulaciones, mientras que en fineza las formulaciones con fructanos fueron estadísticamente iguales al control, a excepción de la que contenía la menor cantidad de éstos. En lo que respecta a la uniformidad, las formulaciones con fructanos tuvieron valores más bajos que el control. Hasta este punto se ha demostrado que se logró mejorar las características del pan y la adición de fructanos de agave acercó dichas características al CC. Tomando en cuenta que la apariencia de la hogaza, la altura y volumen específico obtenidos con la formulación que contenía 4.99% de fructanos de agave, fueron los más cercanos al control con gluten y que los parámetros de textura y apariencia de la miga obtenidos con esta formulación fueron aceptables y cercanos a los del control con gluten, por lo que se consideró la mejor opción.

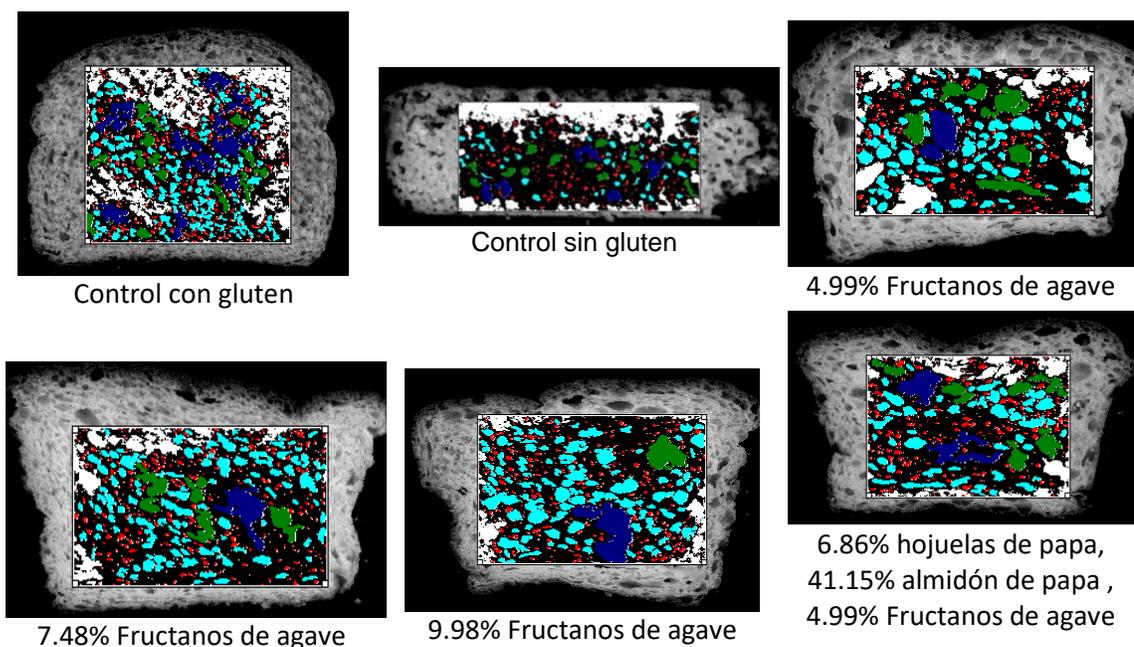


Figura 23. Efecto de la concentración de fructanos de agave en la estructura de la miga

Cuadro 27. Efecto de la concentración de fructanos de agave en la estructura de la miga

Muestra	Fineza (Poros/ cm <sup>2</sup> )	Frac. Vacía	Uniformidad
<b>Control con gluten</b>	12.62±0.10 <sup>ab</sup> (1%)	0.2± 0.03 <sup>a</sup> (13%)	1.76±0.08 <sup>a</sup> (4%)
<b>Control sin gluten</b>	10.22±2.09 (20%)	0.13±0.01 (9%)	1.13±0.26 (23%)
<b>4.99% fructanos de agave</b>	8.07±0.02 <sup>c</sup> (0.3%)	0.24±0.92 <sup>a</sup> (4%)	1.16±0.09 <sup>b</sup> (8%)
<b>7.48% fructanos de agave</b>	15.35±1.54 <sup>a</sup> (10%)	0.24±3.16 <sup>a</sup> (13%)	1.49±0.17 <sup>b</sup> (11%)
<b>9.98% fructanos de agave</b>	9.67±0.43 <sup>bc</sup> (4%)	0.28±0.03 <sup>a</sup> (9%)	1.05±0.21 <sup>b</sup> (20%)
<b>4.99% fructanos de agave, 47.99% almidón de papa, 6.87% hojuelas de papa</b>	9.74±1.33 <sup>bc</sup> (14%)	0.23±0.02 <sup>a</sup> (10%)	1.28±0.10 <sup>b</sup> (8%)

Los valores que comparten la misma letra son estadísticamente iguales con  $\alpha= 0.05$   
Entre paréntesis, coeficiente de variación

