



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTILÁN**

EFFECTO DE FRUCTANOS Y JARABE DE AGAVE
EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y TEXTURALES
DE PAN BLANCO DE CAJA Y REOLÓGICAS DE
LA MASA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA EN ALIMENTOS

PRESENTA:
ALEJANDRA LÓPEZ LÓPEZ

ASESORAS:
DRA. MARÍA GUADALUPE SOSA HERRERA
IBQ NORMA BEATRIZ CASAS ALENCÁSTER



Universidad Nacional
Autónoma de México



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
AVANZADA 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 CORTÉS ROMERO
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

Efecto de fructanos y jarabe de agave en las propiedades físicas y texturales de pan blanco de caja y reológicas de la masa.

Que presenta la pasante: Alejandra López López
Con número de cuenta: 311730870 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 12 de Junio de 2019.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dra. Laura Patricia Martínez Padilla	
VOCAL	I.A. Miriam Edith Fuentes Romero	
SECRETARIO	Dra. María Guadalupe Sosa Herrera	
1er. SUPLENTE	I.A. Verónica Romero Arreola	
2do. SUPLENTE	Dr. Martín Ramón Porras Godínez	

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

LMCF/javg

Dedicatorias y agradecimientos

A Dios.

Por nunca dejarme sola en cada paso que doy, por brindarme toda la paciencia y fuerza que siempre necesite y por cada bendición y persona que me has dado en la vida.

A mi mamá Norma.

Por escucharme, motivarme, aconsejarme y desvelarte conmigo siempre, permitiéndome llegar hasta donde estoy y siempre con una sonrisa en mi rostro, pero sobre todo gracias por tu amor y por la vida que me has dado.

A mi papá Luis.

Por las anécdotas, los ejemplos y consejos que en todo momento me compartes y que me han ayudado y me han permitido ser una persona de bien, pero más que nada, gracias por tu amor y cuidados.

A Luis y Alice.

Por la complicidad, las risas, los momentos y cosas que me han dado, cada uno me ha enseñado lo que es el compromiso y el carácter, y que no hay límites para cumplir lo que uno se propone, gracias por nunca dejarme sola y tengan por seguro que nunca los dejaré solos.

A mis sobrinos, Javi y Ram.

Gracias por enseñarme tanto desde otra perspectiva, espero vean en mí un ejemplo a seguir.

Es un privilegio ser su hija, hermana, tía y madrina y nunca me bastará la vida para agradecerles por todo.

A Ceci y Adrián.

Simplemente por ser ustedes, porque a pesar de tener caminos diferentes siguen en mi vida con su apoyo incondicional, aún después de tantos años.

A Rene.

Estuviste presente en esta pequeña gran aventura. Fuiste mi catador personal, mi soporte, mi motivación, mi mano derecha, mi compañero de clases, pero sobretodo mi mejor amigo. Este logro también es por ti y para ti.

A mis asesores.

IBQ Norma Beatriz Casas Alencáster e IBQ José Jaime Flores Minutti por su apoyo y enseñanzas. Y especialmente a la Dra. María Guadalupe Sosa Herrera por no dejarme sola, por su gran apoyo, paciencia y guía a lo largo de este proceso.

A mis amigos de la universidad.

Con los que compartí buenos y estresantes momentos, dentro y fuera de los salones, quienes nos apoyamos mutuamente, que se convierten en amigos de vida y en futuros colegas.

Finalmente, a mis sinodales, mis maestros y a la UNAM, por haber marcado cada etapa de mi camino universitario, y siempre estar presentes para asesorías, dudas y enseñanzas.

El éxito debe medirse no por la posición a que una persona ha llegado,
sino por su esfuerzo por triunfar.

Booker T. Washington

ÍNDICE

	PÁGINA
Índice de cuadros	i
Índice de figuras	ii
Resumen	iii
Introducción	iv
Capítulo I. Antecedentes	1
1.1. Pan blanco de caja	2
1.1.1. Formulaciones	2
1.1.2. Función de los ingredientes	3
1.1.3. Descripción del proceso	15
1.1.4. Propiedades determinantes de la calidad en pan blanco de caja	22
1.2. Fructanos	31
1.2.1. Fuentes vegetales para la obtención de fructanos	32
1.2.2. Clasificación de los fructanos	32
1.2.3. Fructanos de agave	34
1.3. Estudios de panes enriquecidos con fructanos tipo inulina	36
1.4. Jarabe de agave	38
1.4.1. Proceso de elaboración y tipos de jarabe de agave	39
1.4.2. Beneficios en la salud	40
Capítulo II. Metodología de la investigación	42
2.1. Objetivos	42
2.2. Materiales	43
2.3. Elaboración del pan blanco de caja	43
2.4. Métodos	47
2.4.1. Viscoelasticidad de la masa	47
2.4.2. Volumen específico del pan	48
2.4.3. Color en corteza y miga	48
2.4.4. Análisis de imagen en miga de pan	48
2.4.5. Humedad	49
2.4.6. Pérdida de peso del pan	50
2.4.7. Análisis de perfil de textura	50

2.4.8. Envejecimiento del pan	50
2.5. Análisis estadístico	51
Capítulo III. Resultados y análisis	52
3.1. Efecto del jarabe orgánico de agave (JOA) con diferente grado de hidrólisis	56
3.2. Efecto de la concentración de los fructanos de agave (FA)	63
3.3. Viscoelasticidad de la masa	70
3.4. Envejecimiento del pan blanco de caja	72
Conclusiones	76
Referencias	78

ÍNDICE DE CUADROS

	PÁGINA	
Cuadro 1	Formulaciones de pan blanco de caja	3
Cuadro 2	Problemas debidos a los defectos de oxidación	14
Cuadro 3	Problemas y causas que se presentan en panificación	23
Cuadro 4	Parámetros del análisis de perfil de textura	29
Cuadro 5	Aplicaciones de la inulina de achicoria en alimentos	37
Cuadro 6	Formulaciones empleadas	44
Cuadro 7	Pan comercial y pan control	52
Cuadro 8	Descripción cualitativa y humedad de pan comercial y pan control	53
Cuadro 9	Análisis de imagen en pan comercial y pan control	54
Cuadro 10	Color de corteza y miga en pan comercial y pan control	55
Cuadro 11	Parámetros texturales en pan comercial y pan control	56
Cuadro 12	Panes adicionados con JOA con diferente grado de hidrólisis	57
Cuadro 13	Efecto del grado de hidrólisis del JOA en la apariencia de los panes	57
Cuadro 14	Efecto del grado de hidrólisis del JOA en las características de la miga	59
Cuadro 15	Efecto del grado de hidrólisis del JOA en propiedades físicas del pan	60
Cuadro 16	Efecto del grado de hidrólisis del JOA en el color de corteza y miga	61
Cuadro 17	Efecto del grado de hidrólisis del JOA en el TPA a 20% de compresión	62
Cuadro 18	Efecto del grado de hidrólisis del JOA en el TPA a 40% de compresión	63
Cuadro 19	Panes adicionados con diferentes concentraciones de FA	64
Cuadro 20	Efecto de la concentración de FA en la apariencia de los panes	64
Cuadro 21	Efecto de la concentración de FA en las características de la miga	66
Cuadro 22	Efecto de la concentración de FA en las propiedades físicas del pan	67
Cuadro 23	Efecto de la concentración de FA en el color de corteza y miga	68
Cuadro 24	Efecto de la concentración de FA en el TPA a 20% de compresión	69
Cuadro 25	Efecto de la concentración de FA en el TPA a 40% de compresión	70

ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 1 Representación esquemática de las proteínas en el desarrollo del gluten	5
Figura 2 Tres etapas de desarrollo del gluten	5
Figura 3 Etapas de la fermentación	11
Figura 4 Esponja obtenida en el Método esponja	16
Figura 5 Espacio de color L^*a*b	26
Figura 6 Curva típica de perfil de textura del pan	30
Figura 7 Fracciones del almidón en el envejecimiento del pan	31
Figura 8 Estructura de los fructanos	33
Figura 9 Estructura de fructanos de Agave	35
Figura 10 Diagrama de proceso para la elaboración del pan blanco de caja	45
Figura 11 Pruebas realizadas en los diferentes materiales	47
Figura 12 Clasificación de poros	54
Figura 13 Perfil de textura al 20% de deformación con respecto a su altura	55
Figura 14 Efecto del grado de hidrólisis del JOA en la clasificación de poros	59
Figura 15 Efecto del grado de hidrólisis del JOA en el TPA al 20% de deformación con respecto a su altura	62
Figura 16 Efecto de la concentración de FA en la clasificación de poros	65
Figura 17 Efecto de la concentración de FA en el TPA al 20% de deformación con respecto a su altura	69
Figura 18 Barrido de deformación	71
Figura 19 Barrido de frecuencia	72
Figura 20 Pan envejecido	72
Figura 21 Envejecimiento en volumen específico	74
Figura 22 Envejecimiento en humedad	74
Figura 23 Envejecimiento en elasticidad total	75
Figura 24 Envejecimiento en cohesividad	75
Figura 25 Envejecimiento en dureza	75

RESUMEN

El pan blanco de caja es el producto de la cocción por horneado de masa fermentada, elaborada con harina de trigo, agua potable, sal, levadura y otros ingredientes y aditivos opcionales, con corteza dura, miga blanda, suave y blanca y forma de paralelepípedo, pudiendo estar rebanado o no, conocido como pan de caja por hornearse en una caja o molde. Con la finalidad de satisfacer las demandas actuales de los consumidores se busca adicionar nuevos ingredientes que proporcionen beneficios para la salud sin alterar las propiedades reológicas de la masa y físicas y texturales del producto horneado. En este trabajo se sustituyó parcialmente el azúcar de la formulación comercial por jarabe de agave total y parcialmente hidrolizado (50 y 88% de hidrólisis), adicionando además fructanos de agave como fibra prebiótica. En la masa se evaluaron propiedades viscoelásticas y en los panes, volumen específico, color en corteza y miga, humedad, pérdida de peso, perfil de textura, análisis de las características de miga (número de poros, tamaño de poros, fineza, fracción vacía, uniformidad) y envejecimiento. Mediante la sustitución del 3.58% del azúcar en la formulación base por 2, 3 y 5% de jarabe de agave totalmente hidrolizado "JOA" en la fermentación de masas madre, se determinó que la concentración a sustituir sería 2% para cada jarabe de agave (JOA, JOA 88 y JOA 50), en donde el jarabe de agave totalmente hidrolizado presentó las propiedades buscadas en el pan de caja en comparación con los jarabes de agave parcialmente hidrolizados, siendo así el jarabe empleado para el desarrollo de panes con diferentes concentraciones de fructanos de agave "FA" (2, 3, 4 y 5%), donde las propiedades evaluadas no presentaron diferencias y demostraron que la máxima concentración es 4%, pero en cuanto percepción visual 4 y 5% de FA no dan una apariencia que guste al consumidor.

INTRODUCCIÓN

En la industria de los alimentos el desarrollo de productos busca mejoras que sean útiles para el alimento tanto en sus propiedades físicas, químicas, sensoriales, reológicas y texturales, como para el consumidor, tal es el caso de un menor aporte calórico, mayor aporte en nutrimentos o algún beneficio extra para mejorar la salud. Uno de los productos de mayor consumo en nuestro país es el pan blanco, el cual desde la antigüedad ha sido uno de los principales sustentos del hombre, por lo que esta industria se encuentra en una fase de expansión y crecimiento (Asociación Nacional de Proveedores Profesionales de la Industria del Pan, Repostería y Similares A. C., 2016).

El consumo de pan blanco en México representa entre el 70 y 75% del consumo total de pan, dentro de este grupo destaca el pan blanco de caja o molde, a causa de su versatilidad, ya que puede usarse para acompañar casi cualquier alimento, como postre agregándole algún ingrediente de sabor dulce o como alimento principal en tipo sándwich u otros productos. El pan blanco de caja es uno de los numerosos productos horneados que son elaborados con harina de trigo. El gluten es el complejo formador de estructura en el trigo, responsable de las propiedades viscoelásticas necesarias para producir productos horneados de buena calidad. Las interacciones entre las gliadinas y las gluteninas a través de enlaces covalentes y no covalentes para formar los complejos de gluten, por medio del trabajo mecánico (mezclado) y la hidratación desarrollan una masa viscoelástica con la habilidad de resistir el trabajo mecánico y retener el gas durante la fermentación y el horneado (Mariotti *et al.*, 2009).

Los fructanos de agave son oligosacáridos de fructosa, presentan en su estructura molecular una mezcla diversa de fructanos, que incluye enlaces β -2,1 y β -2,6; no

son digeribles por el tracto digestivo humano, por lo que se consideran fibra prebiótica, proporcionando así diferentes propiedades y aplicaciones en la industria alimenticia. Su grado de polimerización depende del proceso de obtención y la edad de las plantas, los fructanos obtenidos de plantas más jóvenes presentan mayor potencial como prebióticos debido al bajo peso molecular (Arrizon *et al.*, 2010).

Por otro lado, el jarabe de agave azul, según la NMX-FF-110-SCFI-2008 es la sustancia dulce natural producida por la hidrólisis de los oligosacáridos (fructanos) del agave y no debe contener aditivos alimentarios, almidones, melazas, glucosa, dextrinas, fructosa u azúcares de otro origen, su poder endulzante es 30% mayor que el azúcar comercial, un bajo índice glucémico, capacidad antioxidante y propiedades antibacterianas. La hidrólisis es el procedimiento químico, térmico, enzimático o la combinación de los anteriores, utilizados para hidrolizar los carbohidratos presentes en el agave, por lo tanto, en un jarabe totalmente hidrolizado el contenido de fructosa en base seca estará por arriba del 90% y podrá tener además otros azúcares como glucosa y sacarosa, mientras que los jarabes parcialmente hidrolizados tendrán un menor contenido de fructosa y otros azúcares y mayor de fructanos, por lo cual las propiedades funcionales que le pueden proporcionar al alimento serán diferentes dependiendo del grado de hidrólisis (Mieles Campos Azules, 2014).

Los fructanos tipo inulina son los que se han estudiado en mayor medida, y usados en la industria, éstos tienen una estrecha semejanza con los fructanos de agave pero su diferencia radica en que los primeros presentan una estructura lineal con enlaces β -2,1 entre las unidades de fructosa y los segundos son una mezcla de inulina, levanos y neoserias, proporcionando a los alimentos distintas propiedades (López Mujica y Urias Silvas, 2007). Mientras que los fructanos tipo inulina de diferentes fuentes vegetales han sido ampliamente aplicados en alimentos por sus propiedades prebióticas y funcionales, los de agave han sido menos estudiados en este sentido. Estudios realizados con fructanos tipo inulina en pan, demuestran un aumento en el tiempo de desarrollo y estabilidad de la masa, lo que provoca

fortalecimiento y disminución en la expansión de la misma, además disminuye la elasticidad de la masa sin afectar su extensibilidad, y en cuanto al pan se presenta una humedad variable, una disminución en su volumen, un incremento en la dureza de la corteza y oscurecimiento de la misma en comparación con el pan convencional (Rosell *et al.*, 2010; Brasil *et al.*, 2011; Hager *et al.*, 2011).

Por lo antes comentado, en este estudio se analizaron las propiedades proporcionadas por los fructanos de agave en la masa y en el pan blanco de caja, ya que debido a su alta demanda la población desea obtener beneficios para la salud adicionales, como es un mayor aporte de fibra puesto que México está por debajo de las recomendaciones de consumo (Órgano Informativo del Instituto de Nutrición y Salud Kellogg's sobre la Relación entre la Nutrición y la Salud, 2009), ya que la recomendación diaria de fibra dietética total va desde los 14 g/día hasta los 35 g/día dependiendo del género y grupo de edad (Bourges *et al.*, 2009), siendo así la recomendación diaria promedio para adultos de 25 g/día (Joint FAO/WHO food standards programme, 2007). Se ha demostrado además que los fructanos y el jarabe de agave proporcionan a los alimentos fibra con propiedades prebióticas y bajo contenido calórico, respectivamente, por lo que fue necesario desarrollar formulaciones donde se adicionaron dichos ingredientes, sin que las propiedades reológicas, físicas y texturales presenten cambios indeseables en la masa y el pan blanco de caja.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

El pan, en su forma más simple, es el producto perecedero resultado de la cocción de la masa obtenida por la mezcla de harina de trigo, sal comestible y agua potable y fermentada por microorganismos como el *Saccharomyces Cerevisiae* (Calaveras, 2004). Uno de los productos con mayor consumo y representación en México es el pan blanco, el cual desde la antigüedad ha sido uno de los principales sustentos del hombre, el consumo per cápita de pan es de 34 kg, del cual el pan blanco representa del 70 y 75%, dentro de este grupo destaca el pan blanco de caja debido a la versatilidad de su forma de consumo, ya que puede usarse para acompañar casi cualquier alimento; como postre agregándole algún tipo de ingrediente de sabor dulce o como alimento principal (Asociación Nacional de Proveedores Profesionales de la Industria del Pan, Repostería y Similares A. C., 2016).

Con base en la NMX-F-516-1992 los productos de panificación se clasifican de acuerdo con su composición en ocho tipos, los primeros tres son cocidos por horneado de la masa fermentada, estos mismos junto con el tipo IV (pan dulce) son elaborados con agua potable, sal yodatada, azúcares, levadura (opcional en el pan dulce) e ingredientes opcionales y aditivos alimentarios permitidos por la Secretaría de Salud. Lo que los diferencia es el tipo de harina a usar, ya que, en el pan blanco, bolillo y telera (tipo I) y en los productos de bollería (tipo III) se ocupa harina de trigo, en el pan de harinas integrales (tipo II) se utiliza harina de cereales y/o leguminosas y otro cereal, y en el pan dulce (tipo IV) es harina en cualquiera de sus tipos. Otra diferencia es el empleo de grasas comestibles en panes de harinas integrales y productos de bollería y opcionalmente en el pan dulce, en el caso de los cuatro tipos restantes: galletas (tipo V), pastas secas (tipo VI), pastel (tipo VII) y o tarta (tipo VIII) la manera de elaborarlos es más específica y los ingredientes a usar pueden o no ser los mismos y/o pueden ser más, como el huevo.

1.1. Pan blanco de caja

El pan blanco de caja se define como el producto alimenticio elaborado mediante la cocción por horneado de la masa fermentada, elaborada con la harina de trigo, agua potable, sal yodada, levadura, otros ingredientes opcionales y/o aditivos permitidos para alimentos con sabor agradable, característico y nada ácido, cuyas características son presentar la forma de un paralelepípedo simétrico sin extremos bajos ni cuadrados, pudiendo estar rebanado o no, la miga debe ser de color blanco brillante, con un matiz uniforme, sin vetas, manchas ni coloraciones, con celdillas pequeñas de tamaño uniforme y con forma ligeramente ovalada y sin agujeros y la corteza debe ser delgada, suave, fácil de romper, con un color amarillo rojizo lo más uniforme posible, sin manchas ni vetas y con cierto brillo; proporcionando así una textura suave, firme y no desmoronable ni pegajosa, además de no ser masuda y/o seca (dichas características son medidas de manera cualitativa y no cuantitativa) y con una humedad entre 30 – 38% (NMX-F-159-S-1983).

Es uno de los numerosos productos horneados que son elaborados con harina, la cual al combinarse con el líquido produce una masa suave o blanda y esponjada, puesto que es elaborado en un molde o caja recibe dicho nombre. El pan, como muchos materiales celulares, se produce a través de procesos físicos aleatorios, por lo que su estructura es generalmente heterogénea, esta heterogeneidad incluye el ordenamiento no constante de las células, la variación en las propiedades de las paredes celulares y las imperfecciones aleatorias debido a la ausencia de paredes celulares que normalmente separarían las células adyacentes, ocasionando efectos significativos sobre las propiedades mecánicas (Zghal *et al.*, 2002).

1.1.1. Formulaciones. El pan blanco de caja se elabora con harina, líquido (agua y/o leche), agente fermentador (levadura) y sal; siendo éstos los cuatro ingredientes esenciales, y azúcar, huevo, grasa (aceite, margarina, mantequilla o manteca) y mejoradores, los cuales no son absolutamente necesarios, pero si incluidos en algunos casos. Debido a la variedad de ingredientes existen diversas formulaciones, algunas reportadas por diferentes investigadores se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Formulaciones de pan blanco de caja

Referencia	A	B	C	D	E
Ingredientes	%	%	%	%	%
Harina de trigo	53.50	55.07	56.50	57.50	55.88
Agua	35.00	33.04	35.59	34.50	33.53
Azúcar	2.90	3.58	3.39	2.70	4.47
Grasa	3.90	3.58	2.82	3.00	1.68
Leche en polvo	3.10*	1.10	-----	-----	-----
Levadura	0.70	1.65	0.85	1.00	2.24
Sal	0.90	0.88	0.85	1.00	1.40
Mejorante	-----	0.55	-----	-----	-----
Gluten	-----	0.55	-----	-----	-----
Propionato de calcio	-----	-----	-----	0.20	-----
Sorbato de potasio	-----	-----	-----	0.10	-----
Propionato de sodio	-----	-----	-----	-----	0.25
Emulsificante	-----	-----	-----	-----	0.56
TOTAL	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
* Leche líquida					

A (Passamai *et al.*, 2008), B (Cámara Nacional de la Industria de Panificación, 2016), C (Fikry *et al.*, 2013), D (Hallberg y Chinachoti, 2002) y E (Rios, 2003).

1.1.2. Función de los ingredientes. Para la obtención de un pan blanco de caja es necesario que la adición de los ingredientes se base en la funcionalidad de éstos.

Harina: La harina de trigo representa la parte más importante en la composición de la masa y su calidad determinará a la vez la calidad del producto horneado, produce una miga y textura superior y volumen máximo, es la encargada de proporcionar los nutrientes necesarios para la levadura. Está compuesta por almidón (67 – 72%), humedad (15%), proteínas (9 – 12%), azúcares (2 – 3%), grasas (1 – 2%), cenizas (0.3 – 0.5%), vitaminas (0.3%) y enzimas amilásicas (Barriga, 2003), de dichos componentes los que tienen una mayor influencia en el proceso de elaboración del pan blanco de caja son:

- Almidón. Es un polímero de moléculas de glucosa que están unidas entre sí por enlaces glucosídicos, el cual tiene la capacidad de absorción y de gelatinización, en

donde la primera se refiere a la absorción del agua durante el amasado, aproximadamente dos veces su peso en agua, y la segunda se basa en el hinchamiento de los gránulos de almidón al aumentar la temperatura de la masa en presencia de agua, la cual tiene lugar entre los 55 – 75 °C, durante ella la masa se transforma en miga, este proceso finaliza durante la cocción al llegar a una temperatura interna de 90 °C. Los gránulos de almidón en la masa del pan están atrapados entre las capas de gluten que rodea las células de gas, en el pan horneado estos gránulos se gelatinizan y proporcionan rigidez a la miga (Barriga, 2003; Charley, 1997).

El almidón en el momento de la fermentación no es atacado directamente por la levadura, ya que necesita actividad enzimática previa que lo degrade a maltosa y dextrinas, dicha actividad enzimática la proporcionan las α y β amilasas contenidas en la harina. Asimismo es un elemento determinante en la conservación del pan, ya que la resequedad del mismo se le atribuye al fenómeno de la retrodegradación del almidón (Barriga, 2003).

- Proteínas. Influyen de manera directa en las propiedades de la masa y en el producto horneado determinan su volumen y estructura. Las proteínas de la harina se dividen en solubles en agua o soluciones salinas las cuales no forman masa y sirven de alimento a la levadura y son la albumina (15%), la globulina (6.5%) y péptidos (0.5), e insolubles en agua las cuales, si forman masa, en esta categoría entran la gluteína (45%) y la gliadina (33%), conocidas como proteínas del gluten.

Al contacto con el agua y con la acción mecánica del amasado son responsables de la formación de una masa elástica (cuando se estira se recupera, en parte al momento y en parte lentamente) y viscosa (gradualmente fluirá y se adaptará a los recipientes de cualquier forma), cuyo comportamiento viscoelástico se debe a la formación de una malla más o menos rígida y extensible cuya formación suele llamarse desarrollo del gluten. La gliadina presente en menor cantidad es de bajo

peso molecular, mínima elasticidad, extensible y es la encargada de ligar la masa, mientras que la gluteína de alto peso molecular, elástica y baja extensibilidad, es la encargada de dar la solidez y consistencia al gluten (Calaveras, 2004). La Figura 1 es una representación esquemática de las proteínas gliadinas y gluteninas, así como su combinación responsable en el desarrollo del gluten, mientras que en la Figura 2 se muestra la apariencia de la masa en tres diferentes etapas del desarrollo del gluten: harina inmediatamente después de humedecerla (izquierda); gluten incompletamente desarrollado (centro); gluten desarrollado completamente donde la superficie de la masa es lisa (derecha).

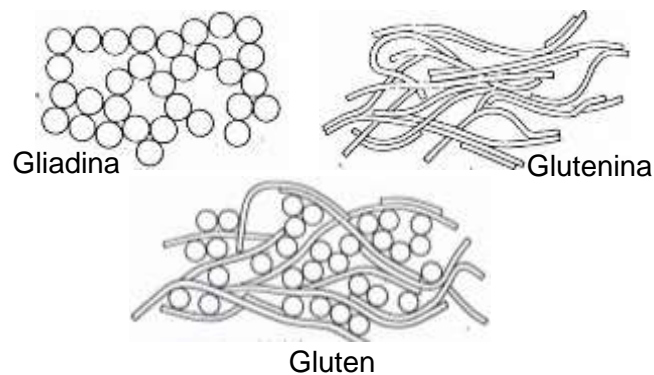


Figura 1. Representación esquemática de las proteínas en el desarrollo del gluten (Quaglia, 1991).



Figura 2. Etapas de desarrollo del gluten (Charley, 1997).

Una masa con el gluten bien desarrollado, presentará las propiedades necesarias para retener el gas carbónico producido por la levadura, cediendo a la vez el impulso del mismo gas, gracias a las características de elasticidad, tenacidad y

extensibilidad que le confieren las proteínas que lo constituyen, entre más débil sea el gluten menos tensa puede permanecer la masa por lo que para la buena panificación se necesitan formar un 24 o 26% de gluten (Calaveras, 2004; Barriga, 2003; Charley, 1997).

El azúcar y las grasas limitan la cantidad de gluten que se puede desarrollar en la harina, el azúcar por ser más afín al agua que la harina, y la grasa debido a que cubre las partículas de la harina evitando su contacto con el agua.

- Azúcares. La cantidad de carbohidratos que existen en la harina (sin contar almidón y azúcares simples) es mínima, los dos más importantes son la maltosa y la sacarosa y ninguno es fermentable, pero las enzimas los hidrolizan para llegar a azúcares elementales que es sobre los que tiene acceso la levadura, en la maltosa actúa la maltasa originando dos glucosas y en la sacarosa actúa la invertasa originando glucosa y fructosa, esto es posible gracias a la mezcla harina + agua. Otro azúcar presente es la dextrina la cual se encuentra en muy pequeñas proporciones (0.2 – 0.3%) y es la responsable del brillo de la corteza.

- Enzimas. Actúan como catalizadores, es decir, facilitan y aceleran reacciones que sin su participación serían más lentas, la fermentación es el resultado de la acción enzimática. Las enzimas más importantes son las diatásicas (α -amilasa, β -amilasa y glucosidasa) y su misión es degradar la gran cadena de almidón hasta llegar a azúcar simple. La α -amilasa es una enzima dextrinizante (endoamilasa) y tiene como función principal hidrolizar la macromolécula de almidón progresivamente, formando moléculas más pequeñas de distintas dimensiones principalmente dextrinas (azúcares simples) y maltosa (cadena lineal) atacando esta última y dando como resultado glucosa, son llamadas dextrinas porque favorecen la degradación de las β -amilasas, la β -amilasa actúa sobre los terminales de las cadenas no reductores (ya sean amilosa o amilopectina) rompiendo las cadenas de 2 en 2, para producir maltosas que servirán como alimento de las

levaduras, ayuda a regular la velocidad de fermentación y facilita el color al pan. La glucosidasa actúa en las ramificaciones, rompiendo enlaces de α -1:6 (Calaveras, 2004). Estas enzimas están naturalmente presentes en las harinas y se activan bajo determinadas condiciones de temperatura y humedad, pueden ser adicionadas a las masas cuando es necesario, generalmente se encuentran formando parte de los mejorantes, e hidrolizan los enlaces glucosídicos tanto de monosacáridos como de polisacáridos.

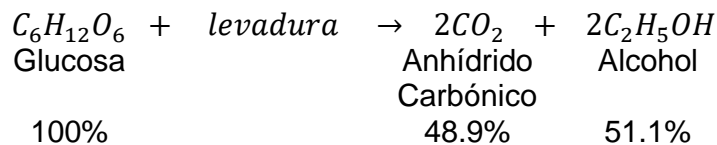
Agua: Permite que se realicen las diversas acciones diastáticas, la cantidad y calidad de las sustancias minerales disueltas en el agua tienen una notable influencia sobre la facilidad de trabajar la masa, sobre su aspecto y sobre la consistencia de los productos acabados, las sales disueltas que influyen en la fermentación son óxido de calcio, carbonato de calcio, sulfato de calcio, cloruro de magnesio, óxido de magnesio y bicarbonato de sodio, la consistencia de la masa influye en el volumen del pan y la textura de la miga (Quaglia, 1991).

El agua es esencial para la hidrólisis del almidón y de la sacarosa, al hidratar el almidón y la proteína de la harina se desarrolla la red tridimensional del gluten a medida que la masa se manipula; de ser mucha la cantidad de agua que se adiciona la masa requiere un mayor tiempo de amasado, es pegajosa, suave y se debilita quedando el pan aplanado. De ser poca la cantidad de agua adicionada, la masa se hace dura, resistente al estiramiento y se desarrolla mal en el horno. De igual manera ayuda en la gelatinización del almidón cuando se hornea la masa y el vapor contribuye a la expansión en el horno. La leche contiene un 87% de agua y al ser utilizada aumenta el valor alimenticio y retarda el endurecimiento del pan, por lo que es más utilizada que el agua. El líquido disuelve a la sal y el azúcar y ayuda a dispersar las células de levadura a través de la harina (Calaveras, 2004; Charley, 1997).

Azúcar: En el caso del pan blanco de caja el azúcar no se utiliza en grandes cantidades ya que de ser así proporcionaría sabor dulce y el pan blanco de caja se caracteriza por tener sabor neutral por lo que principalmente es adicionada para ser una fuente de azúcar fermentable, en ausencia de ésta la producción de bióxido de carbono se limita y retarda. Los azúcares permanecen en la masa durante el horneado ayudando al tostado de la corteza del pan y al sabor del producto final. Éstos se pueden dividir en fermentables y en no susceptibles de fermentación y son:

- 1) Azúcares presentes en la harina; cerca del 1% de éstos son capaces de fermentar.
- 2) Maltosa; derivado de la acción de la α -amilasa sobre el almidón presente en la harina; susceptible de fermentar, por lo tanto, la cantidad presente es de suma importancia.
- 3) Lactosa; azúcar no susceptible de fermentar procedente de la leche.
- 4) Azúcares añadidos permitidos: sacarosa, glucosa (o dextrosa) y maltosa.

Los azúcares fermentables son directamente la glucosa y la fructosa (dextrosa y levulosa), ya que la sacarosa se transforma en los dos azúcares que la constituyen mediante hidrólisis o por acción de la invertasa de la levadura y la maltosa se convierte en dos moléculas de glucosa o dextrosa por la acción de la maltasa. La levadura debe tener a su disposición la glucosa y la fructosa para producir anhídrido carbónico (Quaglia, 1991):



En la fermentación se forma anhídrido carbónico, el cual primero se disuelve en el agua hasta llegar a su saturación para luego permanecer libre y quedar retenido en la red tridimensional del gluten y así hacer crecer (aumentar) la masa, produciendo

además ácidos, sustancias volátiles y alcoholes que confieren el aroma y el sabor al producto.

Los azúcares añadidos a la masa, además 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 horneado como es el color de la superficie del pan debido a la reacción entre los azúcares y los aminoácidos (reacción de Maillard) y a la caramelización de los azúcares por el calor, el aroma (reacción de Maillard) y una mejor conservación del producto ya que permite una mejor retención de la humedad, manteniendo más tiempo su blandura inicial y retrasando el proceso de endurecimiento. Según el tipo y la cantidad de los azúcares se obtendrá un color moreno más o menos intenso, al adicionarse elevadas cantidades de azúcar (20 – 25%) el tiempo de amasado es más largo, debido a un mecanismo competitivo del agua entre el azúcar y las proteínas del gluten (Quaglia, 1991).

Grasa: La grasa en la panificación representa diferentes propiedades, dentro de las que destacan la lubricación; los productos de panificación son crujientes y suaves, ya que la grasa facilita cortezas suaves, finas y fáciles de tostar, una miga muy crujiente y seca romperá pronto pues no tiene características de lubricación, otra de sus propiedades aplica en el volumen del pan, favoreciendo un incremento del mismo de alrededor del 6%, ya que los poros en la miga son de mayor tamaño en comparación a un pan sin grasa. Las grasas también aportan propiedades emulsificantes, ya que se dispersan en el amasado en pequeñas cavidades, cuando más finas son estas cavidades, se producen panes más finos. En el pan de molde, además favorece un alveolado más uniforme y fino, aparte de estas propiedades le confieren al pan sabor, aumentan la flexibilidad durante más tiempo con lo que se conserva mejor, aumenta su valor nutritivo y su aporte calórico (Calaveras, 2004).

Agente fermentador: Es aquella sustancia que directa o indirectamente tiene un efecto de dilatación y aumento de volumen en las masas destinadas para producir productos horneados (Quaglia, 1991), es decir, se produce una fermentación, la cual dependiendo del agente fermentador puede ser de distintos tipos:

- 1) Fermentación química: la fermentación se realiza a base de sustancias químicas que producen anhídrido carbónico.
- 2) Fermentación biológica: se consigue la fermentación con levaduras.
- 3) Fermentación física (fermentación mecánica con espuma): se debe a la acción de la clara de huevo montada a punto de nieve que se incorpora en la masa.
- 4) Fermentación que se debe esencialmente a la evaporación y dilatación del agua emulsionada con grasas.

En el caso del pan blanco de caja la fermentación por la que se obtiene es la biológica, la cual atribuye la porosidad y el aumento de volumen del producto por el anhídrido carbónico producido por la levadura, por medio del calor o de otros medios físicos. La levadura comercial está conformada de células de cepas selectas del microorganismo *Saccharomyces Cerevisiae*, de forma redondeada, que en estado natural viven, se alimentan y se multiplican. El empleo de la levadura en panadería aumenta las cualidades nutritivas y digestivas del pan. Su empleo en panificación tiene tres efectos y el resultado obtenido en el producto horneado no se debe a uno solo, ya que, por ejemplo, el efecto de transformación de la masa y subida de la misma va unido a la hidratación del almidón:

- a) Transformación de la masa pasando de ser un cuerpo poco activo a ser un cuerpo fermentativo donde se desarrollan las reacciones químicas y fisicoquímicas más activas.
- b) Desarrollo de parte del aroma mediante la producción de subproductos derivados de los azúcares, siendo en su mayoría ácidos, alcoholes, aldehídos, éteres y

cetonas que durante el horneo forman una compleja gama de compuestos que imparten sabor y aromas típicos de panificación (Rios, 2003).

- c) Acción de subida de la masa donde las células de la levadura metabolizan azúcares fermentantes, bajo las condiciones anaeróbicas produciendo CO₂ (anhídrido carbónico) como producto de desecho, el cual es utilizado como leudante y alcohol etílico.

Las fuentes de azúcares para el desarrollo de las levaduras son: trealosa (formada por dos unidades de glucosa, azúcares que posee la propia levadura y se presenta en poca cantidad), azúcares libres (glucosa, fructosa), almidón, azúcares añadidos (sacarosa o jarabe de maíz). La levadura es capaz de fermentar cuatro azúcares: glucosa, fructosa, sacarosa y maltosa, fermentando en forma indirecta a la sacarosa y maltosa. La maltosa se fermenta después de agotarse el aporte de glucosa y fructosa, presentándose lentamente y proporcionando no sólo el bióxido de carbono que infla la masa, sino también sustancias que modifican la elasticidad, la adhesividad y las propiedades de flujo de la masa, contribuyendo al comportamiento de la misma (Charley, 1997).

La levadura *Saccharomyces cerevisiae* tiene una temperatura óptima de desarrollo de 28 °C, que es donde mayor cantidad de gas produce, muere por frío a -30 °C y por calor a 55 °C teniendo una paralización de actividad a los 4 °C. La fermentación presenta tres etapas (Figura 3):

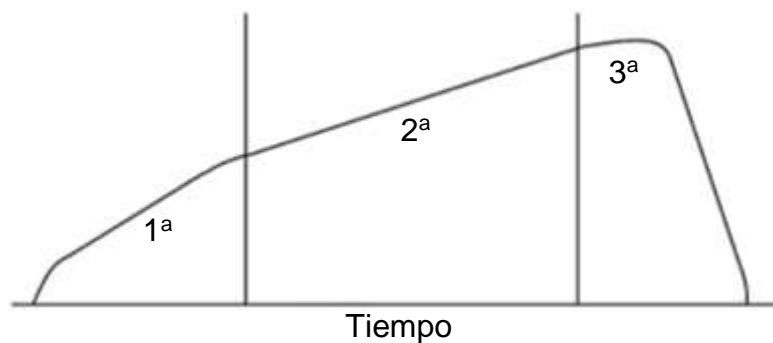


Figura 3. Etapas de la fermentación (Calaveras, 2004).

- 1) Inicio de consumo de los azúcares libres (glucosa/fructosa) existentes en la harina. Este proceso comienza con la amasadora desde el momento del contacto de la levadura con la harina.
- 2) Consumo de azúcares que se han producido por la degradación del almidón, más lento que en la etapa uno.
- 3) Última fermentación, se da en el horno hasta que la masa adquiere la temperatura de 55 °C, a la que mueren las levaduras. Es el último impulso de la masa, aumentando su volumen hasta que se cristaliza el almidón y se carameliza la corteza, formando la última estructura del pan. El CO₂ queda atrapado en la masa, y el alcohol producido se disipa casi totalmente con el calor del horno.

Sal: Su principal característica es saborizar la masa de pan. Por otra parte, actúa sobre la formación de la red tridimensional del gluten, ya que la gliadina tiene menor solubilidad en el agua con sal, lo que da lugar a la formación de una mayor cantidad de gluten, el cual tiene fibras cortas como consecuencia de las fuerzas de atracción electrostáticas que ocurren en la red tridimensional formada con la sal, se presenta rígido, confiriendo a la masa mayor compactación con respecto al gluten obtenido sin sal y como consecuencia de esto, también es posible una mejor hidratación de la masa, sin que se vuelva pegajosa siendo más fácil de manejar. Además, la sal por su propiedad antiséptica actúa también durante la fermentación, disminuyendo el desarrollo del anhídrido carbónico con una relativa disminución de la porosidad del producto final y retardando especialmente las fermentaciones secundarias de los microorganismos productores de ácidos tales como el ácido acético, butírico y láctico.

En el producto horneado favorece la coloración de la superficie del pan, dando a la corteza una coloración más viva, haciéndola más crujiente y confiriéndole un aroma más intenso. Respecto al pan sin sal y en cuanto a la duración y estado de conservación, la sal influye debido a su capacidad para absorber agua (higroscopicidad), en un pan conservado en ambiente seco, la sal reduce la cesión de humedad del producto al aire; retrasando que la corteza se seque y endurezca,

conservándolo en un ambiente húmedo, la sal tiende a absorber la humedad del aire introduciéndola en el producto, ejerciendo un efecto negativo sobre el tiempo de conservación. La falta de sal provoca masas pegajosas y blandas durante el amasado, lo que no ayuda a dar la firmeza al pan, ligado a fermentaciones muy rápidas con panes de excesivo volumen, corteza muy fina y descolorida, e insípidos (Quaglia, 1991).

Mejorantes. En la actualidad su aplicación es fundamental en la elaboración del pan y por lo tanto de éstos depende en buena medida el resultado final del producto, ya que la formación de la red tridimensional del gluten se deriva de la gliadina (responsable del volumen potencial del pan) y de la glutenina (reguladora del tiempo de amasado) unidas por enlaces químicos intermoleculares e intramoleculares, por lo que una justa proporción de ambas dan las condiciones ideales.

Son una mezcla de aditivos y coadyuvantes con el objetivo de retener gases en una masa fermentada. La constitución base de un mejorador es la compuesta por emulsificante, vitamina C (ácido ascórbico), enzimas, azúcares y antiaglutinantes. Otros posibles componentes son las grasas, gluten, estabilizantes, conservadores, harina de soya, harina de malta, entre otros. Se han comercializado dos tipos de mejorantes, en pasta y en polvo. En pasta están compuestos por manteca, dextrosa, ácido L-ascórbico, éter (acético, láctico, cítrico, tartárico, monoacetiltartárico y diacetiltartárico, o mezclas de acético-tartárico de los monoglicéridos y diglicéridos de los ácidos grasos). En polvo se componen por harina de trigo, dextrosa, harina de cereales malteados, ácido L-ascórbico, α -amilasa y/o β -amilasa, éter (acético, láctico, cítrico, tartárico, monoacetiltartárico y diacetiltartárico o mezclas de acético-tartárico de los monoglicéridos y diglicéridos de los ácidos grasos). La funcionalidad de los componentes más empleados se describe a continuación.

- El ácido ascórbico, siendo un agente reductor actúa como oxidante. En presencia de aire en la masa se convierte en ácido dehidroascórbico y oxida grupos SH a disulfuro, reforzando la red tridimensional del gluten, y como consecuencia evita

la pérdida de CO₂, aumenta la capacidad de absorción del agua y reduce tiempos de reposo y aumenta la tenacidad y elasticidad de la masa reforzando las cadenas del gluten, actuando como oxidante de las proteínas de la harina ayudando a interrelacionarse entre sí, reduce el tiempo de amasado, incrementa el volumen de la masa y blanquea la masa; en el producto horneado mejora las características organolépticas como una porosidad de la miga uniforme, mayor volumen, color del pan más uniforme, panes menos planos dando formas redondeadas, miga más blanda y mitiga el color marrón-oscuro de la corteza del pan malteado. Excesos o defectos en el proceso de oxidación provocan inconvenientes tanto en la masa como en el pan (Cuadro 2).

Cuadro 2. Problemas debidos a los defectos de oxidación (Quaglia, 1991).