#### **4. Evolución de las características del pan durante el desarrollo de la experimentación**

Con la finalidad de poder explicar la evolución de las propiedades del pan durante la experimentación, se tomó en consideración una revisión realizada por Lambrecht *et al.* (2018) sobre la formación de redes inducidas por calor entre proteínas de diferentes fuentes. En esta revisión, se enfocan en un producto de panificación, pound cake, que está constituido en partes iguales por harina de trigo, azúcar, huevo y mantequilla. Si bien este producto es diferente al pan básico, algunas de las consideraciones y conclusiones aplican al presente trabajo, en el cual la grasa y el azúcar están presentes en mucha menor proporción y no hay presencia de proteínas de gluten, en los panes libres de este componente. En productos que contienen gluten, las proteínas de éste interaccionan con el agua y con la acción mecánica se desarrolla una matriz viscoelástica que retiene el gas producido por el mezclado y la fermentación y evita la sedimentación de los gránulos de almidón. La formación e incremento de fuerza de las redes entre proteínas de diferentes fuentes está ampliamente documentada. En productos basados en trigo, la inclusión de proteínas de huevo aumenta el tiempo de desarrollo de la masa, su fuerza y estabilidad después del mezclado, básicamente por medio de interacciones iónicas. En pan, cuyo contenido de proteínas diferentes al trigo es menor que en productos como pasteles, es de esperarse que este efecto sea menor. Durante el horneado, las proteínas de la clara son secuencialmente incorporadas en la red de proteínas en orden de su temperatura de desnaturalización, debido a la formación de enlaces intermoleculares SS con las proteínas de la yema y/o el trigo a través de reacciones de intercambio SH-SS (Lambrecht *et al.*, 2018).

En el caso del presente trabajo, en el pan control con gluten la matriz del gluten pudo estar reforzada por las interacciones con las proteínas de la leche, proporcionando un pan con buenas características de altura, volumen específico,

estructura y textura de la miga. En el pan control sin gluten, en el que solamente estaban presentes bajas cantidades de proteína (de la leche y de la harina de arroz), no se desarrollaron suficientes redes de proteínas que dieran estructura a la masa y que coagularan durante el horneado, además de no contener gomas que impartieran propiedades viscoelásticas, motivo por el cual el pan presentó volumen específico, altura y fracción vacía muy bajos, alta dureza y baja cohesividad y elasticidad. En el mejor pan experimental del primer objetivo, la adición de clara de huevo, además de facilitar la incorporación de aire durante el mezclado por sus propiedades tensoactivas, pudo formar una red al coagular térmicamente durante el horneado, además, las gomas, almidón y hojuelas de papa adicionados impartieron propiedades viscoelásticas a la masa, permitiendo retener el gas producido por la fermentación; todo esto produjo un pan con mucho mejores propiedades que el control con gluten. Al variar la proporción de hojuelas de papa y almidón de papa en el objetivo 3, incrementando la proporción de hojuelas de papa a expensas del almidón de papa, los panes quedaron muy húmedos por la gran cantidad de agua retenida durante el mezclado por el almidón gelatinizado durante el proceso de elaboración de las hojuelas, lo cual limitó el crecimiento del pan al obtenerse una masa muy espesa, por lo que la mejor formulación fue sin hojuelas de papa, obteniéndose buenas características de altura volumen específico, estructura de la miga y textura. Finalmente, la adición de fructanos de agave incrementó la altura y volumen específico cuando se adicionó hasta 4.99, lo que puede atribuirse a que los fructanos poseen ciertas propiedades tensoactivas lo que contribuyó a la incorporación de aire (Sosa-Herrera *et al.*, 2016); además disminuyó la dureza e incrementó la cohesividad, mejorando las características del pan.

El gluten está compuesto de proteínas que juegan un papel importante en la formación y estabilización de la estructura de la miga y por lo tanto, contribuye a la calidad del pan (Wilderjans *et al.*, 2008). La estructura de la miga está dada por el gelatinizado e hinchado de gránulos de almidón incrustados en una matriz de proteínas (formada por gluten y en ocasiones ovoalbúmina de huevo). La interfase

aire-miga puede estar parcialmente recubierta con grasa (margarina, manteca o aceite de origen vegetal), dependiendo del producto de panificación de que se trate (Lambrecht *et al.*, 2018).

En el caso de la formulación base empleada para la experimentación se utilizó clara de huevo para tratar de formar la matriz proteínica y el jugo de limón para disminuir el pH, sin embargo, la cantidad de proteína no fue capaz de formar dicha matriz por lo que el almidón contenido se precipitó dando un pan compacto.