	Oxidación escasa	Oxidación excesiva
Masa	Débil Extensible Tierno Pegajoso Dificultad de trabajo mecánico	Rígido Tenaz Estable Seco Dificultad de trabajo mecánico
Pan	Porosidad heterogénea Estructura heterogénea Volumen pequeño Corteza friable	Porosidad amplia Volumen grande Corteza tenaz Estructura áspera

- El esteaoril lactilato de sodio es un emulsionante iónico (al tener poder emulsionante tiene la capacidad que una sustancia tiene para formar sistemas dispersos como la emulsión del aceite en el agua y de agua en el aceite) que refuerza el gluten de la masa mejorando así la capacidad de retención del anhídrido carbónico producido, su adición ejerce un efecto positivo que puede comprobarse en la viscoelasticidad del gluten de la harina permitiendo conseguir un pan de mayor volumen, corteza blanda y con mejor estructura que el de aquellos panes sin adición del mismo, además se caracteriza por reforzar la masa y aumentar la resistencia a la elaboración, debido a que disminuirá la tensión superficial entre las fases lipófila (no polar) e hidrófila (polar), ya que la molécula

se sitúa en la interfase aceite/agua donde la primer parte se orienta al aceite y la segunda al agua.

- El carbonato de calcio o carbonato cálcico es /una sal reguladora que sirve para controlar el pH y proporciona iones cálcicos para reforzar la masa. En el pan actúa como antiapelmazante proporcionándole flexibilidad y manteniéndolo más tiempo suave, es un efecto de esponjamiento.

Entonces esta mezcla de compuestos productores de mejorantes tiene funciones diversas y actúan tanto en la harina, como en la masa y el producto horneado, las cuales, de acuerdo con Calaveras (2004) y Quaglia (1991) son:

- Estandarizar la calidad y variación de las harinas
- Refuerzan las propiedades mecánicas del gluten
- Aumentan la capacidad de retención del anhídrido carbónico
- Mayor tolerancia al amasado
- Más extensibilidad a las masas
- Se obtiene una miga más blanda
- Favorecen cortezas finas y crujiente
- Brinda mayor rendimiento (piezas más grandes con menos masa)
- Brinda un buen color al producto horneado
- Genera un mayor volumen
- Poros mejor y más uniformemente distribuidos en la miga

1.1.3. Descripción del proceso. El método tradicional consiste en poner todos los ingredientes a la vez excepto la levadura que se suele añadir antes de finalizar el amasado, pero no es el único método existente; a continuación, se comentan brevemente los más comunes (Calaveras, 2004).

Método intensivo (Chorleywood): Se basa en hacer pan eliminando gran parte del tiempo convencional de fermentación con el empleo de intenso trabajo mecánico sobre la masa, eliminando así la prefermentación. Normalmente se obtiene un pan con miga más blanca, alveolado más pequeño, cortezas muy finas y tiempo de vida relativamente pequeño. Es aplicado principalmente en procesos automatizados que recortan el proceso de fabricación. Normalmente en estos sistemas de amasado se utiliza escarcha de hielo o agua lo más frío posible y la temperatura final de amasado máxima es de 22 °C.

Método esponja (Poolish): Este método tiene su origen en Polonia, por eso su nombre, tiene dos pasos a realizar. En el primero de ellos se mezclan algunos ingredientes y se les permite la fermentación normalmente larga de 2 a 6 horas, en esta etapa se suelen mezclar harina, agua y levadura quedando una masa blanda y a veces pegajosa conocida como esponja (Figura 4); la segunda fase es incorporar la esponja a los ingredientes que faltan, someterlos a una segunda mezcla donde la fermentación es relativamente corta. La esponja normalmente comprende el 60% de la harina total y la mayor parte de la levadura y el agua, en algunos casos se añade harina de malta o azúcar (para facilitar la velocidad de fermentación) o grasas; pero la mejor forma de obtener regularidad es simplificando los tres ingredientes antes citados.



Figura 4. Esponja obtenida en el Método esponja (*Poolish*) (VelSid, 2008).

La esponja necesita ser blanda, pero con una consistencia firme ya que expandirá a un mayor volumen y producirá un desarrollo del gluten superior. Cuando se ha añadido la esponja se mezcla todo bien hasta obtener una masa suave, firme y elástica. Sus ventajas son la obtención de panes más ligeros, más aireados y con una mayor flexibilidad, reducción de pérdidas debido a contratiempos en los programas de producción y corrección de daños, ahorro de levadura, panes con mejor volumen, apariencia física, sabor y aroma. Sus desventajas son la reducción de la productividad por el mayor tiempo empleado y el aumento de mano de obra en la industria.

Método directo: Proceso de un solo paso donde se mezclan todos los ingredientes juntos, excepto la levadura que es incorporada al final del amasado unos cinco minutos antes de su finalización. Normalmente en este sistema se añade un 10% más de la levadura que en el método de esponja. Se mantiene el amasado hasta que todos los ingredientes han formado un solo cuerpo produciendo una masa de carácter suave y elástica. Sus ventajas son un menor requerimiento de mano de obra, reducción del tiempo general de reducción por un menor tiempo de fermentación y disminución de los márgenes de error debido a una menor manipulación y menos pasos a realizar. Sus desventajas son menos flexibilidad (ya que es más difícil añadir algún ingrediente que haga falta) y producción de panes de sabor insípido, textura áspera y menor volumen (dependiendo de la cantidad de mejorante).

Siendo así que el proceso para la elaboración de pan blanco de caja se divide en varias operaciones: amasado, división, boleado, reposo, formado, depósito de moldes, fermentación, cocción, desmoldado, enfriamiento, cortado y finalmente envasado (Mesas y Alegre, 2002; Gil Hernández y Serra Majem, 2010):

Amasado: Sus objetivos son lograr la mezcla íntima de los distintos ingredientes y conseguir, por medio del trabajo físico del amasado, las características plásticas de

la masa, así como su perfecta incorporación de aire. Son varios los efectos que se producen, primeramente hay un cambio del estado natural de las materias primas, donde gracias al agua se produce el efecto de homogeneización transformando los ingredientes en un solo cuerpo llamado masa, teniendo en cuenta varios conceptos: que se sujete en un solo cuerpo a los brazos de la amasadora, que estirando una porción de la misma seamos capaces de dar la suficiente elasticidad hasta dejar una fina película de masa y que en la misma se observen poros blancos que determinen una buena incorporación de aire, obteniendo como resultado una masa fina y elástica.

La absorción del agua durante el amasado viene principalmente producida por las proteínas de la harina; gliadina y glutenina, que aumentan el doble de su volumen inicial, por el almidón que representa aproximadamente el 50% de absorción del agua, seguido de la pequeña proporción de dextrinas contantes en la harina antes de la actuación de las enzimas diastásicas (un 27% aproximadamente) y por último las pentosanas con el 23% restante. Otro efecto es el aumento de volumen, producido primeramente por su contacto con el oxígeno y posteriormente por la incorporación de las celdas de CO₂ de levadura (durante el amasado ya existe una ligera fermentación, donde comienza la metabolización de los azúcares libres de la harina).

Todo este proceso queda terminado formando una masa con distintas características plásticas, pudiendo ser masas tenaces (ejercen una resistencia al ser estiradas), masas elásticas (tienen la capacidad de estirar hasta un punto y tienen a su vez la capacidad de retroceso “efecto muelle”) y/o masas extensibles (tienen la capacidad para ser estiradas y laminadas hasta romper).

División y pesado: Su objetivo es dar a las piezas el peso justo. Si se trata de piezas grandes se suelen pesar a mano. Si se trata de piezas pequeñas se puede utilizar una divisora hidráulica. La división hidráulica permite elaborar masas blandas donde

el grado de fermentación no implica alguna alteración, el alveolado de los panes divididos con divisora hidráulica después del reposo se presenta menor en número e irregular y de aspecto apetecible (Barriga, 2003).

Boleado: Consiste en dar forma de bola al fragmento de masa y su objetivo es reconstruir la estructura de la masa tras la división, corrigiendo su tenacidad. No es un paso que se deba cumplir siempre y para saber cuándo se debe bolear la masa se debe observar en ella un exceso de extensibilidad o falta de fuerza o si las harinas con las que se trabajaron son débiles y/o extensibles, si la masa presenta un exceso de fermentación y volumen no debe bolearse.

Fermentación 1 o reposo: Es una fermentación muy rápida y que dura relativamente poco tiempo. Se inicia en la amasadora al poco tiempo de añadir la levadura ya que las células de *Saccharomyces Cerevisiae* comienzan la metabolización de los primeros azúcares libres existentes en la harina. Su objetivo es dejar descansar la masa para que se recupere de la desgasificación sufrida durante la división y boleado. Esta etapa puede ser llevada a cabo a temperatura ambiente, en la cámara de reposo y durante 10 a 20 minutos.

Formado: Su objetivo es dar la forma que corresponde a cada tipo de pan, en este caso es la forma de paralelepípedo y se da con ayuda de un molde. Un formado agresivo es aquel con una desgasificación brusca y repentina de la masa, seguido de un plegado rápido y de un alargamiento conseguido a base de apretar y aprisionarle la masa en este se obtiene un volumen escaso. El formado deberá ser intenso en masas frías, elaboradas con harinas débiles y/o extensibles, con poco reposo antes de la división, sin fuerza y duras ya que de no ser así pueden abrirse durante la fermentación o la cocción. El formado debe ser ligero y menos agresivo cuanto más fermentada este la masa, masas tenaces, elásticas, blandas y poco extensibles, elaboradas con ácido ascórbico y/o gluten y altas dosis de levadura.

Depósito de moldes: Los moldes deben ser de teflón para evitar que la masa se pegue en ellos y se introducen abiertos en la cámara de fermentación. La masa tiene una malla proteínica perfectamente organizada preparada para retener el gas carbónico proveniente de la fermentación alcohólica.

Fermentación 2: Consiste básicamente en una fermentación alcohólica llevada a cabo por levaduras que transforman los azúcares fermentables en etanol, CO₂ y algunos productos secundarios, es la etapa más larga y aunque en muchos casos la actividad de las enzimas diastásicas comienza muy pronto, su etapa degradatoria es larga, se considera la etapa en las que la α -amilasa, β -amilasa, glucosidasa y amiloglucosidasa actúan sobre el almidón, además se produce la mayor cantidad de fermentación alcohólica. Se puede realizar en una cámara de fermentación durante 25 a 40 minutos, dependiendo del tamaño del molde, la temperatura y la humedad en el interior.

Cocción: Conlleva a la evaporación de todo el etanol producido en la fermentación, evaporación de parte del agua contenida en el pan, coagulación de las proteínas, transformación del almidón en dextrinas y azúcares menores y pardeamiento de la corteza. La cocción se realiza en hornos a temperaturas que van desde 220 – 260 °C, aunque el interior de la masa nunca llega a rebasar los 100 °C. La introducción de calor en el pan es el responsable de aumentar la presión del gas en el interior del mismo, produciendo un aumento significativo del pan. Los procesos más característicos del pan dentro del horno son (Calaveras, 2004):

- Se realiza una tercera fermentación de corto tiempo desarrollada en el horno, ya que se finaliza cuando el interior de la pieza de pan posee 55 °C pues a dicha temperatura las células de levadura se inactivan y mueren.
- Caramelización de los azúcares y coloración de la corteza.

- Gelatinización del almidón, la cual es una transición de un estado ordenado de estructura cristalina a otro desordenado en el que se absorbe agua y calor, proporcionando la estructura y volumen final del pan (Badui Dergal, 2013).
- A 75 °C produce la paralización de la producción de maltosa por parte de las enzimas diastásicas.
- Las proteínas se desnaturalizan a los 43 °C hasta llegar a mantener una consistencia constante cercana a los 85 °C.

Los defectos más significativos producidos por una mala cocción son poco volumen o debilitamiento de la masa al entrar en el horno y exceso o falta de coloración. La transmisión de calor se hace de unos cuerpos a otros de distintas formas (Calaveras, 2004):

- Transmisión por convección: Se hace entre una corriente (líquida o gaseosa) y un cuerpo sólido que está a distintas temperaturas. Dicha forma es la más empleada en la elaboración de pan.
- Transmisión por conducción: Un cuerpo caliente en contacto con un cuerpo frío transmite una parte de calor a este último, hasta una estabilización de temperaturas iguales en los dos cuerpos.
- Transmisión por radiación: El calor y todos los cuerpos emiten una radiación calorífica que penetra en los cuerpos sólidos.

Desmoldado, enfriamiento, cortado y envasado: Se debe desmoldar el producto final inmediatamente después de que termina el horneado, para evitar la absorción de humedad dentro del molde y el enfriamiento se realiza a una temperatura entre 25 – 30 °C durante 1 a 2 horas y una vez frío se realiza el corte del pan de molde y se prosigue a envasar en bolsas de plástico bien selladas para evitar la absorción de humedad y por lo consiguiente el endurecimiento del pan.

Un problema muy común en panificación es la falta de volumen en los panes, la cual se presenta por diversos factores que van desde los ingredientes empleados; como puede ser poca levadura, mucha sal, harina de mala calidad y/o una mala formulación, hasta problemas con el proceso, como serían un insuficiente amasado, poca fermentación y/o una temperatura en el horno muy elevada (Martínez Cruz *et al.*, 2015). Otros problemas que se pueden presentar, así como sus causas se muestran en el Cuadro 3, de forma genérica, donde no se presentan intervalos específicos ya que al hablar de panificación en general, los intervalos varían de acuerdo al tipo de pan a elaborar, por lo que los términos poco, mucho, exceso, entre otros, hacen referencia a una proporción alternativa en que se encontrarán los componentes en cada formulación.

1.1.4. Propiedades determinantes de la calidad en pan blanco de caja. Para la obtención de un pan blanco de caja con propiedades y características deseables que representen una buena calidad en el producto es necesario medir las propiedades reológicas en la masa (viscoelasticidad) y las propiedades físicas (volumen específico, color de corteza y miga, análisis de imagen de la miga, humedad y pérdida de peso) y texturales (perfil de textura y envejecimiento) en el producto final; algunas de las propiedades mencionadas anteriormente se han estudiado con anterioridad por lo que existen intervalos en sus valores para cada una de ellas.

- *Reología de la masa (viscoelasticidad):* Los alimentos viscoelásticos son aquellos que presentan simultáneamente características viscosas y elásticas.

Estos materiales tienen propiedades de flujo con respecto al tiempo aplicando una fuerza de deformación y reaccionan contra esa fuerza deformadora para recuperar su forma original, o sea que sufren deformaciones reversibles cuando se encuentran sujetos a la acción de fuerzas exteriores y recuperan la forma original si estas fuerzas exteriores se eliminan. La parte viscosa se comporta de acuerdo a la

Cuadro 3. Problemas y causas que se presentan en panificación (Calaveras, 2004).

Problemas Causas	Volumen		Clara	Oscura	Gruesa	Corleza		Manchada	En costras	Gris	Miga		Mala Textura	Mal sabor	Huecos en el pan	Masa		Mala conservación
	Poco	Mucho				Ampollada	Áspera				Fresca	Vieja						
Poca levadura	x			X						X					X			
Mucha levadura		X									X			X				
Poca sal		X												X				
Mucha sal	x													X				
Excesivo amasado	x																	
Escaso amasado	x							X										x
Muchas enzimas diastásicas		X								X			x	X			X	
Pocas enzimas diastásicas			X			X			X						X			
Mucha fermentación		X	X		x					X			x	X				x
Poca fermentación	x			X		X									X			x
Elevada temperatura en el horno	x			X					X					X				x
Baja T en el horno		X	X		x					X			x	X				x
Exceso de espolvoreo			X					X		X								
Harina de trigo joven	x														X		X	
Harina fuerte		X							X						X			
Harina vieja			X											X				
Harina de mala calidad	x																	x
Masa fría	x																X	
Masa caliente		X	X														X	
Masa dura	x		X									X					X	
Masa muy reposada	x	X	X	X					X						X			
Masa poco reposada	x																X	
Pan mal moldeado												X						
Mal embolado								X							X			
Mala formulación	x	X											x					x
Mucho crecimiento	X	X												X				x
Poco crecimiento	x													X				x

ley de Newton y la parte elástica se comporta de acuerdo a la ley de Hooke (después de un ciclo de carga, un material idealmente elástico regresa por completo al estado inicial) (Ramos e Ibarz, 2006; Alvis *et al.*, 2011; Mezger, 2011 y Katime Amashta *et al.*, 2002).

Para medir estas características se utiliza el método dinámico, el cual requiere muestras pequeñas que no se destruyen y un reómetro en el que se mantengan las determinaciones dentro de la región viscoelástica lineal, empleando generalmente placas paralelas a una separación de 1 y 2 mm, un controlador de temperatura; la cual deberá ser de 25 – 30 °C y una oscilación sinusoidal a bajas deformaciones (< 1%), con este método es posible determinar las características viscoelásticas de las masas dependientes de la frecuencia, y los resultados son expresados como el módulo de almacenamiento (G'), el módulo de pérdida (G'') y la tangente del ángulo de fase ($\tan \delta$). Se pueden determinar en masas con y sin levadura, donde la superficie expuesta se cubre con vaselina, aceite de silicona o cualquier otro tipo de aceite para evitar la deshidratación de la muestra durante la medición, la muestra se deja descansar previamente de 5 a 30 minutos para alcanzar el equilibrio térmico y la relajación de la masa (Witczak *et al.*, 2016; Rubel, 2015; Renzetti *et al.*, 2007; Magaña Barajas *et al.*, 2009, 2011).

Inicialmente se realiza el barrido de deformación a una amplitud que puede seleccionarse de 0.01 – 100% y una frecuencia angular constante que puede ser de 1, 5 o 10 rad/s, para de esta manera obtener el intervalo de deformaciones donde la masa presenta comportamiento lineal. Posteriormente se realiza un barrido de frecuencia a una deformación constante dentro de la zona de viscoelasticidad lineal con una frecuencia de 0.1 – 100 rad/s o viceversa (Rubel, 2015; Magaña Barajas *et al.*, 2009 y 2011).

Por lo general en estudios de masas adicionadas con fibra se han determinado valores del módulo de almacenamiento (G') mayores a los valores del módulo de

pérdida (G'') en función de la frecuencia durante toda la gama de frecuencias y condiciones de las masas, demostrando un comportamiento sólido predominantemente. El módulo de almacenamiento representó mejor el comportamiento reológico de la masa durante la fermentación y la cocción dado que mostró una mayor correlación con las propiedades del pan. Además, se observó que ambos módulos aumentaron al incrementar la frecuencia angular. La calidad, masa y volumen del pan tuvo una correlación con la tangente del ángulo de fase ($\tan \delta$) y el módulo de almacenamiento se ha visto relacionado con el volumen y masa del pan (Magaña Barajas *et al.*, 2011; Rubel, 2015; He y Hosney, 1991; Mani *et al.*, 1992).

- *Volumen y volumen específico del pan:* El volumen se mide al pan frío entero empleando comúnmente el método de desplazamiento de semillas de colza o nabo (AACC, 2000), midiendo el volumen de semillas desplazadas por la hogaza entera por el espacio ocupado por el pan. El volumen específico es el volumen ocupado por unidad de masa de un material y el cual es crítico para la calidad, funcionalidad y aceptación del pan, se calcula como el cociente entre el volumen neto del pan y su peso (Vega Castro *et al.*, 2015), se han reportado valores entre los 3.04 y 5.30 cm^3/g para pan de caja (Rubel, 2015).

- *Color de corteza y miga:* Se realizan las mediciones tanto para la corteza como para la miga por medio de un colorímetro y con los resultados expresados en la escala CIE $L^*a^*b^*$ donde como se muestra en la Figura 5, L representa la luminosidad ($L=0$: negro, $L=100$: blanco), a el croma (+: rojo, -: verde) y b el tono (+: amarillo, -: azul) (Vásquez, 2015). Se han reportado valores de la corteza de luminosidad = 67.92 – 82.01, rojo = 0.50 – 3.85 y amarillo = 16.22 – 26.78 mientras que de la miga los valores son en luminosidad = 59.46 – 72.64, rojo = 0.31 – 1.67 y amarillo = 17.47 – 22.66 (Rubel, 2015).

- *Estructura de la miga por análisis de imágenes digitales:* El análisis de imagen está establecido como un método objetivo y confiable por lo que en las últimas

décadas se ha convertido casi en un método estándar para el análisis de imagen de la miga, para su aplicación se siguen varios pasos: obtención de rebanadas correctamente cortadas, escaneo y digitalización de las imágenes en escala de grises con una resolución de 300 pixeles por pulgada (ppp), ajuste del brillo, contraste y gama, extracción del contorno de muestra y segmentación de un área seleccionada para diferenciar los poros de sus alrededores empleando un umbral de escala de grises el cual variará de acuerdo a la imagen digitalizada (Magdic *et al.*, 2006; Bertrand *et al.*, 1992).

La estructura de la miga se evalúa mediante el conteo, medición y análisis de sus poros con ayuda de un software especializado obteniendo una gran diversidad de resultados como el área media, número, tamaño, diámetro, redondez y clasificación de los poros, polidispersión de las áreas de los poros, relación área del poro/área total, área evaluada, y porcentaje del área total con los cuales se puede calcular la fineza (número de poros por unidad de área) y la fracción vacía (área de poros con relación al área total).