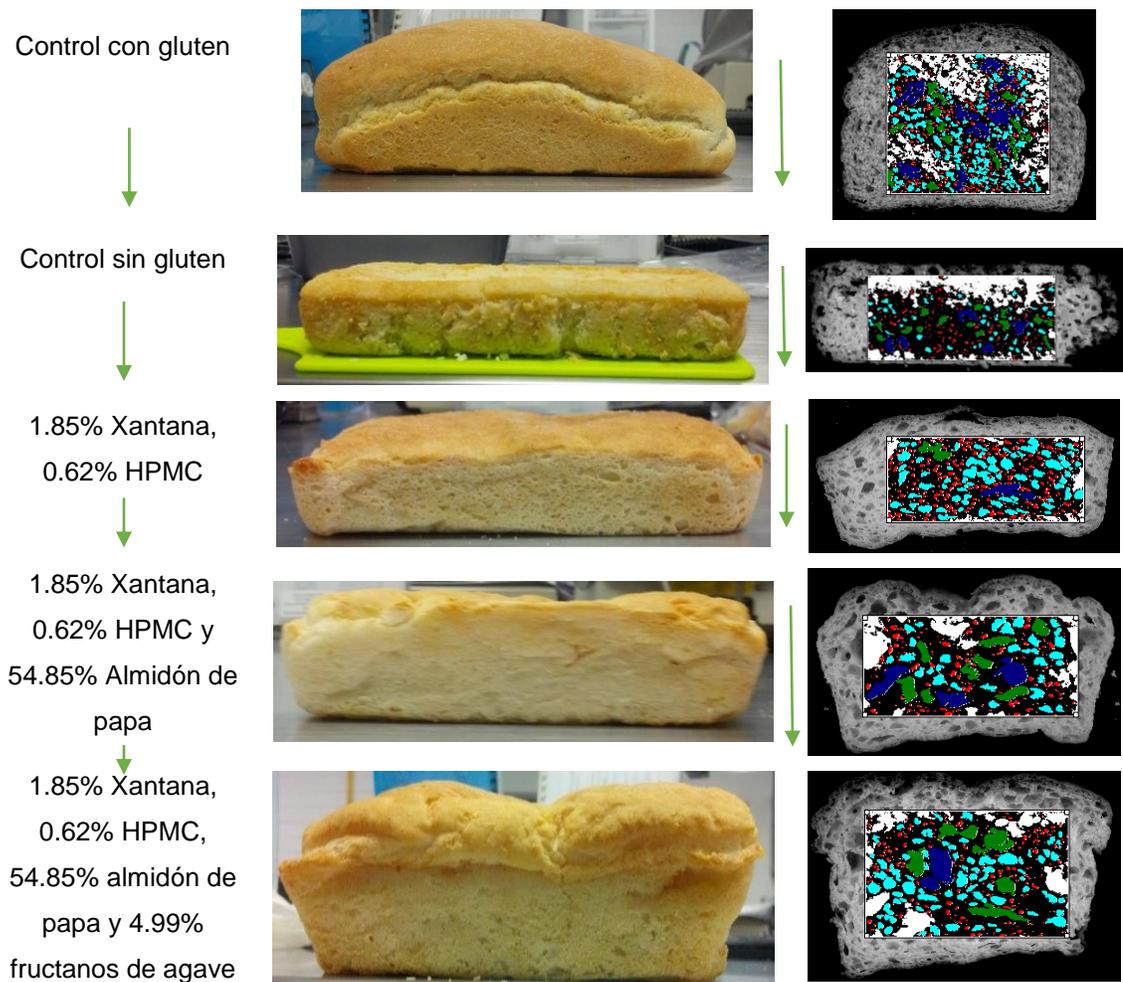


Figura 24. Evolución de pan de caja sin gluten

En la Figura 24 se muestra la evolución del pan: en primera instancia se tiene el pan control sin gluten (CS) el cual consistió en harina de arroz, levadura, azúcar, sal, agua y leche en polvo, debido a la baja cantidad de proteína, se obtuvo un producto compacto, quebradizo y de baja altura, esto debido a la falta de la matriz proteínica; para otorgar la función de dicha matriz se agregaron gomas (xantana e HPMC), almidón de papa y fructanos de agave, siendo estos con los que se formó una mezcla que impidió la precipitación de los gránulos de almidón ya que se formaron enlaces covalentes con la ovoalbúmina presente en la clara de huevo dando estabilidad y forma a la estructura de la miga.

#### **Objetivo 4. Determinación del comportamiento viscoelástico y consistencia de la masa**

##### **3.4.1 Comportamiento viscoelástico de la masa**

En la Figura 24 se presenta el espectro mecánico de cada una de las masas correspondientes a la mejor formulación obtenida en cada objetivo. Puede notarse que en todas predomina el módulo elástico sobre el viscoso, lo cual concuerda con lo reportado por Lazaridou *et al.* (2007). Se puede observar que el módulo elástico de la masa del objetivo 1 fue mayor que el correspondiente al CC, que contenía 1.85% de xantana, 0.62% de HPMC, 36.58% de almidón de papa y 18.27 % de hojuelas de papa, ingredientes que en conjunto le otorgan una elasticidad alta a la masa, así como una mayor diferencia entre el módulo elástico y el viscoso y una menor dependencia de los módulos con la frecuencia, lo que probablemente limitó el incremento de volumen. La eliminación de las hojuelas de papa en el objetivo 2 disminuyó los valores de ambos módulos, permitiendo a la masa mayor crecimiento y a la hogaza alcanzar un mayor volumen específico y altura ya que como se mencionó anteriormente al adicionar mayor cantidad de hojuelas de papa la consistencia en la masa se nota más espesa debido a la absorción de agua y la pre gelatinización del almidón de dichas hojuelas. La adición de fructanos de agave en el objetivo 3 promovió una mayor disminución de ambos módulos, pero

aun así se logró mejorar el volumen específico, la altura y las propiedades texturales dando un producto final más parecido al CC.

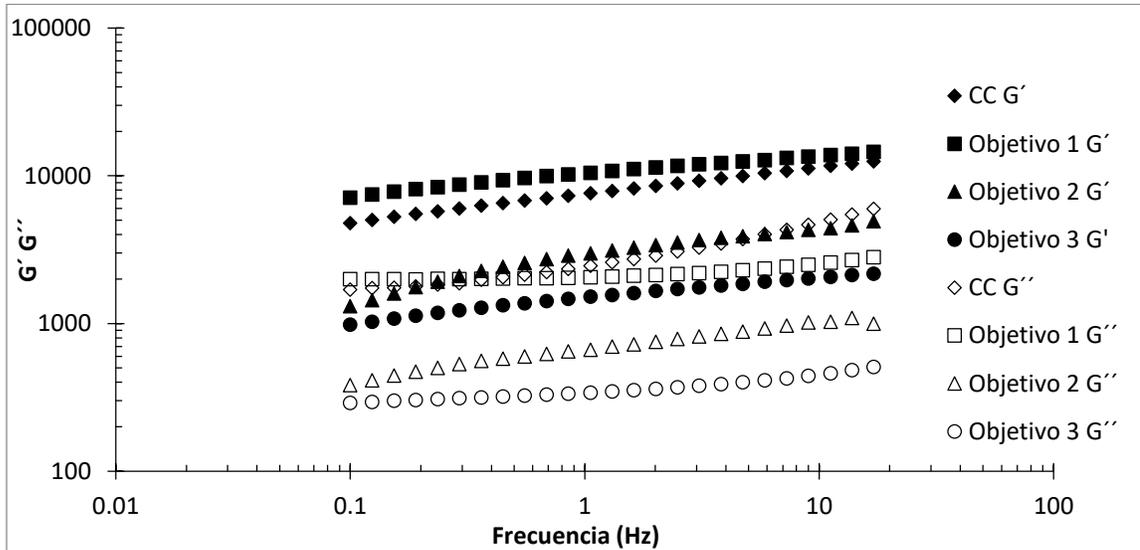


Figura 25. Espectros mecánicos de las masas de las formulaciones seleccionadas en cada objetivo

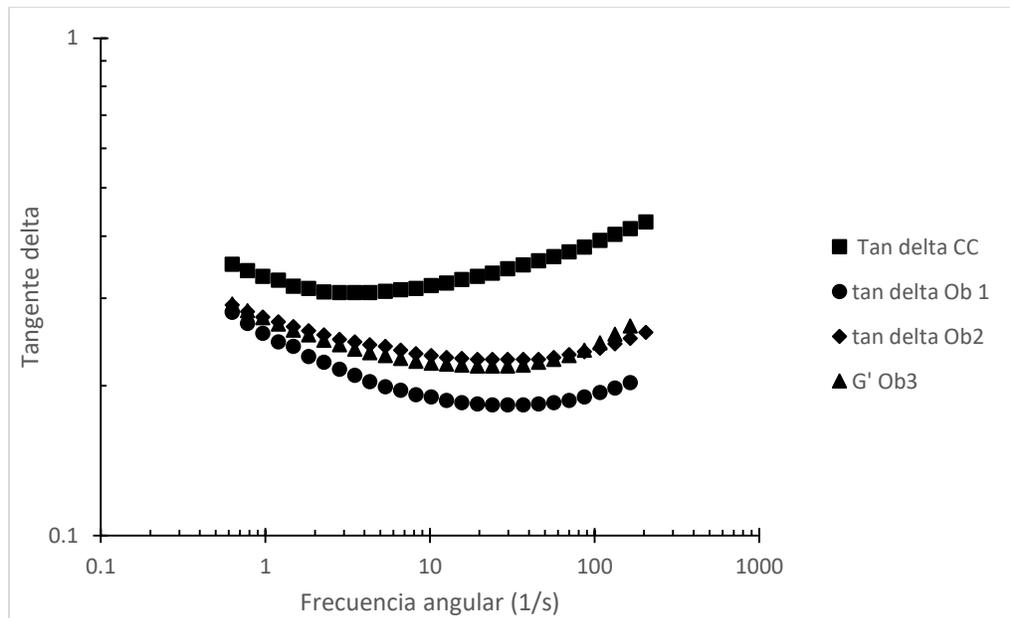


Figura 26. Tangente del ángulo de desfase en función de la frecuencia angular para las masas control con gluten y las correspondientes a las formulaciones seleccionadas en cada objetivo

En la Figura 25 se muestran las curvas de la tangente del ángulo delta en función de la frecuencia angular para las diferentes masas, y puede observarse que en la masa control con gluten el valor de la tangente del ángulo delta es el más alto, lo que indica que en esta masa el predominio del módulo elástico sobre el viscoso es menor. Por el contrario, en la masa del objetivo 1 que conteá gomas, hojuelas de papa y almidón de papa, el predominio del módulo elástico sobre el viscoso fue menos notable. Las masas de los objetivos 2 y 3 mostraron un comportamiento intermedio y muy similar.