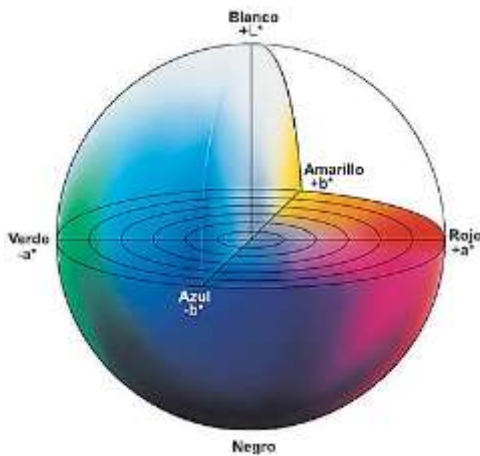


Figura 5. Espacio de color $L^*a^*b^*$.

- *Humedad*: Se define como la pérdida en peso que sufre un alimento al someterlo a las condiciones de tiempo y temperatura prescritos (NMX-F-083-1986), es un factor muy importante pues influye directamente en la vida útil del producto ya que

provoca contaminación y crecimiento microbiano, ocasionando daños organolépticos y nutritivos en el producto horneado. La humedad puede ser determinada mediante un horno o estufa de secado con control de temperatura durante 12 horas a 80 °C bajo vacío o con ayuda de una termobalanza. Algunos resultados conocidos van de 35.72 – 43.46% (Rubel, 2015) y de acuerdo con la NMX-F-159-S-1983 el pan debe tener una humedad mínima del 30% y máxima del 38%.

- *Pérdida de peso por horneo:* La pérdida de peso es producida por la cantidad de agua que se evapora al alcanzar la temperatura de ebullición, ocurriendo además la volatilización de las sustancias con temperatura de ebullición inferior a 100 °C, como son el alcohol etílico y la mayoría de sustancias aromáticas que se forman en la fermentación, esta pérdida representa el 10.4% del peso del pan.

Debido a que se hornea por convección, el calor se propaga del ambiente hasta el interior atravesando toda la superficie del pan, la cantidad de agua que se mueve del interior al exterior del pan, se conoce como merma y se evapora al llegar a la superficie del mismo, la parte externa del pan sufre una reducción de humedad hasta llegar al 5% y la parte interna se mantiene casi constante a 43.5% (similar a la masa antes de hornear), dicha merma puede ser positiva en el proceso debido a que reduce la humedad del pan. Cuando el pan es removido del horno, la humedad del interior migra hacia la parte externa (seca), por lo que durante el enfriamiento continua la evaporación de humedad y se reduce hasta llegar aproximadamente a 38%, el promedio de pérdida de peso por fermentado y horneado es de 15.90% (Macoto Cálix, 2014).

- *Textura del pan.* Se mide generalmente la firmeza (fuerza requerida para obtener una deformación especificada) y el análisis de perfil de textura (TPA, por sus siglas en inglés) que consiste en comprimir y descomprimir las rebanadas de pan dos veces en el centro de estas, un movimiento que imita la acción de la mandíbula, con

un dispositivo de forma cilíndrica obteniendo algunos parámetros de textura detallados en el Cuadro 4, el parámetro textural que ha sido mayormente reportado es la dureza con valores entre 2.25 – 8.51 N (Rubel, 2015).

En la prueba de perfil de textura se pueden controlar varias condiciones de prueba como la distancia que se comprime, la velocidad a que se comprime, el tamaño y forma del dispositivo, entre los más importantes, obteniendo una curva de fuerza en función del tiempo (Figura 6) y los resultados de los parámetros texturales dependen de estas condiciones.

- *Envejecimiento*. Se dice que el pan ha envejecido cuando la miga está seca y se desmorona, pierde sabor y aroma llegando a ser insípido, hay una sensación de sequedad al contacto con el mismo y presenta como características:

- *Corteza envejecida*: La corteza pierde ese estado crujiente y color brillante para ser descolorida, al ser higroscópica (tiene la capacidad de absorber o perder agua) parte del agua del interior se evapora al ambiente, produciendo una corteza algo dura. Si la humedad relativa supera el 75%, una parte de la humedad es absorbida por el pan y produciendo una corteza blanda y húmeda y por lo tanto un pan correoso, para evitarlo, el pan debe estar almacenado a una HR del 55% para obtener una corteza crujiente. Esto no aplica al pan de caja pues su corteza no es crujiente. En el pan de caja, generalmente se presenta endurecimiento de la miga y la corteza (Calaveras, 2004).

- *Miga envejecida*: Aparece el envejecimiento, el desmoronamiento, se aprecia una dureza elevada al tacto, perdiendo su suavidad y flexibilidad y un menor valor nutritivo (Calaveras, 2004).

Cuadro 4. Parámetros del análisis de perfil de textura (Civille y Szczesniak, 1973; Hernández García y Güemes Vera, 2010; Miranda Mozo, 2015; Casas Alencáster y Pardo García, 2005).

PARÁMETRO	DEFINICIÓN	EVALUACIÓN
Fractura (g)	Fuerza con la que se fractura el material, producto de un alto grado de dureza y bajo grado de cohesión	Primer caída significativa de la curva durante el primer ciclo de compresión
Dureza (g)	Fuerza necesaria al alcanzar una deformación dada	Fuerza máxima en el primer ciclo
Elasticidad total	Capacidad que tiene un alimento deformado para recuperar su forma inicial después de que la fuerza ha impactado en él	Distancia de compresión del segundo ciclo entre distancia de compresión del primer ciclo (D3/D1)
Elasticidad instantánea	Capacidad de recuperación de la deformación en la descompresión del primer ciclo	Distancia de descompresión del primer ciclo entre distancia de compresión del primer ciclo (D2/D1)
Elasticidad retardada	Capacidad de recuperación del alimento entre el término de la compresión del primer ciclo y el inicio de la compresión del segundo	Elasticidad total menos elasticidad instantánea
Adhesividad	Trabajo necesario para vencer la fuerza de atracción entre el alimento y el material con el que se encuentre en contacto	Área negativa después del primer ciclo de compresión (A4)
Cohesividad	Fuerza de los enlaces internos que proporcionan la estructura al alimento	Área de compresión del segundo ciclo entre área de compresión del primer ciclo (A3/A1)
Masticabilidad (g)	Energía necesaria para masticar un alimento sólido	Producto de la dureza por la cohesividad por la elasticidad total
Resiliencia	Capacidad de recuperar su forma original después de haber aplicado una fuerza de compresión	Área de descompresión del primer ciclo entre área de compresión del primer ciclo (A2/A1)
Módulo de deformabilidad	Deformación en el primer ciclo de compresión	Pendiente inicial en la compresión del primer ciclo

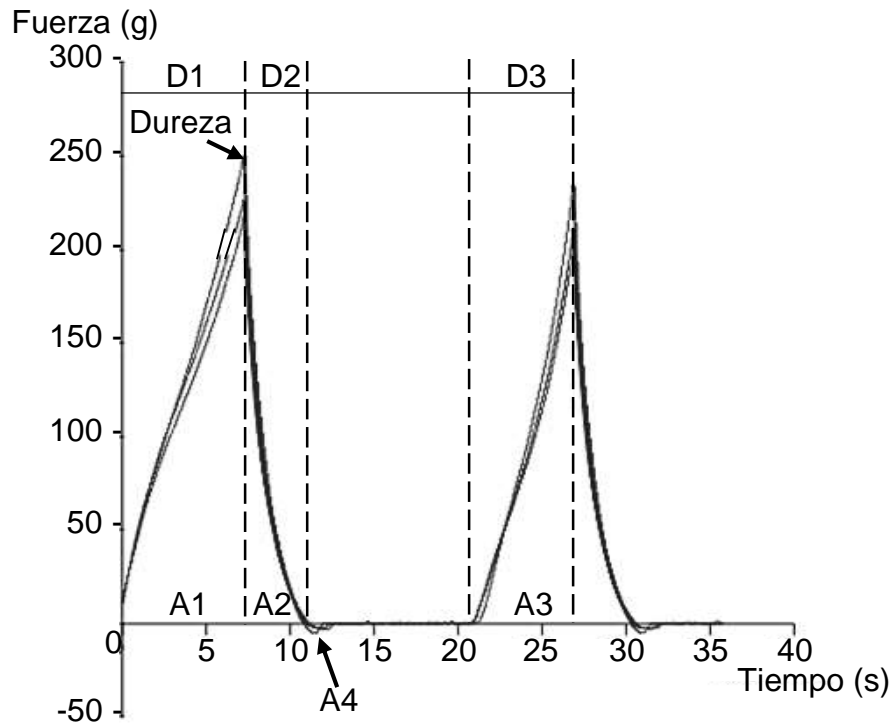


Figura 6. Curva típica de perfil de textura del pan.

Las causas del envejecimiento pueden ser un mal proceso de panificación (fermentación irregular, tanto en tiempo, temperatura y pH de la masa), una relación de humedad ambiente y humedad del pan muy diferenciada, el uso de materias primas incorrectas y la migración de parte del agua de la miga hacia la corteza. Si el pan tiene varios días hay una clara pérdida de humedad aunque existen estudios que demuestran que la relación envejecimiento-humedad no es tan importante como se cree, ya que un pan introducido en una cámara hermética durante varios días se queda duro igual, sigue teniendo un alto contenido en humedad y, sin embargo, esa sensación de suavidad la ha perdido (Calaveras, 2004).

La retrogradación del almidón se relaciona de manera directa con el envejecimiento del pan ya que durante su cocimiento parte de la amilosa se difunde fuera del gránulo y retrograda al momento de su enfriamiento, de manera que los restos de gránulos (ricos en amilopectina) se ven rodeados por moléculas del polímero lineal; en el pan fresco, el polímero ramificado tiene todas sus ramas completamente

extendidas, mientras que en el pan duro están retrogradadas, unidas entre sí y sin el agua original (Figura 7).

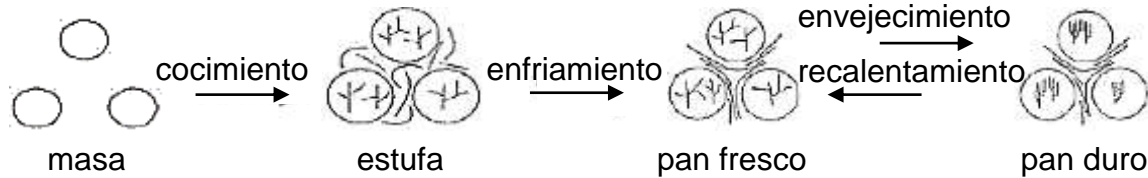


Figura 7. Fracciones del almidón en el envejecimiento del pan (Badui Dergal, 2013).

Por lo que para su análisis se realizan las pruebas de volumen específico, humedad y perfil de textura en panes cuya elaboración haya sido con el tiempo de anterioridad que se desee evaluar.

La calidad del pan blanco de caja se ve afectada por diversos factores, como lo son los tiempos de amasado, fermentación, horneado; así como los aditivos y/o ingredientes utilizados y adicionados, como es el caso de los fructanos y jarabe de agave, los cuales pueden proporcionar o no cambios en las propiedades físicas y texturales, afectando así en la calidad del producto final.

1.2. Fructanos

Los fructanos son carbohidratos reductores formados por monómeros de fructosa unidos por enlaces β pudiendo contener, o no, un residuo de glucosa en su estructura. Son fibra dietética de gran valor nutritivo y de acuerdo con la Sociedad Americana de Químicos de Cereales (AACC por sus siglas en inglés) la fibra dietética se define como “la parte comestible de los vegetales y los análogos de carbohidratos, que son resistentes a la digestión y absorción en el intestino delgado humano, y que son fermentados parcial o totalmente en el intestino grueso” (Escudero y González, 2006).

1.2.1. Fuentes vegetales para la obtención de fructanos. Existen diversas fuentes de obtención de fructanos entre las que se encuentran el ajo (*Allium sativum* L.), la cebolla (*Allium cepa* L.), la cebada (*Hordeum* sp.), el cacahuate (*Arachis hypogaea* L.), el tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.), el espárrago (*Asparagus officinalis* L.) y el puerro (*Allium ampeloprasum* var. *Porrum*), entre otros. A nivel industrial se extraen a partir de la achicoria (*Cichorium intybus* L.), la alcachofa (*Cynara scolymus* L.), la alcachofa de Jerusalén (*Helianthus tuberosus* L.), la alcachofa globo (*Cynara cardunculus* L.), el yacón (*Smallanthus sonchifolius* H. Rob.), la dalia (*Dahlia pinnata* Cav.) y de agaves.

Las plantas del género *Agave* contienen la mayor cantidad de carbohidratos en el tallo, los cuales frecuentemente son fructanos y carbohidratos reductores presentando valores entre 360 mg/g y 735 mg/g en peso seco, siendo más altos que los reportados en otras plantas como achicoria y dalia (240 mg/g y 350mg/g en peso seco, respectivamente).

El contenido de fructanos en la misma especie de plantas de agave varía de acuerdo al ambiente donde ha sido cultivada, influenciándose por factores abióticos como el clima, las precipitaciones, la altitud y el suelo; en *Agave tequilana* de la región de Jalisco se presenta un contenido de fructanos casi 50% mayor que las de las regiones de Guanajuato, esto debido a una mayor altitud y una temperatura nocturna más fresca en la zona de Jalisco, favoreciendo a la absorción de CO₂ y por consecuencia a la producción de carbohidratos (López Mujica y Mancilla Margalli, 2007).

1.2.2. Clasificación de los fructanos. De acuerdo a la estructura y el tipo de enlace que presenten los fructanos existen seis clasificaciones de éstos, las cuales son: inulinas, levanos, graminanos, neoserias de inulina, neoserias de levano y agavinas, estas presentan diferente estructura (lineal o ramificada) y pueden estar unas dentro de otras (Figura 8).

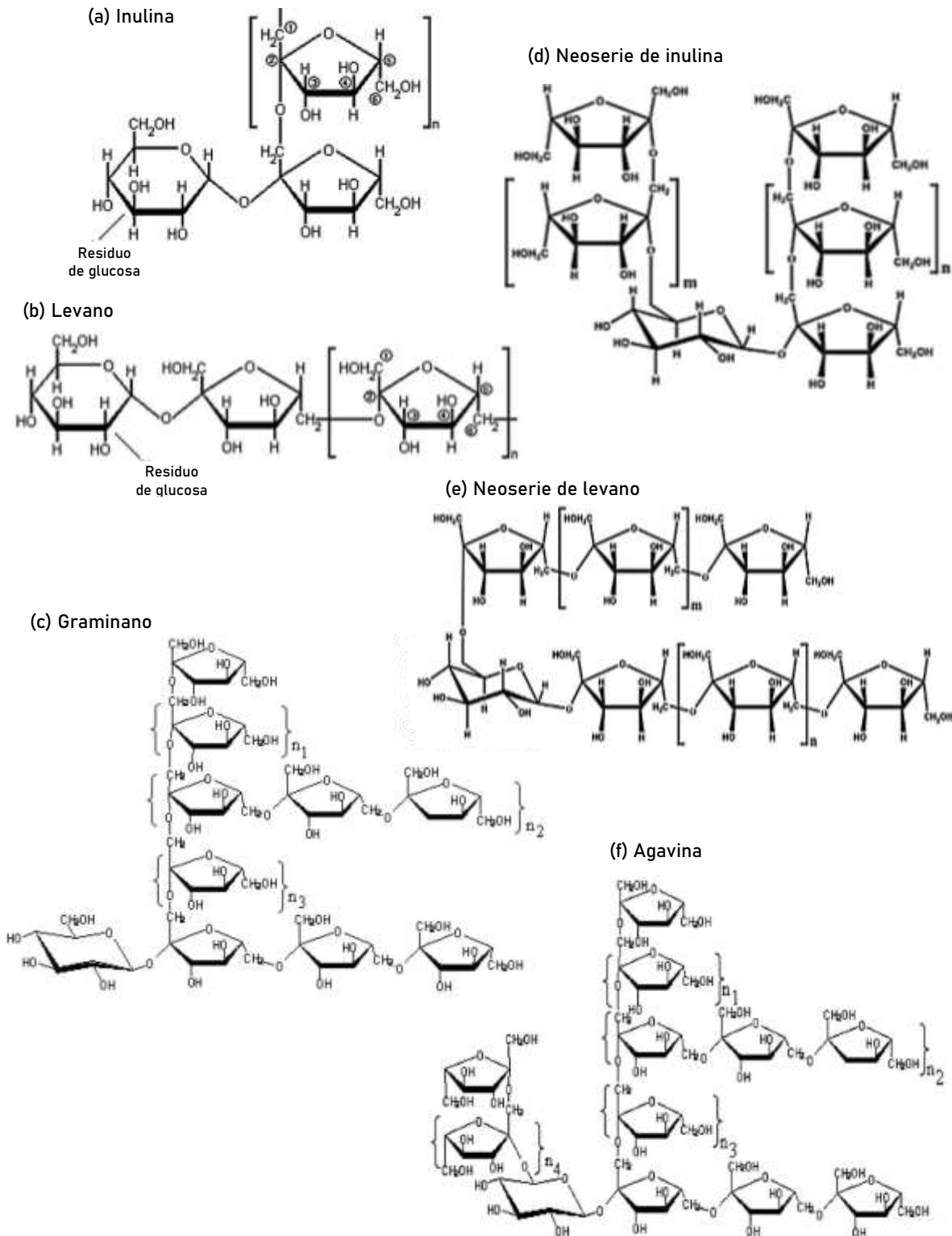


Figura 8. Estructura de los fructanos. Donde n = moléculas de fructosa y podría variar según las especies de plantas y las condiciones ambientales (Arvidson *et al.*, 2006; Olvera Carranza *et al.*, 2015 y López Mujica y Mancilla Margalli, 2007).

- Inulinas: Estructura lineal con enlaces β -2,1 entre las unidades de fructosa, conteniendo o no un residuo inicial de glucosa.
- Levanos: Estructura lineal con enlaces β -2,6 con un residuo inicial de glucosa.
- Graminanos: Estructura ramificada con enlaces β -2,1 y β -2,6 con un residuo inicial de glucosa.
- Neoseries de inulina: Estructuras lineales con enlaces β -2,1, además de un residuo de glucosa intermedio con enlaces en C1 y C6.
- Neoseries de levano: Estructuras lineales con enlaces β -2,6 y un residuo de glucosa intermedio.
- Agavinas: Cadena de fructosa en enlace β -2,1 unida a un residuo de glucosa intermedio unido a estructuras ramificadas de fructosa con enlaces β -2,1 y β -2,6.

1.2.3. Fructanos de agave

Se ha demostrado que en los fructanos de agave su estructura molecular es una mezcla diversa de fructanos (inulinas, neoseries y levanos), que incluye enlaces β -2,1 y β -2,6 (Figura 9), proporcionando así diferentes propiedades y aplicaciones en la industria alimenticia. Poseen bajo peso molecular, entre 527 y 4739 Da y el grado de polimerización depende de la edad de las plantas, a los dos años presentan entre 3 – 6 unidades de monosacáridos, a los seis años entre 4 – 24, alcanzan el máximo grado de polimerización a los cuatro años el cual es de 3 – 30. De esta manera, las plantas más jóvenes presentan mayor potencial como prebiótico debido al bajo peso molecular (Arrizon *et al.*, 2010).

El proceso de extracción de los fructanos de agave se lleva a cabo en agaves maduros, comienza retirando las hojas y obteniendo las piñas; ya que es ahí donde se concentra la mayor cantidad de fructanos, se cortan en trozos con la finalidad de extraer el jugo el cual después se filtra y desmineraliza. El jugo obtenido pasa por una evaporación con vacío donde se elimina la mayor cantidad de agua y finalmente se realiza el proceso de secado para la obtención de fructanos de agave en polvo (Ponce *et al.*, 2008).

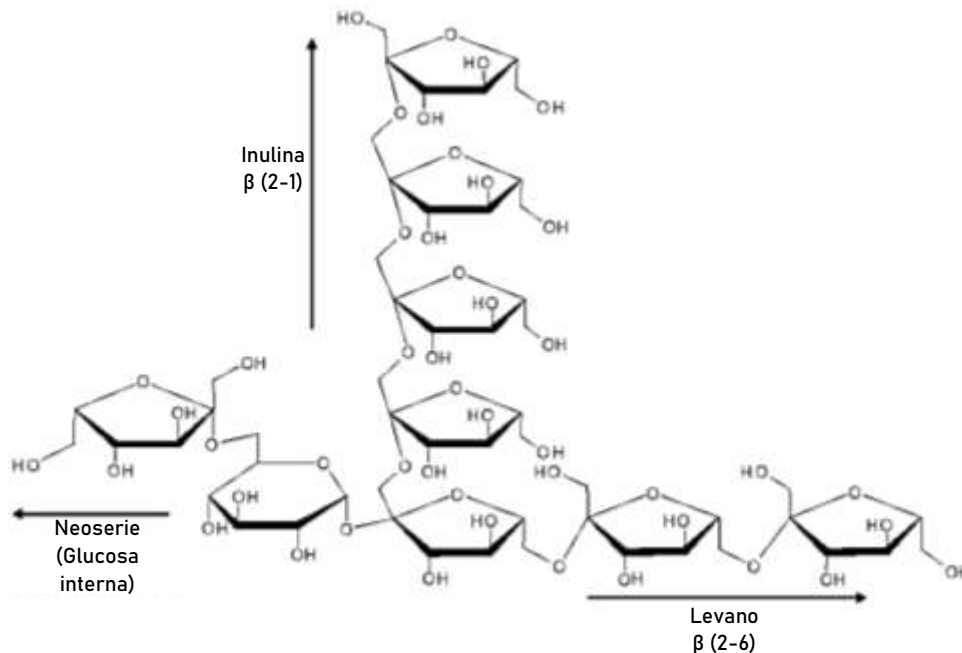


Figura 9. Estructura de fructanos de Agave (López Mujica y Urias Silvas, 2007).