### **3.4.2 Propiedades texturales de la masa**

En la Figura 26 se muestran las curvas de fuerza en función del tiempo de la prueba de consistencia adhesividad de las mejores formulaciones de cada objetivo. Puede notarse algo similar a lo observado en el comportamiento viscoelástico, pues la masa que contiene gomas, almidón de papa y hojuelas de papa (objetivo 1) presenta una mayor altura que el control con gluten, mientras que las mejores masas de los objetivos 2 y 3 presentaron curvas con menor altura tanto en la parte positiva relacionado con la consistencia, como en la parte negativa relacionado con las propiedades adhesivas, además de ser casi iguales entre sí. En el Cuadro 28 se muestran los parámetros texturales donde se observa que el CC y la mejor masa del objetivo 1, tuvieron valores más altos de consistencia y adhesividad, y las mejores masas de los objetivos 2 y 3 tuvieron valores más bajos.

Debido a la baja consistencia de la masa del control sin gluten no se incluyeron los datos ya que se encontraron fuera del intervalo de sensibilidad del instrumento, esto se debe a que la masa era similar a una suspensión muy líquida.

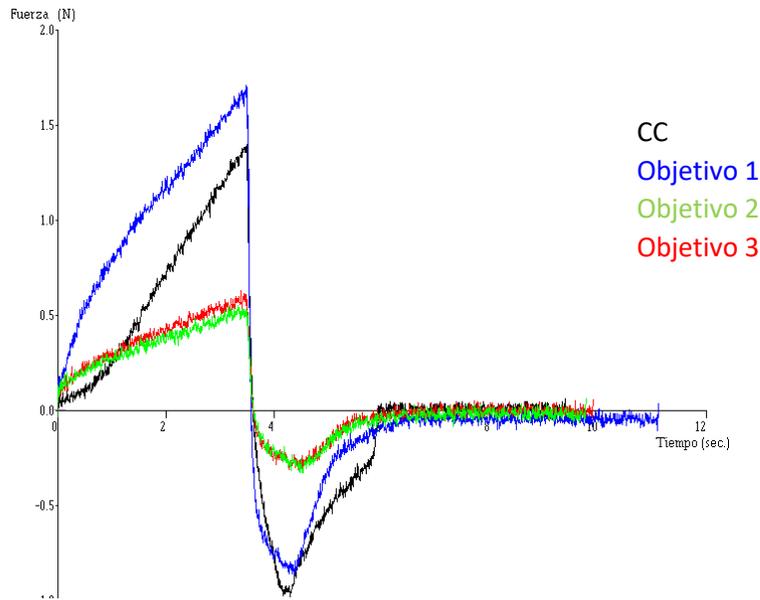


Figura 26. Curvas de consistencia-adhesividad en las masas seleccionadas en cada objetivo

Cuadro 28. Parámetros texturales de la prueba de consistencia-adhesividad en las masas seleccionadas en cada objetivo

Formulaciones	Consistencia (N)	Fuerza adhesiva (N)	Adhesividad (N.s)	Estiramiento (mm)	Untabilidad (mm/N)
Control con gluten	1.55±0.18 <sup>a</sup> (12%)	1.2±0.2 <sup>a</sup> (13%)	3.6±0.36 <sup>a</sup> (10%)	49.6±3.62 <sup>a</sup> (7%)	42.7±8.69 <sup>a</sup> (20%)
1.85% X, 0.62% HPMC, 36.58% A, 18.27% H	1.6±0.10 <sup>a</sup> (6%)	0.8±0.03 <sup>b</sup> (4%)	1±0.06 <sup>b</sup> (6%)	27.9±2.15 <sup>b</sup> (8%)	33.6±2.48 <sup>b</sup> (7%)
1.85% X, 0.62% HPMC, 54.85% A	0.57±0.01 <sup>b</sup> (2%)	0.3±0.001 <sup>c</sup> (1%)	0.4±0.02 <sup>c</sup> (5%)	24.9±0.92 <sup>b</sup> (4%)	0.4±0.02 <sup>c</sup> (5%)
1.85% X, 0.62% HPMC, 54.85% A, 4.99% F	0.55±0.07 <sup>b</sup> (12%)	0.3±0.01 <sup>c</sup> (3%)	0.4±0.03 <sup>c</sup> (7%)	23.6±1.84 <sup>b</sup> (8%)	0.4±0.03 <sup>c</sup> (7%)

Los valores que comparten la misma letra son estadísticamente iguales con  $\alpha=0.05$  Entre paréntesis, coeficiente de variación

## CONCLUSIONES

El uso de goma xantana brinda al pan resistencia en la estructura mientras que la hidroxipropilmetilcelulosa favorece la capacidad de generación de gas durante la fermentación, más no la capacidad de retenerlo durante el horneado ya que es termo sensible a la temperatura de horneado, al contrario de la xantana que soporta esta temperatura y forma enlaces fuertes que retienen agua, sin embargo, la combinación de estos hidrocoloides ayuda a la expansión de la masa y retención del gas durante el horneado siendo la goma xantana la que brinda estabilidad y la hidroxipropilmetilcelulosa la que favorece a la expansión de la masa durante el horneado. En presencia de almidón de papa, éstas actúan mejor en conjunto ya que brindan estabilidad y características viscoelásticas a la masa y durante la fermentación permiten el correcto desarrollo de la matriz además de conservar el volumen durante el horneado, en consecuencia mejoran las características del producto final obteniendo un pan alto, con alto volumen específico y apariencia buena; por el contrario, altas concentraciones de HPMC dieron productos de baja altura y deformes en comparación a aquellos que incluían en mayor proporción xantana. La exclusión de hojuelas de papa en su totalidad promovió la formación de un producto más alto y más suave, cohesivo y más elástico aunque con poros más grandes, presentó características cercanas a CC ya que no hubo alta retención de humedad; el uso de altas concentraciones de hojuelas de papa resultó en productos compactos y pesados que aunque elásticos fueron muy duros, el objetivo del proyecto se cumplió con la adición de fructanos de agave ya que contribuyeron dando una masa que aun cuando mostró los módulos viscoso y elástico más bajos el balance entre ellos permitió el crecimiento de la masa y la conservación del volumen durante el horneado dando productos más altos y con mejor estructura de la miga. Altas concentraciones de fructanos de agave presentaron productos de bajo volumen y apariencia achatada, el producto con 1.85% X, 0.62% HPMC, 54.85% A y 4.99% F, fue la formulación con

características más cercanas al pan de caja con gluten, el producto es cohesivo, elástico, suave, alto, uniforme y la corteza presenta el color amarillo rojizo característico del pan, la adición de hojuelas de papa a esta formulación no genera grandes cambios, el más notorio es que dio un producto más duro; con los resultados obtenidos se observa que una masa sin gluten da un producto más agradable cuando el módulo elástico y la consistencia es más bajo así de la misma que el de un pan con gluten.

## REFERENCIAS

AACC. (1983). AACC method 74-09; Bread firmness by universal testing machine. In *Approved methods of the American Association of Cereal Chemist Vol 2* (18<sup>th</sup> ed.). St Paul, MN: American Association of Cereal Chemist, Inc.

Alvarado, C., Camacho, M., Cejas, R., y Rodríguez, J. (2014). Profiling of commercial Agave fructooligosaccharides using ultrafiltration and high performance thin layer chromatography. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 13, 417-427.

ANPROPAN. (2016). Industria de la panificación; datos estadísticos. *MexiPan*, 14:1–25.

Arrizón, J., Urias S., J. E., Sandoval, G., Mancilla M., N. A., & Gschaedler, A. C. (2014). Production and bioactivity of fructan-type oligosaccharides. En F. J. Moreno, & M. L. Sanz, *Food Oligosaccharides: Production, Analysis and Bioactivity* (págs. 184-199). Madrid: John Wiley & Sons.

Barriga, X. (2003). *Panadería Artesana, Tecnología y Producción* (1<sup>er</sup> ed.). Barcelona, España: Molinería y panadería.

Bender, A.D (1995). *Introducción a la Nutrición y el Metabolismo*. Department of Biochemistry and Molecular Biology; University College London. Editorial Acribia, Zaragoza, España. 347 pp.

Blanshard J.M.V., Frazier P.J, Galliard T (1985). *Chemistry and Physics of Baking* (1<sup>er</sup> ed.). Nottingham, Royal Society of Chemistry.

Born, K.; Langendorff, V.; Boulenguer, P. (2002). Xanthan. *Biopolymers*. 5: 259-291.

Calvo Miguel (2016). Estructura Química del Almidón. (2017). De Bioquímica de los alimentos disponible en: <http://milksci.unizar.es/bioquimica/temas/azucares/almidon.html>

Cámara nacional de la industria de la panificación. (2016). De Panero a Panadero (1<sup>er</sup> ed.). Madrid España: The cube company group.

CanStockPhoto. (2014). Estructura molecular del gluten.2017, de CanStockPhoto disponible en: <https://www.canstockphoto.es/gluten-structure-p%C3%A9ptido-17261408.html>

Carrillo, J. A. M. (2014). Reporte estadístico. (2017). De Cámara nacional de la industria molinera de trigo (CANIMOLT), disponible en: <http://www.canimolt.org/>

Casas Alencáster N. B. (2017). Apuntes del taller de reología y textura de alimentos. LAPRYFAL

Casas Alencáster N.B. (2015). Guía de uso de Texturómetro System Analyzer. LAPRYFAL

Chacón V., A. (2006). Perspectivas agroindustriales actuales de los fructooligosacáridos. *Agronomía Mesoamericana*, 17(2), 265-286.

Cherbut, C. 2002. Inulin and oligofructose in the dietary fiber concept. *British Journal of Nutrition*. 87(2). 159-162.

Demel, R., Dorrepaal, E., Ebskamp, M., Smeekens, J., y de Kruijf, B. (1998). Fructans interact strongly with model membranes. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1375, 36-42.

Demirkesen I., Mert B., Summu G., Sahin S. (2008). Rheological properties of gluten-free bread formulations. *Journal of Food Engineering*, 96(2010), 295-303.

Consejo Regulador del Tequila (CRT). 2009. Anuario estadístico de producción del sistema agave-tequila. Guadalajara, Jalisco México.

Eduardo, D., Rua, A. C., Guzmán, L., Nanfita, G., & Barrera, S. (2008). Celiaquía, una enfermedad paradigmática. *Comunicaciones Breves* 106(2), 2006–2009.