Beneficios nutricionales y de la salud de los fructanos. El fructano de tipo inulina es el que mayormente se ha estudiado y presenta diversos beneficios nutricionales y de salud para el ser humano, como pueden ser:

- **Función como fibra dietética:** Por el tipo de enlace que presentan se consideran fibra dietética ya que casi el 90% de la inulina pasa al colon y es digerida por las bacterias presentes allí (Cherbut, 2002).
- **Valor calórico:** En comparación con sus monosacáridos presenta un bajo valor calórico (1.5 kcal/g o 6.3 kJ/g). Mediante la acción de bacterias intestinales, se transforma en ácidos grasos de cadena corta (acetato, propionato y butirato), lactato, combustible bacteriano y gases (Nyman, 2002).
- **Efecto sobre el metabolismo de los lípidos:** Influye principalmente en la disminución de la trigliceridemia y la ligera disminución de la colesterolemia (Delzenne *et al.*, 2002), de igual manera estudios realizados en la alimentación de ratas demuestran que la adición de inulina disminuye la disolución lipídica en el hígado suprimiendo la producción de los genes responsables de la lipogénesis

de la enzima, dicho proceso se produce de la misma manera en los seres humanos (Roberfroid, 2007).

- Efecto sobre el estreñimiento y la frecuencia de las heces.
- Reducción del riesgo de enfermedades gastrointestinales.
- Mejora la absorción de calcio, magnesio y hierro.
- Regulación de la ingesta de alimentos y el apetito.
- Estimulación del sistema inmunológico.
- Aceptabilidad intestinal.

Aplicaciones en alimentos. La inulina de achicoria es el fructano más empleado en la industria alimentaria debido a diversas razones, incluyendo la sustitución de grasa y azúcar, como agente de bajo volumen calórico, y como agente texturizante, además de ser una fibra dietética soluble y tener propiedades prebióticas (Cuadro 5).

Al presentarse adiciones pequeñas no se afectan las propiedades reológicas y sensoriales, pero al haber un incremento en su concentración las propiedades fisicoquímicas de este polisacárido influyen en las estructura y textura del producto final. La inulina de cadenas cortas aporta dulzura y palatabilidad y la inulina de cadenas largas es menos soluble, además de aportar mayor viscosidad (Chiavaro *et al.*, 2007).

1.3. Estudios de panes enriquecidos con fructano tipo inulina

Emplear inulina en productos horneados y panes aumenta el tiempo de desarrollo y estabilidad de la masa lo que provoca fortalecimiento y disminución en la expansión de la masa, provocado ya sea por la interacción inulina-gluten o la interacción inulina-inulina. Respecto a la reología de la masa, la adición de inulina disminuye su elasticidad sin afectar su extensibilidad, y en cuanto al pan disminuye su volumen, su humedad varía, incrementa la dureza de la corteza y su color es más

oscuro en comparación con el pan convencional (Rosell *et al.*, 2010; Brasil *et al.*, 2011; Hager *et al.*, 2011).

Cuadro 5. Aplicaciones de la inulina de achicoria en alimentos (Franck, 2002).

Aplicación	Funcionalidad	Nivel de dosificación (% w/w)
Productos lácteos	Sustituto de azúcar y grasa Sinergismo con edulcorantes Estabilidad de espumas Fibra y prebiótico	2 – 10
Postres congelados	Sustituto de azúcar y grasa Texturización y fusión Sinergismo con edulcorantes Fibra y prebiótico	2 – 10
Productos horneados y panes	Fibra y prebiótico Retenedor de humedad Sustituto de azúcar	2 – 15
Cereales para desayuno	Fibra y prebiótico Frescura	2 – 25
Preparaciones de frutas	Sustituto de azúcar Sinergismo con edulcorantes Fibra y prebiótico	2 – 10
Aderezo para ensaladas	Sustituto de grasas	2 – 10
Productos cárnicos	Sustituto de grasa Textura y estabilidad Fibra	2 – 10
Productos dietéticos y sustitutos de almuerzo	Sustituto de azúcar y grasa Sinergismo con edulcorantes Bajo contenido calórico Fibra y prebiótico	2 – 15
Chocolate	Sustituto de azúcar Fibra Resistencia al calor	5 – 30

La adición de fibras (inulina de achicoria) genera cambios en las características de la masa que afectan significativamente su comportamiento reológico, la sustitución de harina por fibra restringe la maquinabilidad (manejo y facilidad de corte) de la masa y la expansión de las celdas de gas. Por otra parte, la adición de fibras como inulina en la formulación de pan puede causar un aumento en la absorción de agua

debido a la interacción de los grupos hidroxilos de la fibra con el agua, mediante enlaces puente de hidrógeno (Sivam *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2002; Laurikainen *et al.*, 1998; Gan *et al.*, 1992).

Algunas fibras pueden afectar negativamente las características del pan provocando una reducción del volumen, un aumento de la firmeza de la miga, además de desviaciones en el sabor (Wang *et al.*, 2002). En particular, la inulina puede ser aplicada como sustituto de harina de cereales en productos de panadería, dado que es altamente palatable, no contienen compuestos de sabor amargo y posee propiedades texturizantes (Franck, 2002).

No obstante, los estudios fueron realizados con fructanos de achicoria, los considerados en este proyecto son los de agave, que como ya se explicó poseen propiedades marcadamente diferentes.

1.4. Jarabe de agave

Según la norma mexicana NMX-FF-110-SCFI-2008, el jarabe de agave azul se define como la sustancia dulce natural producida por la hidrólisis de los oligosacáridos (fructanos) del agave y no debe contener aditivos alimentarios, almidones, melazas, glucosa, dextrinas, fructosa u otros azúcares de otro origen. Es un edulcorante con un poder endulzante 30% mayor que el azúcar comercial, con gran demanda debido a que es de fácil metabolización, con sabor dulce, intensificador de sabores y como sustituto de azúcar por ser portador de un bajo índice glucémico, capacidad antioxidante y propiedades antibacterianas.

Una de las características que identifica al jarabe de agave sobre otros tipos de jarabes es su color, el cual está determinado por reacciones de oscurecimiento no enzimático (caramelización), originándose al calentar los azúcares por encima de su punto de fusión a cualquier valor de pH, generando coloración que va del amarillo, café, café rojizo y negro (Torres y González, 2015). El jarabe de agave, de

acuerdo con la norma antes mencionada, debe cumplir con la especificación de color, propio característico, variable de: Cristalino agua, extra a cristalino, cristalino, extra claro ámbar, ámbar claro, ámbar y oscuro.

1.4.1. Proceso de elaboración y tipos de jarabe de agave. Existen tres procesos para la obtención de jarabe de agave (Torres y González, 2015; Muñoz Gutiérrez *et al.*, 2007; Bautista Justo *et al.*, 2001):

- Hidrólisis térmica, evaporación y concentración de extractos obtenidos de la cocción y prensado de piñas de agave.
- Hidrólisis ácido térmica, evaporación y concentración de hidrolizados con ácidos minerales.
- Hidrólisis enzimática, evaporación y concentración de hidrolizados con enzimas comerciales denominadas inulasas.

Del tercer proceso los productos de piñas cocidas e hidrólisis ácida presentan la limitante de obtener jarabes de baja pureza y tóxicos celulares (hidroximetilfurfural) y los hidrolizados enzimáticos presentan desventajas asociadas al costo parcialmente elevado del uso de enzimas comerciales. De manera general el jarabe de agave se obtiene al exprimir el jugo de la base de la planta de agave, luego se calienta a 48 °C y finalmente se filtra. Después de calentarse, el jugo se convierte en un líquido dorado como jarabe.

La hidrólisis es el procedimiento químico, térmico, enzimático o la combinación de los anteriores, utilizados para desdoblar los carbohidratos, presentes en el Agave, por lo tanto, el jarabe de agave parcialmente hidrolizado, es diferente al jarabe de agave 100%, donde el contenido de fructosa es menor a 80% debido a su hidrólisis parcial, conteniendo proporcionalmente fructanos de agave y fructosa, y que puede estar ausente maltosa, rafinosa y todos aquellos azúcares que no se encuentran en

la especie de agave utilizada. Su pH puede ser de 4.0 a 6.0 (NMX-FF-110-SCFI-2008).

La concentración de azúcares se da por la evaporación en donde el porcentaje de agua a eliminarse dependerá de la consistencia que se le quiere dar al producto final, en el caso de la miel de agave la concentración ayuda al aumento de vida útil. Los perfiles de carbohidratos de los jarabes naturales revelan diferentes tipos y contenidos de oligosacáridos según la fuente natural del edulcorante, los jarabes de *Agave tequilana* tienen un perfil específico de hidratos de carbono, dominados por fructosa y glucosa y en una proporción menor fructanos, mientras que la sacarosa es el componente principal de los jarabes de *Agave salmiana* (Mellado Mojica y López, 2015).

1.4.2. Beneficios en la salud. Debido a la composición de la miel de agave rica en glucosa, fructosa y sacarosa es lo que la hace un alimento energético y de gran calidad, además su contenido de proteínas (aminoácidos esenciales como lisina, triptófano, histidina, fenilalanina, leucina, tirosina, metionina, valina y arginina) y vitaminas (vitamina C, complejo B, niacina, tiamina y riboflavina) es mayor en comparación con otro tipo de mieles como de abeja o de maíz, debido a todo esto es por lo que se considera un producto beneficioso y aprovechable por el cuerpo humano, consecuentemente al ingerirla permite una alimentación inmediata e intensiva de todo el sistema muscular, especialmente del corazón pues llega primero, sin embargo, la fructosa al ser un azúcar de absorción digestiva lenta es asumida por el hígado, donde se almacena en forma de glucógeno para que el organismo la utilice cuando la necesite (Mijangos Santiago, 1994).

Los beneficios potenciales del jarabe de agave son múltiples, y están asociados con el organismo (disminución del colesterol y absorción de calcio, hierro y magnesio), el intestino (evita estreñimiento, cáncer de colon, úlceras, colitis y estimula flora y funcionamiento intestinal), el sistema inmune y los dientes (no causa caries), de

igual manera al contener fructanos (la cantidad depende de su grado de hidrólisis) mejoran el sistema digestivo y la capacidad de eliminación de grasas y toxinas que dañan al cuerpo humano, además inhiben el crecimiento de bacterias patógenas, como *E. Coli*, *Listeria*, *Shigella* y *Salmonella* (López Sánchez, 2013).

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Objetivos

General

Evaluar el efecto de la adición de fructanos y jarabe de agave sobre las propiedades reológicas de la masa y las propiedades físicas y texturales del pan blanco de caja diversificando condiciones y delimitando su potencial de aplicación para la obtención de un producto final adicionado.

Particulares

Determinar el efecto de la adición de jarabe de agave total y parcialmente hidrolizado (50 y 88% de hidrólisis) a una sola concentración, sobre las propiedades viscoelásticas de la masa y las propiedades físicas (volumen específico, color en corteza y miga, análisis de imagen de la miga, humedad y pérdida de peso) y perfil de textura, así como en el envejecimiento del pan blanco de caja para la selección del tipo de jarabe de agave a emplear.

Determinar el efecto de la concentración de fructanos de agave (2, 3, 4 y 5%) sobre las propiedades viscoelásticas de la masa y las propiedades físicas (volumen específico, color en corteza y miga, análisis de imagen de la miga, humedad y pérdida de peso) y perfil de textura, así como el envejecimiento del pan blanco de caja para la obtención de un producto final adicionado con fructanos y jarabe de agave.

2.2. Materiales

Las materias primas utilizadas para el desarrollo del proyecto se mencionan a continuación:

- Harina de trigo, Selecta, con 10 g de proteína por cada 100 g.
- Agua purificada baja en sodio, Epura.
- Aceite vegetal comestible puro de cártamo, Oléico.
- Azúcar refinada, Great Value.
- Leche en polvo baja en grasa, Nestlé Svelty, (4.6 g de proteína por cada 24 g).
- Levadura seca en polvo, Tradi-pan.
- Sal refinada, La Fina.
- Mejorante regular para pan blanco (súper F), Fleischmann.
- Jarabe orgánico de agave totalmente hidrolizado (JOA), Mielles Campos Azules S.A. de C.V. con 92.6% fructosa, 5.5% glucosa, 0.9% sacarosa, 0.8% fructanos.
- Jarabe orgánico de agave con 88% de hidrólisis (JOA 88), Mielles Campos Azules S.A. de C.V. con 87.6% fructosa, 0.3% glucosa, 12% fructanos.
- Jarabe orgánico de agave con 50% de hidrólisis (JOA 50), Mielles Campos Azules S.A. de C.V. con 47.1% fructosa, 1.6% glucosa, 0.1% sacarosa, 50.9% fructanos.
- Fructanos de agave en polvo (FA), Mielles Campos Azules S.A. de C.V. donde 92.60% son fructanos, 6.20% fructosa, 0.70% glucosa, 0.50% sacarosa y 3.70% de humedad.
- Pan de harina de trigo integral, Bimbo (como referencia)

2.3. Elaboración del pan blanco de caja

Para la elaboración del pan blanco de caja las formulaciones empleadas fueron seleccionadas con base en la formulación propuesta por la Cámara Nacional de la Industria de Panificación (2016) y se presentan en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Formulaciones empleadas.

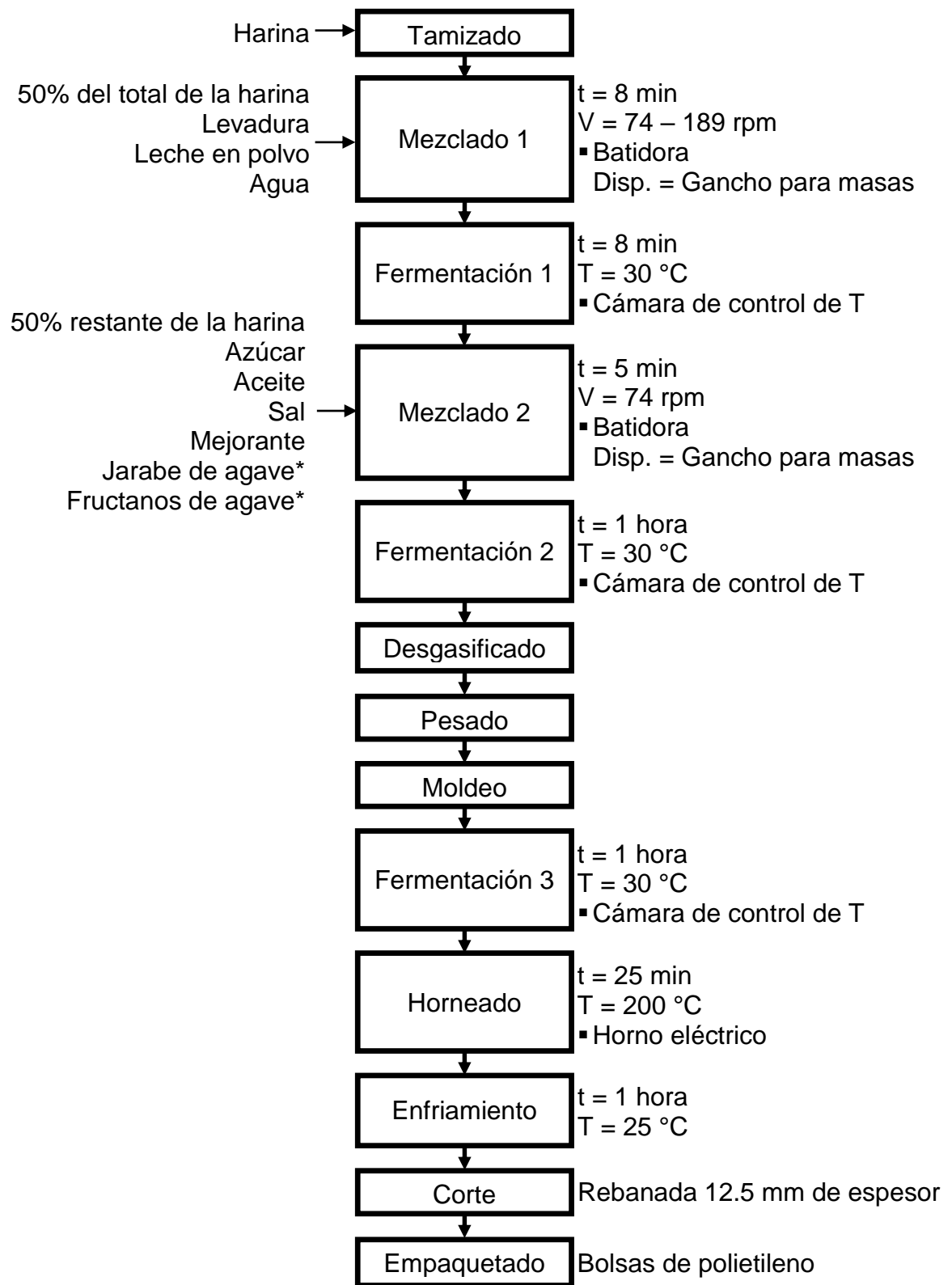
Ingrediente	Formulación base (%)	Formulación con JOA* (%)	Formulación con FA (%)			
Harina de trigo	55.62	55.62	53.62	52.62	51.62	50.62
Agua	33.04	33.04	33.04	33.04	33.04	33.04
Aceite	3.58	3.58	3.58	3.58	3.58	3.58
Azúcar	3.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58
Levadura	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65
Leche en polvo	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
Sal	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88
Mejorante	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
Jarabe orgánico de agave		2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Fructanos de agave			2.00	3.00	4.00	5.00
TOTAL	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

* Empleo de jarabe orgánico de agave con sus diferentes niveles de hidrólisis.

Diagrama y descripción del proceso.

El proceso para la elaboración de pan blanco de caja a nivel laboratorio, sus condiciones (tiempo, velocidad, temperatura) y algunos equipos empleados para el desarrollo de éste se presenta a continuación (Figura 10), así como una descripción:

- Tamizado. Se realizó el tamizado de la harina por medio de una coladera.



* En las formulaciones que así lo requieran. Disp. = Dispositivo

Figura 10. Diagrama de proceso para la elaboración de pan blanco de caja.

- Mezclado 1. Para la elaboración de la esponja, se mezcló el 50% del total de la harina, la levadura, la leche en polvo y el 100% de agua durante 8 minutos aumentando gradualmente las velocidades de 74 a 189 rpm en la batidora KitchenAid (Estados Unidos) y empleando el dispositivo de gancho para masas.
- Fermentación 1. Se dejó reposar la mezcla durante 30 minutos en la cámara de control de temperatura marca Craft modelo Humicab-60D (México) a una temperatura de 30 °C, cubriendo con un paño húmedo el recipiente.
- Mezclado 2. Se adicionó y mezcló el 50% restante de la harina y el 100% del azúcar, aceite, sal y mejorante para desarrollar una masa elástica a una velocidad mínima (74 rpm) con el dispositivo de gancho para masas durante 5 minutos.
- Fermentación 2. Se dejó en reposo la mezcla durante una hora en la cámara de control de temperatura, marca Craft modelo Humicab-60D (México), a una temperatura de 30 °C, cubriendo con un paño húmedo el recipiente.
- Desgasificación. Se trabajó en la masa, aplicando presión mediante un amasado a mano hasta que ya no se presentó gran cantidad de gas dentro.
- Pesado. Se tomó el peso de la masa antes del horneado.
- Moldeo. Se le dio a la masa la forma de paralelepípedo depositándola en el molde para hornear.
- Fermentación 3. Se dejó en la cámara de control de temperatura, marca Craft modelo Humicab-60D (México), durante 25 minutos a una temperatura de 30 °C, cubriendo el molde con un paño húmedo.
- Precalentado. Se precalentó el horno durante 30 minutos a 200 °C.
- Horneado: Se dejó hornear la masa ya en el molde durante 25 minutos a una temperatura de 200 °C en modo convectivo, a los 12 minutos se le dio vuelta al molde con la finalidad de evitar mayor calentamiento y oscurecimiento de corteza de un lado del pan.
- Enfriamiento. Antes del corte y/o empaquetado se dejó que el pan blanco de caja se enfriara durante una hora.
- Corte. Se cortaron rebanadas de 12.5 mm de espesor con ayuda de un cuchillo.
- Empaquetado. Se almacenó en bolsas de polietileno bien selladas para evitar intercambio de humedad con el ambiente.

2.4. Métodos

La Figura 11 muestra las pruebas realizadas a la masa y el pan, los cuales se describen a continuación:

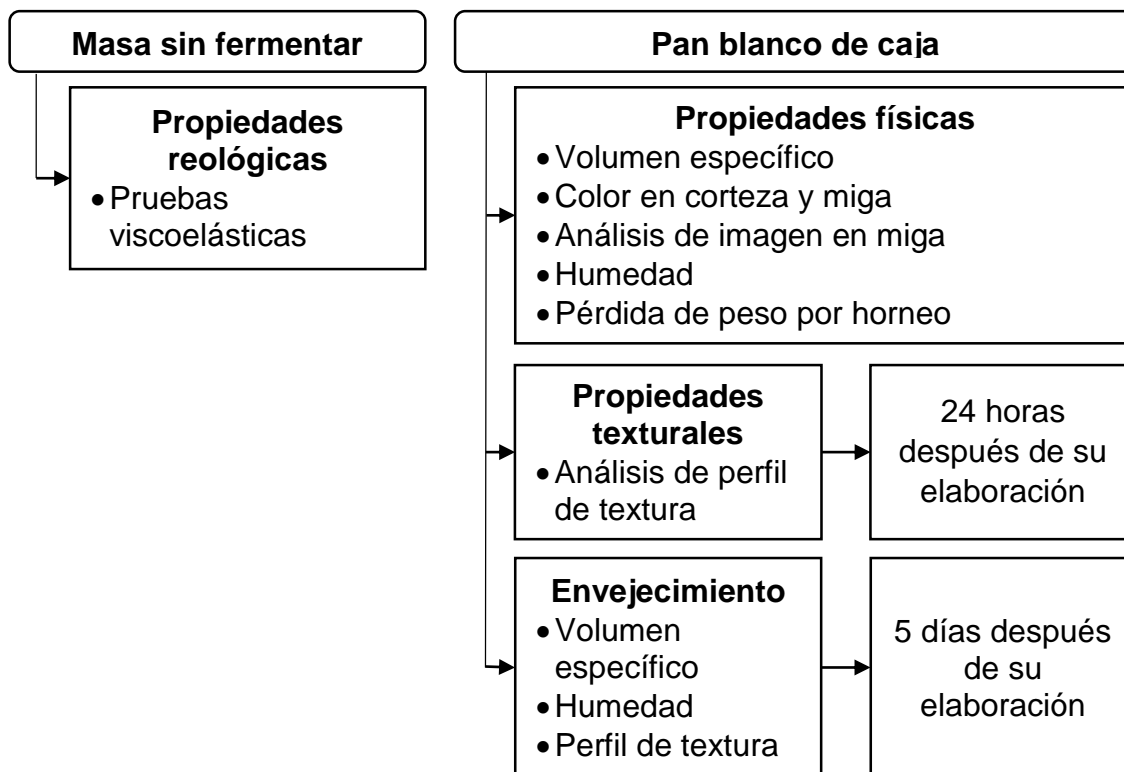


Figura 11. Pruebas realizadas en los diferentes materiales.

2.4.1. Viscoelasticidad de la masa. Se determinó a 4 masas preparadas sin levadura (masa control, masa con 2% JOA, masas con 3% y con 4% de FA) mediante mediciones dinámico oscilatorias en un reómetro Anton Paar modelo MCR 301 (Austria) con dispositivo placa – placa, en donde el rotor de medición fue la placa rugosa perfilada (PP50) de 50 mm de diámetro; la temperatura se controló a 25 °C con un sistema Peltier. La separación de plato fue de 2 mm, la superficie expuesta se cubrió con aceite para evitar la deshidratación de la muestra durante la medición, la muestra se dejó descansar 30 minutos para alcanzar el equilibrio térmico y la relajación de la masa. Posteriormente se realizó el barrido de deformación a una amplitud de 0.01 a 0.1% a 1 Hz. Inmediatamente después se

comenzó con un barrido de frecuencia de 0.1 a 50 Hz a 0.02% de deformación, considerando que la muestra se encontraba dentro de la zona viscoelástica lineal (Magaña Barajas *et al.*, 2011).

2.4.2. Volumen específico del pan. Se utilizó el método de desplazamiento de semillas (AACC, 2000) empleando semillas de mijo. En un recipiente cilíndrico con dimensiones conocidas se colocó el pan blanco de caja entero y previamente pesado y se cubrió completamente con las semillas de mijo, se marcó la altura de las semillas, se retiró el pan y se volvió a marcar la altura de las semillas. Se vaciaron las semillas y se midió con agua el volumen de ambas marcas y por diferencia se calculó el volumen del pan (ecuación 1). El volumen específico se calculó con la ecuación 2.

Volumen del pan =

$$\text{Volumen de semillas con pan (cm}^3\text{)} - \text{Volumen de semillas sin pan (cm}^3\text{)} \quad (1)$$

$$\text{Volumen específico del pan (cm}^3\text{/g)} = \frac{\text{Volumen del pan (cm}^3\text{)}}{\text{Peso del pan (g)}} \quad (2)$$

2.4.3. Color en corteza y miga. El color se midió en la corteza y en la miga con ayuda del colorímetro Minolta CR300 (Japón) con la fuente de iluminación D65, realizando mediciones en tres puntos de la corteza y en tres puntos de la miga de tres rebanadas diferentes después de realizarle la calibración al equipo y se obtuvieron los parámetros de color *L*, *a*, *b*.

2.4.4. Análisis de imagen en miga de pan. El análisis de imagen se realizó en imágenes digitales de la miga de la parte central de tres rebanadas de pan obtenidas con ayuda del escáner HP modelo LJM1522nf Scan (Estados Unidos) con una resolución de 300 pixeles por pulgada (ppp) (Magdic *et al.*, 2006). Con el software

Image Pro Plus de Media Cybernetics versión 6.0.0.260, se analizaron las imágenes digitales convertidas a escalas de grises, ajustando brillo, contraste y gama, seleccionando un área de interés y realizando una segmentación para diferenciar los poros de sus alrededores mediante la aplicación de un umbral por el método manual. Los umbrales empleados fueron: 131 (Comercial), 151 (Control y 4% FA), 155 (2 y 3% FA), 160 (2% JOA 88 y 5% FA), 162 (2% JOA) y 164 (2% JOA 50). En el área seleccionada se contaron los poros y se obtuvieron las medidas de área, diámetro máximo, relación área del poro/área total y redondez de los poros; con dichos valores se calcularon fineza, fracción vacía y uniformidad con las ecuaciones 3, 4 y 5 respectivamente.

$$Fineza = \frac{\text{Número de objetos medidos}}{\text{Área evaluada}} [=] \frac{1}{mm^2} \quad (3)$$

$$Fracción vacía = \frac{\text{Área total de los poros}}{\text{Área evaluada}} \quad (4)$$

$$Uniformidad = \frac{\text{Número de poros menores a 1 mm}}{\text{Número de poros mayores a 1 mm}} \quad (5)$$

2.4.5. Humedad. Se realizó con la termobalanza Ohaus MB45 (Estados Unidos) por triplicado utilizando 1 gramo de muestra y bajo el perfil estándar a una temperatura de desecación de 90 °C y un criterio de finalización de pérdida de peso menor a 1 mg en 60 segundos para la harina de trigo, la leche en polvo, los fructanos de agave y el pan blanco de caja, la temperatura de desecación se cambió a 80 °C en la medición del azúcar. En el caso de los jarabes de agave fue empleado el perfil estándar a una temperatura de desecación de 95 °C con un gramo de muestra y un criterio de finalización de pérdida de peso cronometrado de 50 minutos para JOA, 30 minutos JOA 88 y 20 minutos JOA 50.

2.4.6. Pérdida de peso del pan. Para determinar la pérdida de peso en los panes se pesó la masa fermentada y el pan entero y se calculó la pérdida de peso en porcentaje con la ecuación 6.

$$\text{Pérdida de peso (g)} = \left(\frac{\text{Peso masa fermentada} - \text{Peso pan}}{\text{Peso masa fermentada}} \right) 100 \quad (6)$$

2.4.7. Análisis de perfil de textura. La prueba se realizó basada en el procedimiento estándar “Medición de la firmeza del pan blanco” del Instituto Americano del Horneo (AIB, por sus siglas en ingles) (A. I. B., 1999), por medio del texturómetro Texture Analyser TA-XT2i (Inglaterra) con celda de carga de 5 kg, cilindro de acrílico de 2.54 cm de diámetro y 40 mm de altura (P/25P) como dispositivo de prueba, se utilizaron dos rebanadas de 12.5 mm de espesor de la parte central del pan colocadas una encima de la otra. La fuerza de contacto fue de 10 g, y las velocidades de pre-ensayo/ensayo/post-ensayo de 1.7 mm/s, con un tiempo de espera entre cada ciclo de 5 segundos. La prueba se realizó con dos distancias de compresión de 20 y 40% con relación a la altura de la muestra (25 mm), la primera distancia con la finalidad de obtener propiedades elásticas y la segunda para obtener propiedades de deformación, así como simular el proceso de masticación a condiciones extremas.

La prueba se realizó por triplicado. Se obtuvo una curva de fuerza en función del tiempo y a partir de ella se calcularon los parámetros texturales del pan: dureza, cohesividad, elasticidad total, resiliencia y módulo de deformabilidad.

2.4.8. Envejecimiento del pan. Se analizó por medio de las pruebas: volumen específico, humedad y perfil de textura únicamente en los panes seleccionados de cada objetivo y en el pan control, cuya elaboración se realizó con cinco días de anterioridad.

2.5. Análisis estadístico

Los resultados obtenidos se analizaron mediante 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.





Para la evaluación de la calidad de los valores se tomó como medida de dispersión el coeficiente de variación (CV), el cual mediante porcentaje refleja la magnitud relativa que tiene dicho error estándar con respecto al estimador de referencia, mientras más pequeño sea éste, mejor es la precisión. Considerando así valores por debajo del 15% de buena calidad, entre 15 y 25% aceptables y mayores de 25% de baja calidad (Martínez Sánchez, 2017).

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se realizó la caracterización de un pan comercial, como referencia para la delimitación y aprobación de la formulación y proceso del pan control; es decir, como punto de partida para definir una formulación base. Las imágenes de dichos panes (enteros y de una de sus rebanadas) se presentan en el Cuadro 7.

Se cuantificaron las propiedades de los panes considerando que aquellas en las que se presentaron valores de coeficiente de variación aceptables (menores del 15%) existía variación entre el mismo pan, por lo que se concluyó que su elaboración se realizó de manera correcta y homogénea; y aquellas propiedades donde el coeficiente de variación sobrepasó el 25%, se explica por el tipo de material del que se trata, puesto que la uniformidad no es una de sus principales características, ya que, por ejemplo, el número de poros no siempre será el mismo, lo que afectará de manera directa a la textura, el volumen específico y la fineza.

Cuadro 7. Pan comercial y pan control.

PAN	IMAGEN	
	PAN ENTERO	REBANADA DE PAN
Pan comercial		
Pan control		

El análisis cualitativo entre el pan comercial y el pan control demuestran que en cuanto a la apariencia de la miga y de la corteza son similares, donde se presentan diferencias es en la altura, la uniformidad de ésta y el desmoronamiento al corte, el pan que presenta mejores características es el pan comercial; ya que presenta uniformidad y el desmoronamiento al corte es menor, pero al ser una comparación cualitativa es de esperarse, ya que no son las mismas condiciones de proceso entre ambos panes. Referente a la humedad se puede apreciar que no existe diferencia significativa (Cuadro 8).

Cuadro 8. Descripción cualitativa y humedad de pan comercial y pan control.

Muestra	Altura	Uniformidad de la altura	Apariencia de la corteza (lisa)	Apariencia de la miga (seca)	Desmoronamiento al corte	Humedad (%)	
Comercial	++	++	+	+	+	32.03	A
C. V. (%)						4.8	
Control	+	+	+	+	++	33.06	A
C. V. (%)						0.4	
“+” representa el nivel en el que se encontraba cada muestra (comparando entre las mismas). Por ejemplo, el pan control presentó menor altura que el pan comercial.							

El análisis de imagen representado en el Cuadro 9 muestra un área total de poros semejante entre ambos panes proporcionando una fracción vacía similar, pero el número de poros es mayor en el pan comercial, lo cual puede ser por una mayor área evaluada, de esta manera se afecta directamente a la fineza, siendo ésta estadísticamente diferente entre ambos panes.

Aún sin ser semejantes el número de poros, ambos tuvieron una clasificación de seis grupos de tamaños diferentes, como se muestra en la Figura 12 con los diferentes colores para cada grupo, pero de igual manera la uniformidad de ambos

fue diferente, pues se vio afectada por la cantidad de poros menores y mayores a 1 mm, es decir, el pan comercial presentaba mayor cantidad de poros pequeños, al contrario del pan control donde prevalecían los poros de mayor tamaño.

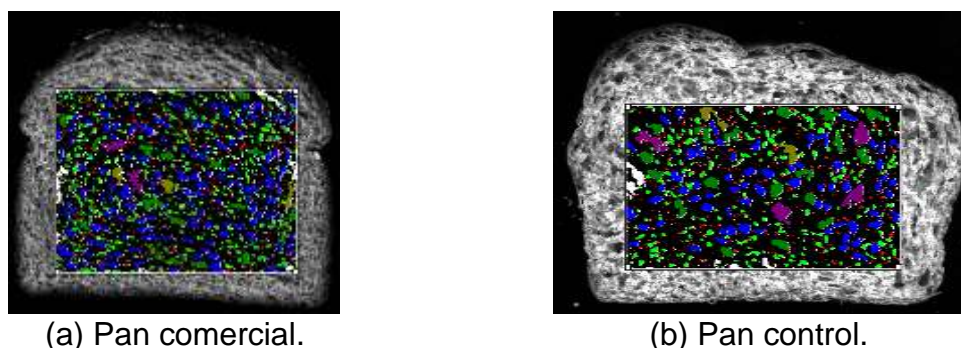


Figura 12. Clasificación de poros.

Cuadro 9. Análisis de imagen en pan comercial y pan control.

Muestra	Análisis de imagen											
	Área evaluada (mm ²)		Número de poros		Área total de poros (mm ²)		Fineza (poros/cm ²)		Fracción vacía		Uniformidad	
Comercial	5245.4	A	2162.3	A	878.8	A	0.41	A	0.17	A	9.93	A
C.V. (%)	4.5		7.3		15.3		2.7		11.0		13.0	
Control	4502.5	B	1231.3	B	835.0	A	0.27	B	0.19	A	6.77	B
C.V. (%)	2.6		1.7		3.0		4.2		2.3		8.8	

Las letras diferentes en cada fila representan diferencia significativa.

La corteza del pan control fue más luminosa, con un tono amarillo en mayor intensidad y un croma rojo semejante en comparación con la corteza del pan comercial, y la miga del pan control tuvo un croma verde en mayor intensidad, un tono amarillo más leve y una luminosidad similar respecto a la miga del pan comercial. En ambos panes el tono que predominó fue el amarillo en corteza y miga, el croma fue el verde para la miga y el rojo para la corteza, y la miga presentó mayor luminosidad que la corteza (Cuadro 10).

Cuadro 10. Color de corteza y miga en pan comercial y pan control.

Muestra	Color											
	Corteza					Miga						
	L		a		b	L		a		b		
Comercial	36.93	B	9.98	A	15.17	B	68.10	A	-0.48	A	24.19	A
C.V. (%)	4.8		5.9		4.2		1.0		19.0		1.1	
Control	55.92	A	9.68	A	33.41	A	71.18	A	-5.03	B	21.09	B
C.V. (%)	1.8		7.9		3.3		2.5		2.8		1.6	

La letras diferentes en cada fila representan diferencia significativa.

En la Figura 13 se puede apreciar que el módulo de deformabilidad presentó una tendencia diferente entre ambos panes y que fue más la dureza en el pan control que en el pan comercial afectando a la cohesividad de los mismos, la elasticidad total y la resiliencia no presentaron diferencia significativa, por lo que su capacidad para volver a su forma original es la misma a una distancia de compresión del 20% de su altura. Ambos panes presentan diferencias significativas en sus parámetros de perfil de textura a condiciones de deformación (40% de compresión) (Cuadro 11).

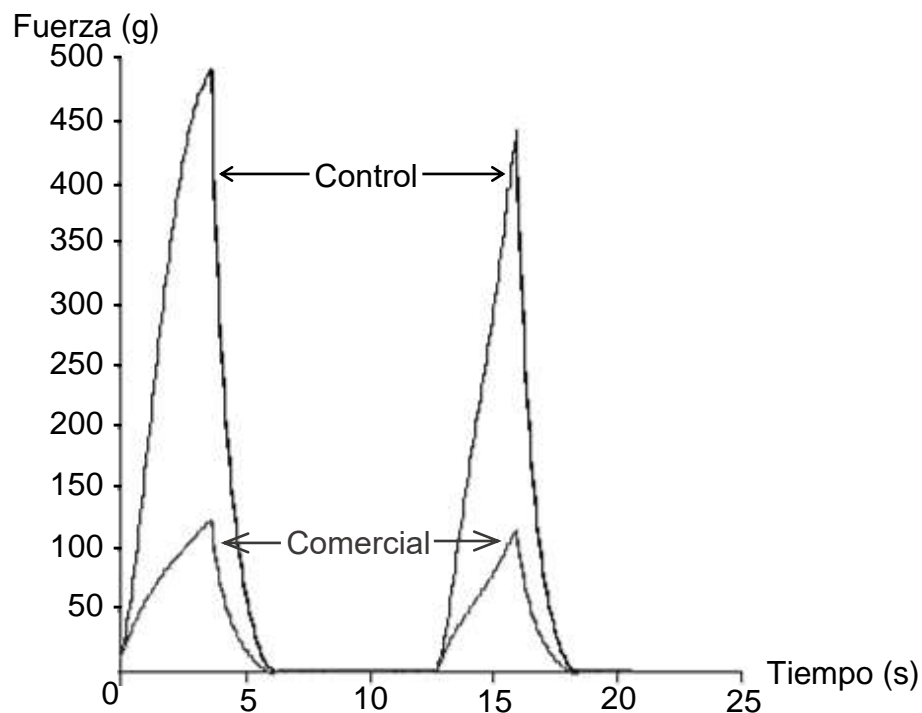


Figura 13. Perfil de textura al 20% de deformación con respecto a su altura (curva representativa de las tres repeticiones del pan comercial y del pan control).

Cuadro 11. Parámetros texturales en pan comercial y pan control.

Muestra	Dureza (g)	Cohesividad		Elasticidad Total		Resiliencia		Módulo de deformabilidad		
	Distancia de compresión = 20%									
Comercial	120.99	B	0.69	A	0.95	A	0.31	A	44.15	B
C.V (%)	8.6		1.7		2.8		2.5		16.4	
Control	355.39	A	0.64	B	0.95	A	0.30	A	121.60	A
C.V (%)	5.7		3.8		3.3		1.9		7.5	
Distancia de compresión = 40%										
Comercial	220.61	B	0.59	A	0.81	B	0.22	A	23.93	A
C.V (%)	5.5		0.7		0.5		1.2		5.3	
Control	502.54	A	0.44	B	0.86	A	0.17	B	114.31	B
C.V (%)	3.5		0.5		2.0		1.2		2.4	







Las letras diferentes en cada fila representan diferencia significativa.

Por los resultados antes presentados y el tratamiento de datos se pudieron delimitar las diferencias entre el pan comercial y el pan control, la mayoría de ellas se distinguen en el análisis de perfil de textura, dado que las formulaciones y las condiciones de proceso no son comparables, sin embargo, el análisis cuantitativo demostró ser similar, por ello el pan control es un buen punto de referencia en la evaluación del efecto del jarabe y fructanos de agave.

3.1. Efecto del jarabe orgánico de agave (JOA) con diferente grado de hidrólisis

El efecto de la adición de jarabe total y parcialmente hidrolizado (50 y 88% de hidrólisis) a una sola concentración (2%) sobre la apariencia física de los panes enteros y una de sus rebanadas se presentan en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Panes adicionados con JOA con diferente grado de hidrólisis.

PAN	IMAGEN	
	PAN ENTERO	REBANADA DE PAN
2% JOA		
2% JOA 88		
2% JOA 50		

El uso del jarabe orgánico de agave a diferentes grados de hidrólisis afecta en la apariencia de los panes, ya que al usar el jarabe con menor hidrólisis (50%) el pan presentó características cualitativas poco agradables ya que su altura fue menor, su corteza corrugada y el desmoronamiento al corte que presentó fue mayor en comparación con el resto de los panes evaluados, principalmente con el pan adicionado con jarabe orgánico de agave totalmente hidrolizado, el cual presenta características cualitativas favorables, como una mejor altura, una corteza lisa y un desmoronamiento al corte parecido al del pan control (Cuadro 13).

Cuadro 13. Efecto del grado de hidrólisis del JOA en la apariencia de los panes.

Muestra	Altura	Uniformidad de la altura	Apariencia de la corteza (lisa)	Apariencia de la miga (seca)	Desmoronamiento al corte
Control	+++	++++	++++	+	+
2% JOA	++	+	++	++	+
2% JOA 88	++++	+++	+++	+++	+++
2% JOA 50	+	++	+	++	++++

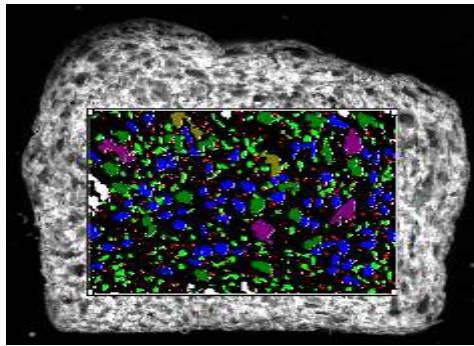
“+” representa el nivel en el que se encontraba cada muestra (comparando entre las mismas).