Garcia, M. 2002. Distribution of Agave (Agavaceae) in Mexico. *Cactus and Succulent Journal* 4: 177-188.

Gallagher, E., Gormley, T., Arendt, E. 2003. Crust and crumb characteristics of gluten free breads. *Journal of Food Engineering*. 56:153–161.

Gallagher, E., Gormley, T., Arendt, E. 2004. Recent advances in the formulation of gluten-free cereal-based products. *Food Science y Technology*. 15:143–152.

Global Trends. (2015). Industria del pan vale US461000 millones. 2017, de Global Trends Sitio web: <http://globaltrends.cmi.co/industria-del-pan-vale-us461000-millones/>

Gluten free bakery. (2013). La panadería sin gluten. 2017, de The gluten-free bakery disponible en: <http://la-panaderia-sin-gluten.blogspot.mx/2013/03/goma-xantana-y-goma-guar.html>

Gutiérrez, D. y Villanueva, O. (2003). La información al consumidor en los productos dietéticos. Una aportación a la Seguridad Alimentaria. España, Díaz de Santos, pp. 175, 217.

Hadjiandreou Emmanuel. (2016). *Como Elaborar Pan* (2ª ed.) Barcelona. Acanto S.A.

Hager A., Arendt K. (2012). Influence of hydroxypropylmethylcellulose (HPMC), xantana gum and their combination on loaf specific volumen, crumb hardness and crumb grain characteristics of gluten-free breads based on rice, maize, teff and buckwheat. *Food Hydrocolloids*, 32(2013), 195-203.

Hejrani, T., Sheikholeslami, Z., Mortazavi, A., & Davoodi, M. G. (2015). The properties of part baked frozen bread with guar and xanthan gums. *Food Hydrocolloids*, 71, 252–257.

Hallberg, L. M. y Chinachoti, P. (2002). A Fresh perspective on staling: the significance of starch recrystallization on the firming of bread. *Journal of Food Science*, 67, 1092-1096

Hernández Carranza P., Jiménez Munguía M.T. (2010). Propiedades funcionales y aplicaciones de los fructo-oligosacaridos. *Temas Selectos de la Ingeniería en Alimentos*, 4, 1-8.

Hernández O., Jiménez M., Pena S. (2017). Una enfermedad silenciosa. 2017, de Celiacos de México A.C disponible en: <http://www.celiacosdemexico.org.mx/enfermedad-celiaca>

Interempresas (2015). La importancia de la harina en la producción de pan (2017). De Interempresas. Net disponible en: <http://www.interempresas.net/Alimentaria/Articulos/132722-La-importancia-de-la-harina-en-la-produccion-de-pan.html>

Jubete L., Auty M., Arendt E. (2009) Baking properties and microstructure of pseudocereal flours in gluten-free bread formulations. *Ear Food Res Technol*, 230:437-445.

Konica Minolta. (2014). Entendiendo el espacio de color CIELAB. 2017, de Konica Minolta Sensing Americas disponible en: <http://sensing.konicaminolta.com.mx/2014/09/entendiendo-el-espacio-de-color-cie-lab/>

Lambrecht Marlies A., Deleu Lomme J., Rombouts Ine, Delcour Jan A. Heat-induced network formation between proteins of different sources in model systems, wheat-based noodles and pound cakes. *Food Hydrocolloids*. 79:352-370.

Lassoud N., Perrine B., Guy Della V., Decaux M., Reguerre A. (2007). Granulometry of Bread Crumb grain: contributions of 2D and 3D image analysis at different scale. *Food Research International*.40:1087-1097.

Lazariduo, 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*. 79:1033-1047.

López A. Proyecto de tesis de taller de reología y textura de alimentos LAPRYFAL, 2017

López Francisco. (2014). Pan de molde sin gluten. 2017, de Feliz sin gluten disponible en: <http://www.felizsingluten.com/pan-de-molde-sin-gluten/>

Martínez Padilla Patricia (2015). Guía de uso de Reometro Anton Paar. LAPRYFAL

Mesas, J. M., y Alegre, T. M. (2002). El pan y su proceso de elaboración. *Cienc. Technol. Aliment*, 3(5), 307313.

Moore M., Schober T., Dockery P., Arendt E. (2004) Textural comparisons of gluten-free and wheat-based doughs batters, and breads. *Cereal Chems.* 81(5). 567-575.

Montañez-Soto, José; Venegas-González, José; Vivar-Vera, María; Ramos-Ramírez, E. (2011). Extracción, caracterización y cuantificación de los fructanos contenidos en la cabeza y en las hojas del agave *tequilana weber* azul. *Bioagro*, 23(3), 199–206.

Mozo, H. M. (2015). Desarrollo de una formulación para elaborar pan de caja libre de gluten. Tesis de ingeniería en alimentos. Universidad Nacional Autónoma de México.

NMX-F-007-1982. Alimento para humanos. harina de trigo.