Como se muestra en el Cuadro 14, la adición de JOA con diferente grado de hidrólisis afectó principalmente en la fineza de los panes, ya que no se presentó semejanza entre los panes adicionados y el pan control, la fineza del pan con 2% JOA 88 fue similar a la del pan con 2% JOA 50 y a la del pan con 2% JOA. El área evaluada fue diferente entre el pan control y el pan con 2% JOA, pero el número y clasificación de tamaños de poros entre estos dos panes fue estadísticamente similar (Figura 14a y 14b), de igual manera el número de poros del pan con 2% JOA 88 fue similar al número de poros de los panes con 2% JOA 50 y 2% JOA.

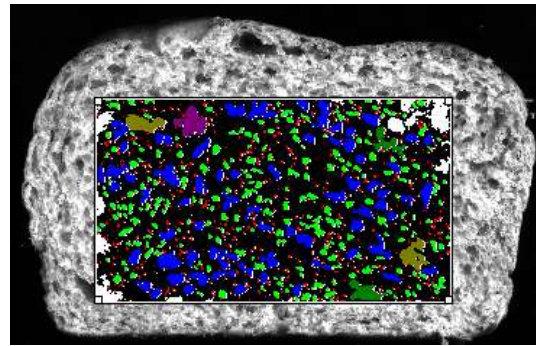
El área total de poros, la fracción vacía y la uniformidad no presentaron diferencia significativa, demostrando que se tiene una misma área de poros aún respecto al área evaluada, por otra parte lo que varía es el número de poros y su tamaño; principalmente se presentaron diferencias entre los panes control y 2% JOA con los panes 2% JOA 88 y 2% JOA 50, ya que los primeros dos presentaron una menor cantidad de poros pero con un gran tamaño, a diferencia de los últimos dos los cuales tienen una mayor cantidad de poros, pero como se observan en la Figura 14 en su mayoría son muy pequeños.

Lo anterior se puede atribuir a que, al incluir los jarabes, cambia la proporción de azúcares presentes, ya que la sacarosa (azúcar común) contiene más glucosa que fructosa y el jarabe posee prácticamente puras fructosas, que además están ya hidrolizadas, por lo que están más disponibles, modificando así probablemente el proceso de fermentación, puesto que se ve afectado por la concentración de azúcares, ya que la levadura fermenta mejor a bajas concentraciones (Montañez *et al.*, 2011).

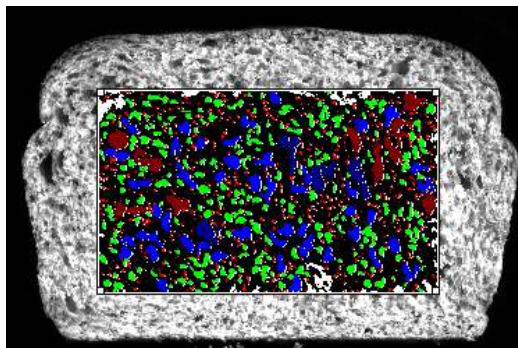
Los panes control y con 2% JOA se clasificaron en 6 tamaños de poros y los panes con 2% JOA 88 y 2% JOA 50 únicamente presentaron 5 tamaños, representados mediante el uso de distintos colores para cada grupo en la Figura 14.



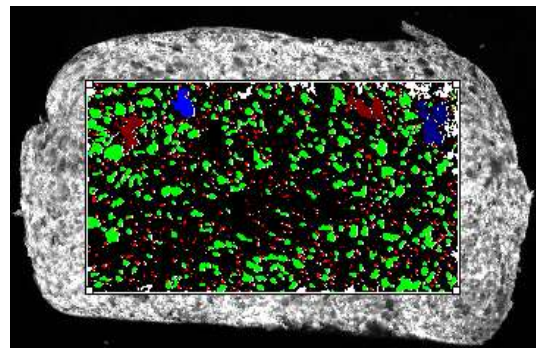
(a) Pan control.



(b) Pan con 2% JOA.



(c) Pan con 2% JOA 88.



(d) Pan con 2% JOA 50.

Figura 14. Efecto del grado de hidrólisis del JOA en la clasificación de poros.

Cuadro 14. Efecto del grado de hidrólisis del JOA en las características de la miga.

Muestra	Análisis de imagen											
	Área evaluada (mm ²)		Número de poros		Área total de poros (mm ²)		Fineza (poros/cm ²)		Fracción vacía		Uniformidad	
Control	4502.50	A	1231.3	C	835.0	A	0.27	C	0.19	A	6.77	A
C.V. (%)	2.6		1.7		3.0		4.2		2.3		8.8	
2% JOA	4191.85	B	1420.0	BC	770.9	A	0.34	B	0.18	A	8.31	A
C.V. (%)	4.9		9.8		3.9		5.2		2.7		7.7	
2% JOA 88	4580.64	AB	1678.7	AB	913.7	A	0.37	AB	0.20	A	7.91	A
C.V. (%)	9.4		7.5		11.8		2.4		8.3		5.8	
2% JOA 50	4615.91	AB	1727.0	A	812.0	A	0.37	A	0.18	A	8.75	A
C.V. (%)	4.3		4.5		16.5		2.8		15.1		13.5	

Las letras diferentes en cada fila representan diferencia significativa.

El pan control contiene mayor volumen por cada gramo de peso y de igual manera el peso perdido es mayor en comparación con los panes adicionados con 2% JOA y 2% JOA 50. Con relación al volumen específico es notable que a menor grado de hidrólisis mayor es el volumen específico, es decir, más aire incorporado, pero este no se ve reflejado en la fracción vacía, debido a su alto coeficiente de variación; sin embargo, si presenta mayor fineza a un menor grado de hidrólisis, a diferencia de la pérdida de peso en la que no se observó un comportamiento proporcional al adicionar JOA, y la humedad en la que no existen diferencias significativas entre los panes evaluados; por lo tanto, el JOA no ejerce un efecto importante en la humedad, de igual manera los coeficientes de variación de cada muestra son aceptables al ser menores al 15%, demostrando que la humedad no tiene variaciones en la misma muestra (Cuadro 15).

Cuadro 15. Efecto del grado de hidrólisis del JOA en propiedades físicas del pan.

Muestra	Propiedades físicas					
	Volumen específico (cm ³ /g)		Pérdida de peso (%)		Humedad (%)	
Control	3.35	A	11.62	B	33.06	A
C. V. (%)	-		-		0.4	
2% JOA	2.71	D	9.41	C	33.71	A
C. V. (%)	-		-		0.5	
2% JOA 88	2.90	C	13.01	A	32.50	A
C. V. (%)	-		-		2.2	
2% JOA 50	3.02	B	8.15	D	32.78	A
C. V. (%)	-		-		4.5	
- No se presenta valor debido a que solo se evaluó una réplica.						

Las letras diferentes en cada fila representan diferencia significativa.

En el Cuadro 16 se relacionan el color de la corteza y la miga, donde se observa que los panes evaluados presentaron similitud en el tono amarillo de sus cortezas, pero se obtuvo diferencia en la luminosidad y el croma rojo, donde en ambos casos el pan con 2% JOA no se asemejó a ningún otro pan y el pan con 2% JOA 50 fue semejante al pan control, en estos dos parámetros de color se observó que la

adición de JOA a diferentes grados de hidrólisis si provocó cambios en la corteza; ya que tiende a ser más luminoso a un alto grado de hidrólisis y con un croma rojo mayor a un grado de hidrólisis bajo.

El JOA no ejerció gran efecto en la miga, puesto que la luminosidad y el tono amarillo se obtuvieron en las cuatro muestras de panes evaluadas. En donde se observó un efecto fue en el parámetro *a*, predominando el croma verde, pero siendo este mayor cuando no se adicionó el JOA, y siendo similar en los panes con 2% JOA 50 y 2% JOA 88, estos a su vez son similares con el pan control y el pan con 2% JOA, pero estos últimos dos presentan diferencias significativas.

En general, la miga presentó mayor luminosidad y menor intensidad de tono amarillo en comparación con la corteza. Los azúcares no fermentados durante el procesamiento de la masa imparten el color por medio de reacciones químicas (reacciones de Maillard y de caramelización), por lo que también se ve favorecida o no la reacción al tener más de un azúcar simple que al tener sólo el disacárido, al contener una menor cantidad de azúcares el efecto de Maillard es débil (Llavina Nadal y Pujol Fornos, 2004).

Cuadro 16. Efecto del grado de hidrólisis del JOA en el color de corteza y miga.

Muestra	Color											
	Corteza						Miga					
	<i>L</i>		<i>a</i>		<i>b</i>		<i>L</i>		<i>a</i>		<i>b</i>	
Control	55.92	C	9.68	A	33.41	A	71.18	A	-5.03	B	21.09	A
C.V. (%)	1.8		7.9		3.3		2.5		2.8		1.6	
2% JOA	66.50	A	4.19	C	35.04	A	71.61	A	-4.71	A	20.44	A
C.V. (%)	1.9		21.5		2.8		0.5		1.1		1.2	
2% JOA 88	61.14	B	7.14	B	34.67	A	72.87	A	-4.81	AB	20.55	A
C.V. (%)	0.8		7.8		2.5		1.9		2.7		4.7	
2% JOA 50	57.39	BC	9.69	A	34.77	A	73.17	A	-4.87	AB	21.57	A
C.V. (%)	4.4		11.3		2.6		1.7		0.6		0.9	

Las letras diferentes en cada fila representan diferencia significativa.

El perfil de textura a dos porcentajes de deformación demostró que no existe diferencia significativa al adicionar JOA y aunque no se presenta una tendencia clara en función del grado de hidrólisis, destacaron el módulo de deformabilidad y la dureza del pan adicionado con 2% JOA 50 (Cuadros 17 y 18). Así mismo en la Figura 15 se muestra una curva de las tres repeticiones obtenidas en cada pan adicionado con JOA y en el pan control, en ella se observa principalmente que el módulo de deformabilidad presentó la misma tendencia en todos los panes.

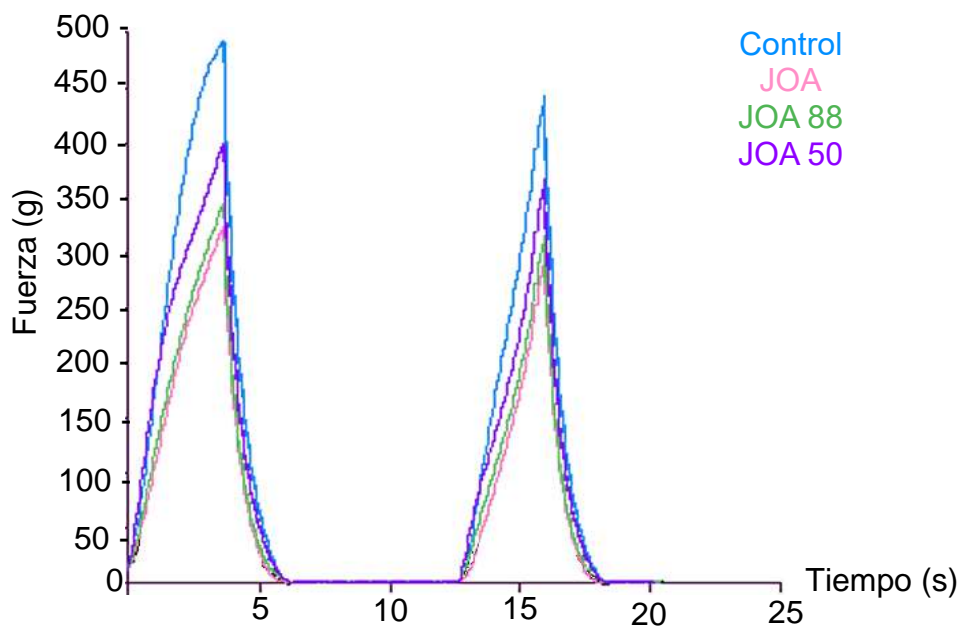


Figura 15. Efecto del grado de hidrólisis del JOA en el TPA al 20% de deformación con respecto a su altura.

Cuadro 17. Efecto del grado de hidrólisis del JOA en el TPA a 20% de compresión.

Muestra	Distancia de compresión = 20%									
	Dureza (g)		Cohesividad		Elasticidad Total		Resiliencia		Módulo de deformabilidad	
Control	355.39	A	0.64	A	0.95	A	0.30	A	121.60	A
C.V (%)	5.7		3.8		3.3		1.9		7.5	
2% JOA	333.29	A	0.62	A	0.93	A	0.31	A	114.07	A
C.V (%)	26.7		12.6		4.3		20.6		56.0	
2% JOA 88	324.89	A	0.63	A	0.94	A	0.29	A	113.98	A
C.V (%)	15.2		5.2		3.5		1.7		13.1	
2% JOA 50	396.90	A	0.61	A	0.88	A	0.28	A	159.27	A
C.V (%)	2.5		2.0		3.4		2.6		10.5	

Cuadro 18. Efecto del grado de hidrólisis del JOA en el TPA a 40% de compresión.

Muestra	Distancia de compresión = 40%									
	Dureza (g)		Cohesividad		Elasticidad Total		Resiliencia		Módulo de deformabilidad	
Control	502.54	A	0.44	A	0.86	A	0.17	A	114.31	A
C.V (%)	3.5		0.5		2.0		1.2		2.4	
2% JOA	602.19	A	0.43	A	0.80	A	0.16	A	114.90	A
C.V (%)	12.3		4.5		3.9		8.3		11.4	
2% JOA 88	624.4	A	0.45	A	0.83	A	0.16	A	118.40	A
C.V (%)	29.2		5.3		2.0		6.6		22.2	
2% JOA 50	613.64	A	0.40	A	0.83	A	0.14	A	145.69	A
C.V (%)	7.1		8.1		3.9		9.8		12.0	

Las letras diferentes en cada fila representan diferencia significativa.









Debido a que en la mayoría de las pruebas no se presentó diferencia significativa y en donde se presentó fue en características más visuales y físicas (por ejemplo, la uniformidad de la altura, la cual se ve afectada por el proceso de moldeo y puede ser corregida fácilmente), se determinó que el jarabe orgánico de agave a utilizar sería el totalmente hidrolizado, ya que al tener un menor contenido de fructanos (0.8%) se logra manejar de manera más sencilla la adición de los mismos y se podrían corroborar los efectos debidos a su presencia.

3.2. Efecto de la concentración de fructanos de agave (FA)

El efecto de diferentes concentraciones de fructanos de agave sobre la apariencia física de los panes enteros y una de sus rebanadas se presentan en el Cuadro 19.

Como se presenta en el Cuadro 20, al adicionar una mayor concentración de FA, la apariencia empeora pues sus características cualitativas no son atractivas, como son, su baja uniformidad en la altura, la corteza corrugada y la miga muy seca, lo que provoca un mayor desmoronamiento al corte; sin embargo, la adición de diferentes concentraciones de FA no presenta una tendencia, pues con el pan adicionado con 3% FA la apariencia física fue agradable y equivalente a la del pan control en todas sus características cualitativas y semejante al pan 2% JOA en su apariencia de miga y su desmoronamiento al corte, al contrario del pan con 2% FA.

Cuadro 19. Panes adicionados con diferentes concentraciones de FA.

PAN	IMAGEN	
	PAN ENTERO	REBANADA DE PAN
2% FA		
3% FA		
4% FA		
5% FA		

Cuadro 20. Efecto de la concentración de FA en la apariencia de los panes.

Muestra	Altura	Uniformidad de la altura	Apariencia de la corteza (lisa)	Apariencia de la miga (seca)	Desmoronamiento al corte
Control	++++	+++++	+++++	+	+
2% JOA	++	++	+++	++	+
2% FA	+++	++++	+++++	++	++
3% FA	+++++	+++++	+++++	++	++
4% FA	+++++	+	++	+++++	+++++
5% FA	+	+++	+	++++	++++

“+” representa el nivel en el que se encontraba cada muestra (comparando entre las mismas). Por ejemplo, el pan con 5% FA presentó menor altura, al contrario del pan comercial que fue el más alto.

Se presentaron diferencias significativas en las características de la miga al adicionar FA, por lo que si impactaron en la estructura interna de los panes. Los panes que presentaron similitudes con el pan control y el pan 2% JOA, a la vez, fueron principalmente los adicionados con 2 y 3% FA, y el que mayormente presentó diferencias fue el de 4% FA, pues influyó esencialmente en los poros (mayor número y área total, y menor clasificación de tamaños) y en la fineza, además de que la miga es más suave y cohesiva, lo que provoca el desmoronamiento al corte tan elevado (Cuadro 21). En promedio, el pan control se clasificó en 6 tamaños de poros, los panes con 2, 3 y 5% FA presentaron 5 tamaños y el pan con 4% FA únicamente se divide en 4 tamaños, como se representan en la Figura 16 con la clasificación de tamaños mediante el uso de distintos colores para cada grupo.

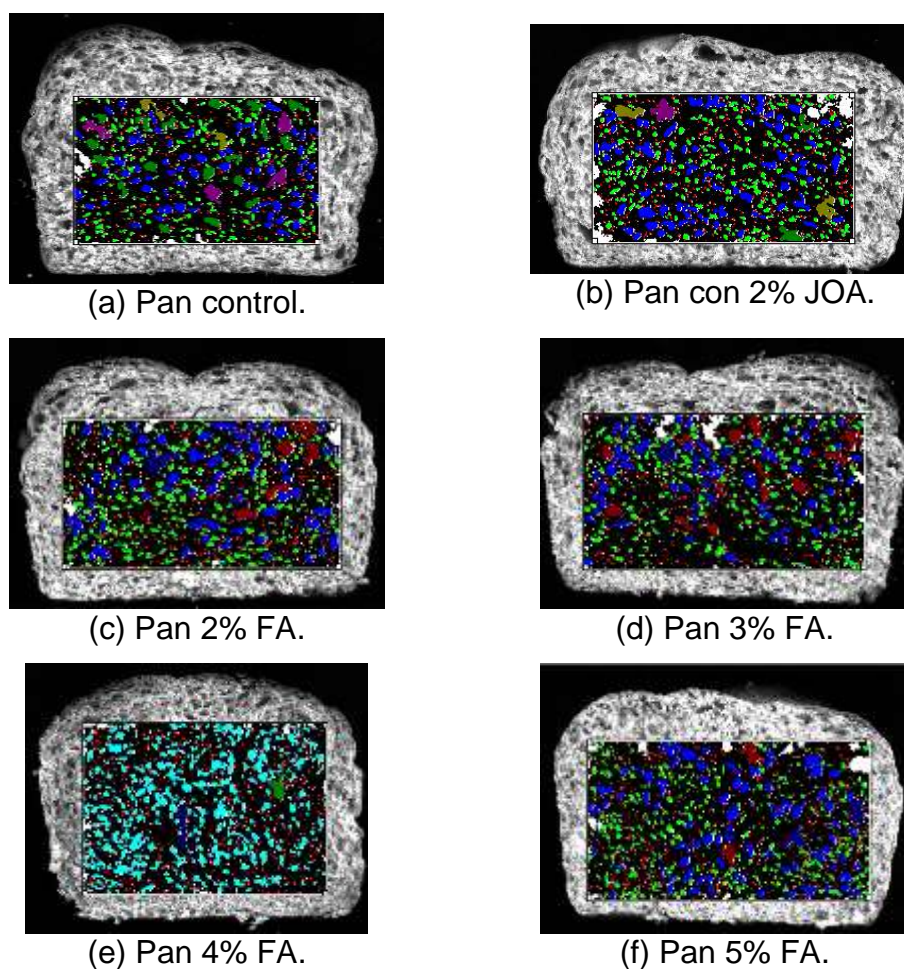


Figura 16. Efecto de la concentración de FA en la clasificación de poros.

Cuadro 21. Efecto de la concentración de FA en las características de la miga.

Muestra	Análisis de imagen											
	Área evaluada (mm ²)		Número de poros		Área total de poros (mm ²)		Fineza (poros/cm ²)		Fracción vacía		Uniformidad	
Control	4502.50	CD	1231.3	C	835.0	ABC	0.27	C	0.19	A	6.77	B
C.V. (%)	2.6		1.7		3.0		4.2		2.3		8.8	
2% JOA	4191.85	D	1420.0	BC	770.9	BC	0.34	AB	0.18	A	8.31	AB
C. V.(%)	4.9		9.8		3.9		5.2		2.7		7.7	
2% FA	4869.67	BC	1604.3	B	949.3	AB	0.33	B	0.19	A	7.29	B
C.V. (%)	2.6		5.4		8.2		5.7		5.9		6.2	
3% FA	5019.21	B	1533.7	B	891.2	AB	0.31	BC	0.18	AB	7.22	B
C.V. (%)	1.7		4.2		8.6		3.5		8.4		6.3	
4% FA	5742.72	A	1974.3	A	1009.4	A	0.34	AB	0.18	AB	8.47	AB
C.V. (%)	0.9		3.5		9.1		3.9		8.3		13.0	
5% FA	4538.46	CD	1687.0	B	665.2	C	0.37	A	0.15	B	9.91	A
C.V. (%)	6.0		9.27		15.82		3.41		11.36		4.54	

Las letras diferentes en cada fila representan diferencia significativa.