NMX-F-159-S-1983. “Alimentos. pan blanco de caja “

NMX-F-516-1992. Alimentos. productos de panificación. clasificación y definiciones

Odar Renato (2008). Hojuelas de papa como oportunidad de negocios. 2017 de La página de la industria alimentaria disponible en: <http://industrias-alimentarias.blogspot.mx/2008/02/hojuelas-de-papa.html>

Olesten, M., Gudmond-Hoyer, E. (2000). Efficacy, safety and tolerability of oligofructosaccharides in the treatment of irritable bowel syndrome. *American Journal of Clinical Nutrition*, 72, 1570-1575.

Praznik, W., Cieslik, E., & López, M. G. (2002). Composition of nutritional components in *Agave tequilana* Weber var. Azul. *Seminar on Inulin*, 9, 18-19.

Pérez, A., Carrera Sánchez, C., Rodríguez Patino, J., Rubiolo, A., y Santiago, L. (2010). Milk whey proteins and xanthan gum interactions in solution and at the air–water interface: *A rheokinetic study*. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 81, 50-57.

Qiang, X., Yong L., C., & Qian B., W. (2009). Health benefit application of functional oligosaccharides. *Carbohydrate Polymers*, 77, 435-441.

Quaglia, G. (1991). *Ciencia y Tecnología de la Panificación*. España: Acribia.

QuimiNet. (2011) Como se fabrica el almidón de papa. 2017. De QuimiNet.com disponible en: <https://www.quiminet.com/articulos/como-se-fabrica-el-almidon-de-papa-60565.htm>

Rezentti S., Dal Bello F., Arendt E. (2007). Microstructure, fundamental rheology and baking characteristics of batters and breads from different gluten-free treated with a microbial transglutaminase. *Cereal Science*, 48, 33-45.

Roberfroid, M. (2007). Prebiotics: the concept revisited. *The Journal of Nutrition*, 137, 830S-837S.

Rodriguez Furlán, L., Aldrete Herrera, P., Pérez Padilla, A., Ortiz Basurto, R., y Campderrós, M. (2014). Assessment of agave fructans as lyoprotectants of bovine plasma proteins concentrated by ultrafiltration. *Food Research International*, 56, 146–158.

Rózylo, R., Dziki, D., Gawlik-Dziki, U., Biernacka, B., Wójcik, M., y Ziemichód, A. (2017). Physical and antioxidant properties of gluten-free bread enriched with carob fibre. *International Agrophysics*, 31(3), 411-418.

Sarkar, N. & Walker, L. (1995). Hydration-dehydration properties of methylcellulose and hydroxypropylmethylcellulose. *Carbohydrate Polymers*, 27, 177-185.

Scanlon M.G., Zghal M.C (2001). Bread properties and crumb structure. *Food Research International*, 34:841-864

Schuppan, D. (2000). Current concepts of celiac disease pathogenesis. 2017 *Gastroenterology* 119: 234-242.  
[http://wwwuser.cnb.csic.es/~fotonica/Photonic\\_en/Review/analisis.htm](http://wwwuser.cnb.csic.es/~fotonica/Photonic_en/Review/analisis.htm)

Serrano A. (1999). Análisis de imagen en biología y medicina. 2017, de Dio Photonic disponible en:  
[http://wwwuser.cnb.csic.es/~fotonica/Photonic\\_en/Review/analisis.htm](http://wwwuser.cnb.csic.es/~fotonica/Photonic_en/Review/analisis.htm)

Sosa Herrera M.G., Delgado Reyes V. A (2016). Propiedades funcionales y aplicaciones tecnológicas de fructanos. *Alimentos Funcionales de Hoy*, 97-111

Storck C., Zavareze E., Gularte M., Elias M., Rosell C., Dias A. (2010). Protein enrichment and its effects on gluten-free bread characteristics. *Food Science and Technology*, 53(2013), 340–354

Tejero Francisco (2016). La sal en panificación. 2017. De Asesoría Técnica en Panificación disponible en: <http://www.franciscotejero.com/tecnicas/la-sal-en-panificacion/>

Torbica, A., Hadnadev, M., & Dapčević, T. (2010). Rheological, textural and sensory properties of gluten-free bread formulations based on rice and buckwheat flour. *Food Hydrocolloids*, 24(6–7), 626–632.

Toriz, G., Delgado, E., y Zúñiga, V. (2007). A proposed chemical structure for fructans from blue agave plant (Tequilana Weber var. azul). *e-Gnosis*, (5).

Vereyken, I., van Kuik, J., Evers, T., Rijken, P., y de Kruijff, B. (2003). Structural Requirements of the Fructan-Lipid Interaction. *Biophysical Journal*, 84, 3147–3154.

Wilderjans, E., Pareyt, B., Goesaert, H., Brijs, K., & Delcour, J. A. (2008). The role of gluten in a pound cake system: A model approach based on gluten-starch blends. *Food Chemistry*, 110(4), 909-915.

Witczak, M., Juszcak, L., Ziobro, R., & Korus, J. (2012). Influence of modified starches on properties of gluten-free dough and bread. Part II: Quality and staling of gluten-free bread. *Food Hydrocolloids*, 29(1), 68–74.

Ziobro, R., Witczak, T., Juszcak, L., & Korus, J. (2013). Supplementation of gluten-free bread with non-gluten proteins. Effect on dough rheological properties and bread characteristic. *Food Hydrocolloids*, 32(2), 213–220.