Las propiedades físicas de los panes adicionados con FA demostraron que su uso impactó en cada uno de ellos, puesto que se presentaron diferencias significativas, pero no se estableció dicha diferencia de manera proporcional, ya que el volumen específico es menor en el pan adicionado solamente con JOA y en el pan adicionado con JOA y con 4% FA, de igual manera este último pan demostró que no se siguió una tendencia en la pérdida de peso, dado que aunque pareciera que mientras mayor es la concentración de FA menor es la pérdida de peso, ésta difiere, debido a que con 5% FA aumenta, y en cuanto a la humedad se presentaron disminuciones al adicionar 2, 4 y 5% FA, el pan adicionado con 3% FA fue el único estadísticamente similar al pan control (Cuadro 22).

Sin embargo, se infirió que el proceso fue bien ejecutado al obtener valores en las tres propiedades físicas que se encuentran dentro de los intervalos teóricos expuestos por Rubel, 2015; Macoto Cálix, 2014 y la NMX-F-159-S-1983, en donde se representan los valores de pan blanco de caja convencional y adicionado de

inulina de achicoria y de topinambur, demostrando que la pérdida de peso está relacionada con la humedad que se presenta antes y después del horneado.

Cuadro 22. Efecto de la concentración de FA en las propiedades físicas del pan.

Muestra	Propiedades físicas					
	Volumen específico (cm ³ /g)		Pérdida de peso (%)		Humedad (%)	
Control	3.35	A	11.62	A	33.06	AB
C.V. (%)	-		-		0.4	
2% JOA	2.71	E	9.41	B	33.71	A
C.V. (%)	-		-		0.5	
2% FA	2.85	C	8.71	C	30.79	C
C.V. (%)	-		-		3.7	
3% FA	3.17	B	8.64	D	32.48	AB
C.V. (%)	-		-		0.5	
4% FA	2.65	F	7.74	F	31.84	BC
C.V. (%)	-		-		0.6	
5% FA	2.82	D	8.24	E	30.74	C
C.V. (%)	-		-		1.4	

- No se presenta valor debido a que solo se evaluó una réplica.

Las letras diferentes en cada fila representan diferencia significativa.

La corteza de los panes adicionados con 2% JOA y FA a diferentes concentraciones presentaron diferencias significativas en sus parámetros de color, en las cuales se percibió una tendencia; en cuanto a la luminosidad y el tono amarillo fue claro que cuando se adicionó JOA a los panes, éstos aumentan; pero al comenzar a elevar la concentración de FA son menos luminosos y con un tono amarillo en menor intensidad. En lo que respecta al croma rojo, la adición de JOA lo disminuyó y la suma de FA fue aumentándolo; los tres parámetros presentaron dichas tendencias hasta el límite de 4% FA, ya que al adicionar 5% FA la tendencia comenzó a cambiar (Cuadro 23).

Los FA no ejercieron un efecto importante en la luminosidad de la miga, en vista de que no se presentó diferencia significativa; en donde se observó un efecto fue en los parámetros *a* y *b*, debido a la suma de JOA y FA, ya que al emplear ambos el croma verde disminuyó y conforme se fue aumentando la concentración de FA la

intensidad aumentó, mientras que al adicionar JOA y FA el tono amarillo fue mayor y al ir elevando la concentración de FA se presentó una disminución. En general la miga presentó mayor luminosidad y menor intensidad de tono amarillo en comparación con la corteza (Cuadro 23).

Cuadro 23. Efecto de la concentración de FA en el color de corteza y miga.

Muestra	Color											
	Corteza						Miga					
	L		a		b		L		a		b	
Control	55.92	DE	9.68	AB	33.41	AB	71.18	A	-5.03	C	21.09	AB
C.V. (%)	1.8		7.9		3.3		2.5		2.8		1.6	
2% JOA	66.50	A	4.19	C	35.04	A	71.61	A	-4.71	BC	20.44	B
C.V. (%)	1.9		21.5		2.8		0.5		1.1		1.2	
2% FA	61.92	BC	7.60	B	34.39	A	71.17	A	-4.11	A	21.56	A
C.V. (%)	2.4		12.8		12.8		1.8		2.0		1.7	
3% FA	58.07	CD	9.89	AB	33.97	AB	74.03	A	-4.15	A	20.63	B
C.V. (%)	4.6		14.8		3.2		1.7		3.6		1.5	
4% FA	53.02	E	11.77	A	31.01	B	71.88	A	-5.07	C	20.37	B
C.V. (%)	3.1		3.0		3.1		1.4		1.1		1.3	
5% FA	65.24	AB	4.19	C	33.12	AB	69.74	A	-4.27	AB	21.09	AB
C.V. (%)	2.1		29.1		4.0		2.4		7.6		1.0	

Las letras diferentes en cada fila representan diferencia significativa.

Se manifestaron diferencias significativas en la mayoría de los parámetros texturales, lo que reveló que el uso de FA afectó en la textura de los panes, el empleo de 2 y 3% FA proporcionó durezas, cohesividades, elasticidades y resiliencias medias, pero no se pudo establecer una relación entre los parámetros de textura y la concentración de FA, ya que con 4% no se apreció una tendencia debido a sus coeficientes de variación muy elevados, lo que se asocia con una muestra heterogénea. Con 5% la dureza fue mayor y semejante a la del pan control, incluso al comparar con el pan elaborado únicamente con JOA (Cuadros 24 y 25).

A una deformación del 20% respecto a la atura de los panes se demostró que no existe diferencia significativa al adicionar FA sobre los parámetros de textura: cohesividad, resiliencia y módulo de deformabilidad, este último se puede apreciar

en la Figura 17, donde se observa que todas las curvas (una curva de las tres repeticiones obtenidas en cada pan) siguieron la misma tendencia al iniciar el primer ciclo del análisis. A 40% de compresión la elasticidad total fue el parámetro textural en donde los FA no tuvieron efecto significativo.

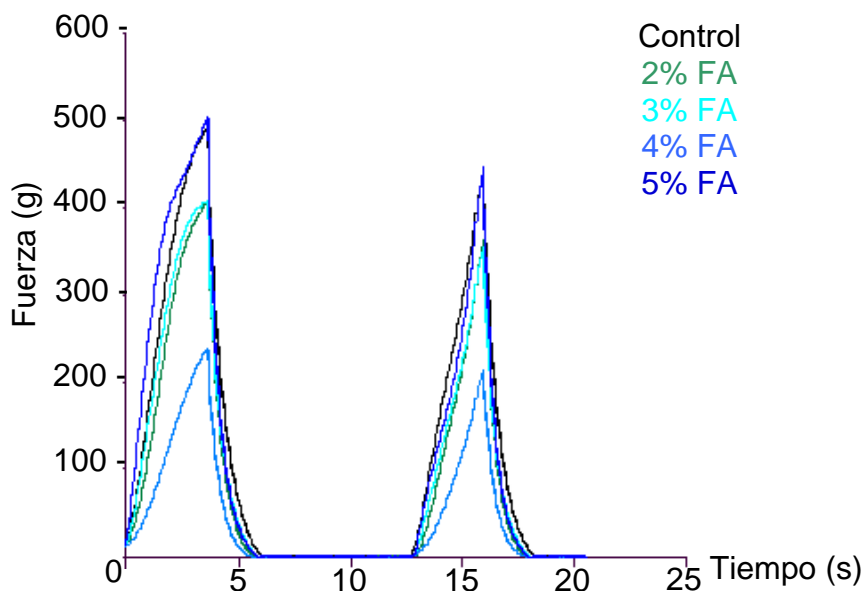


Figura 17. Efecto de la concentración de FA en el TPA al 20% de deformación con respecto a su altura.

Cuadro 24. Efecto de la concentración de FA en el TPA a 20% de compresión.

Muestra	Distancia de compresión = 20%									
	Dureza (g)		Cohesividad		Elasticidad Total		Resiliencia		Módulo de deformabilidad	
Control	355.39	AB	0.64	A	0.95	A	0.30	A	121.60	A
C.V (%)	5.69		3.77		3.30		1.89		7.48	
2% JOA	333.29	AB	0.62	A	0.93	AB	0.31	A	114.07	A
C. V. (%)	26.68		12.60		4.33		20.58		56.00	
2% FA	423.78	AB	0.58	A	0.90	AB	0.27	A	157.38	A
C.V (%)	11.15		2.85		3.14		4.93		14.27	
3% FA	444.93	AB	0.55	A	0.92	AB	0.26	A	182.48	A
C.V (%)	23.06		5.66		2.89		3.27		43.88	
4% FA	258.30	B	0.60	A	0.91	AB	0.28	A	88.87	A
C.V (%)	31.10		3.14		2.31		3.92		41.65	
5% FA	489.83	A	0.54	A	0.86	B	0.24	A	195.54	A
C.V. (%)	7.71		7.76		2.18		10.26		24.32	

Cuadro 25. Efecto de la concentración de FA en el TPA a 40% de compresión.

Muestra	Distancia de compresión = 40%									
	Dureza (g)		Cohesividad		Elasticidad Total		Resiliencia		Módulo de deformabilidad	
Control	502.54	B	0.44	A	0.86	A	0.17	A	114.31	B
C.V (%)	3.45		0.53		2.02		1.24		2.35	
2% JOA	602.19	AB	0.43	AB	0.80	A	0.16	AB	114.90	B
C. V. (%)	12.29		4.46		3.87		8.27		11.39	
2% FA	762.33	A	0.36	AB	0.82	A	0.13	C	218.56	A
C.V (%)	10.88		7.22		6.37		9.67		26.84	
3% FA	622.24	AB	0.35	B	0.78	A	0.12	C	149.12	AB
C.V (%)	13.67		12.34		10.92		14.66		17.29	
4% FA	492.78	B	0.37	AB	0.78	A	0.13	BC	122.47	B
C.V (%)	23.70		6.47		9.10		6.11		32.82	
5% FA	728.22	AB	0.35	B	0.77	A	0.12	C	151.84	AB
C.V. (%)	16.56		8.95		2.82		11.15		15.54	

3.3. Viscoelasticidad de la masa

Como se observa en la Figura 18 al realizar un barrido de deformación se estableció que la zona viscoelástica lineal se encontró en el intervalo de 0.01 – 0.02% de deformación por lo que se prosiguió con el barrido de frecuencia a 0.02% de deformación.

Con el barrido de frecuencia (Figura 19) se observó que tanto el módulo de almacenamiento (G') como el módulo de pérdida (G'') aumentaron conforme se aumentó la frecuencia, lo que indicó que las masas sin levadura no son del todo sólidas, presentando un comportamiento viscoelástico, que depende tanto del esfuerzo como del tiempo (Rao, 2014; Navickis, 1989), pero al estar en todas las masas G' por arriba de G'' demostraron un mayor carácter sólido, por lo que la masa almacena más energía de la que pierde, siendo así su recuperación más fácil de obtener conforme pasa el tiempo. Al tener mayor carácter sólido se fundamentó que los FA afectan a la matriz del pan en lo que respecta a la estructura del gluten y el almidón, provocando así una mayor dureza, como se observa en los Cuadros 24 y 25.

El módulo de almacenamiento disminuyó en el siguiente orden: 3% FA, 4% FA, Control y 2% JOA, esto se interpreta de forma tal que, la adición de FA tuvo efecto significativo en la reología de la masa, pues con la variación de las concentraciones (3 y 4%) no se presentó una diferencia significativa en comparación con el pan adicionado con 2% JOA y el pan control, con base en la Figura 19. Entonces las masas con FA exhibieron un comportamiento con mayor carácter sólido y más energía almacenada para su recuperación, y las que contienen una concentración baja (2% JOA) se presentaron menos elásticas, incluso al comparar con el pan control, indicando entonces una fuerza mayor en la masa, dada por las proteínas de la red de gluten, la cual se ve limitada en su desarrollo debido al azúcar y su mayor afinidad al agua (Hayta y Schofield, 2005; Van Bockstaele *et al.*, 2008; Quaglia, 1991).

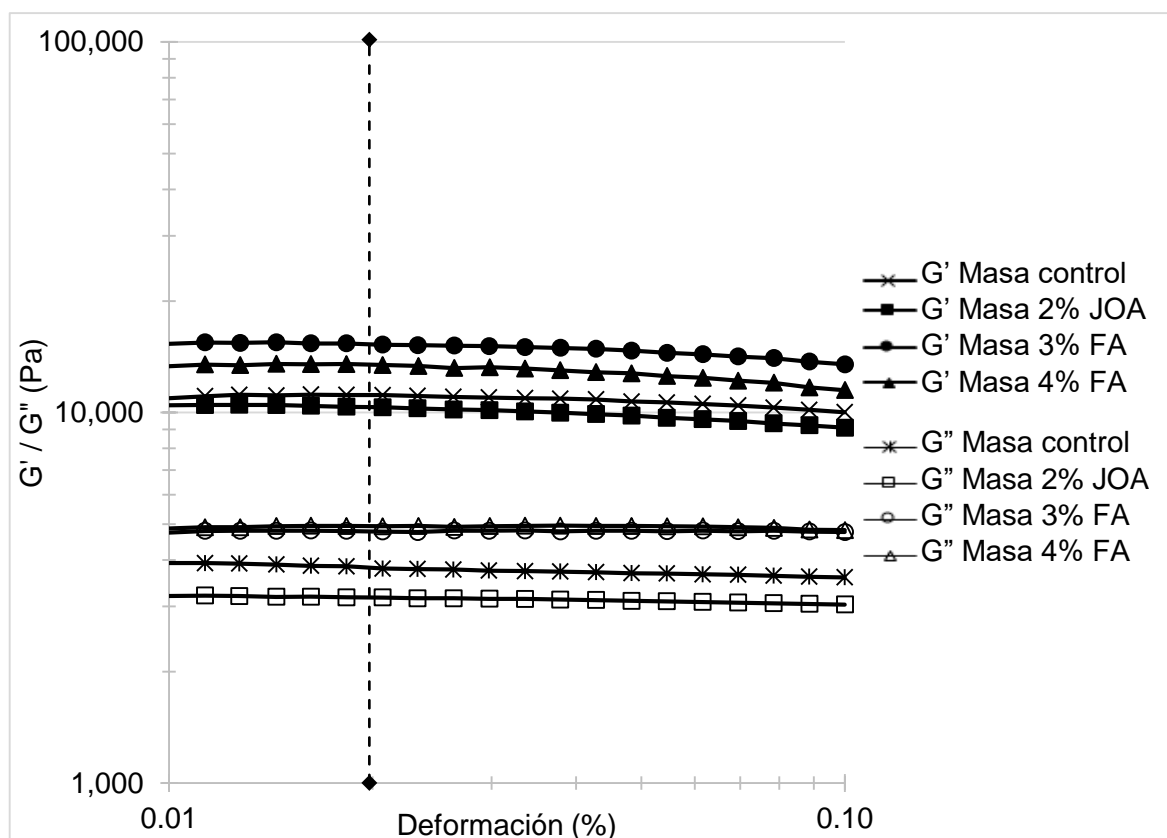


Figura 18. Barrido de deformación.

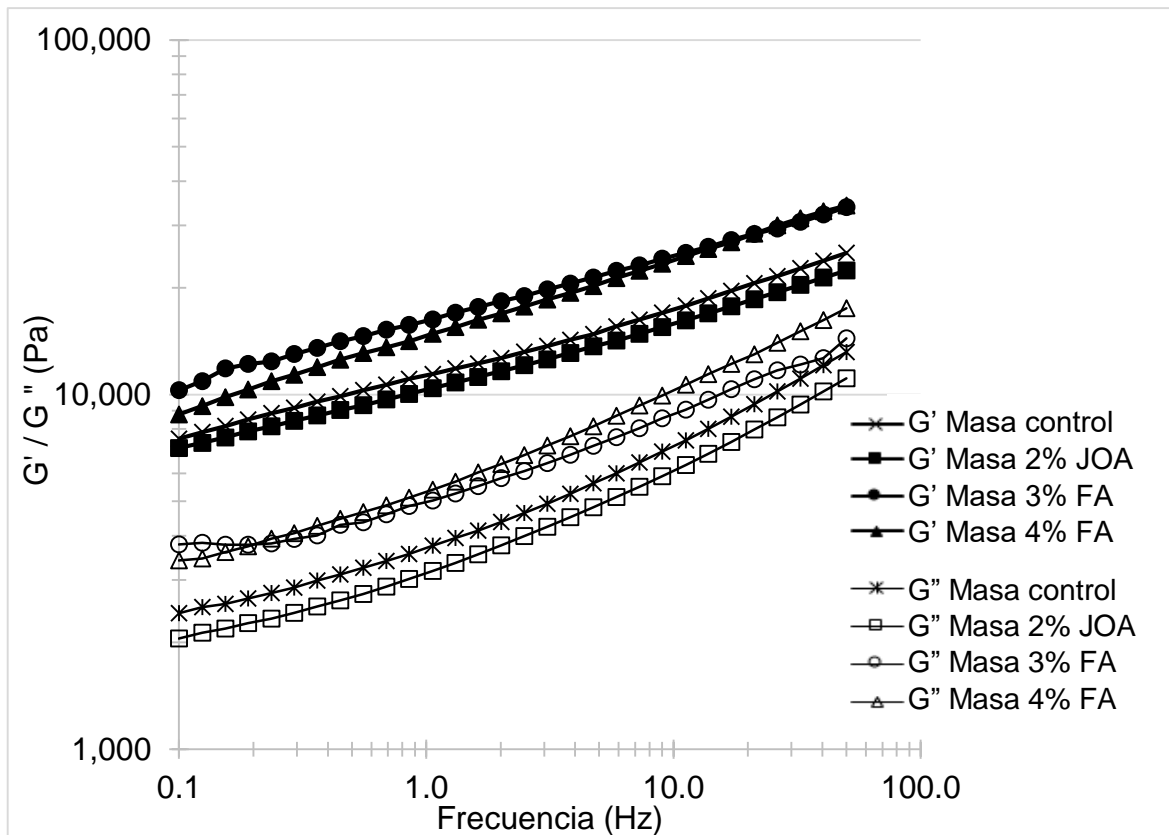


Figura 19. Barrido de frecuencia.

3.4. Envejecimiento del pan blanco de caja

Al evaluar los panes después de cinco días de su elaboración, su apariencia declina, pues sus características cualitativas no son atractivas (Figura 20).

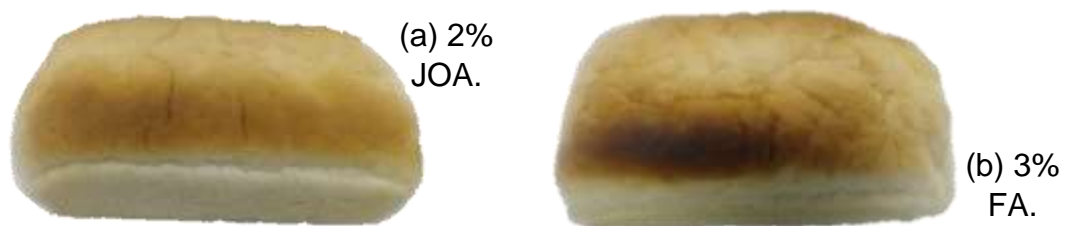


Figura 20. Pan envejecido.

El volumen específico demostró que no existe un comportamiento proporcional con el uso de FA y JOA durante el envejecimiento, pues en el pan control y el pan con 3% FA el volumen específico disminuyó, y en el pan con 2% JOA y el pan con 4%

FA se observó un aumento (Figura 21). Al primer día, el mayor volumen específico lo presentó el pan control con 3.3 cm³/g, mientras que a los 5 días el pan con 4% FA supero el valor con 4.13 cm³/g demostrando así un aumento de volumen concordando con Pérez García *et al.*, (2009), quien argumenta que ciertos aditivos tienen la tendencia a aumentar y mejorar el volumen específico del pan, y en los panes donde el volumen específico disminuyó puede deberse a que durante el proceso de elaboración del pan, ya sea en el amasado y formado de la masa se va generando la estructura del gluten, la cual retiene el gas producido durante la posterior fermentación para alcanzar el volumen deseado.

Como se presenta en las Figura 22 - 25, el resto de las propiedades evaluadas durante el envejecimiento tuvieron un comportamiento proporcional con el paso del tiempo; en el caso de la humedad, la elasticidad total y la cohesividad se presentó una disminución, esta última se refleja en la apariencia del pan, principalmente con su corteza corrugada en exceso a consecuencia de que la humedad del interior migra al exterior y se evapora, perdiendo peso y provocando una miga más seca y a su vez un desmoronamiento al corte elevado; y en el caso de la dureza el tiempo le afecto haciendo más dura la miga.

Respecto a la Figura 22, el pan con 4% FA presentó mayor pérdida de humedad, seguido del pan con 3% FA y finalmente 2% JOA, por lo que tiene relación con la cantidad de fructanos presentes en los panes, formando nuevos enlaces almidón – gluten y exhibiendo fenómenos más complejos en la miga debido a que la pérdida y redistribución de agua del gluten al almidón durante el horneado y durante el almacenamiento dan lugar a un producto seco contribuyendo al endurecimiento (Pérez García *et al.*, 2009).

En el caso de la elasticidad total (Figura 23), ésta disminuyó con la adición de FA y JOA y con el tiempo, a excepción de la formulación con 2% de JOA, la cual se conservó igual, aunque su cohesividad si cambió, como también pasó con el resto

de los panes evaluados. En vista de que al adicionar los FA el desarrollo del gluten fue en menor proporción y al adicionar únicamente JOA el gluten no se vio afectado de la misma manera, se determinó que el gluten al ser la red tridimensional que otorga al pan su elasticidad y fuerza de los enlaces internos el contenido de azúcares ayudo a su formación, y la sustitución de una parte de la harina por los FA fue la responsable de esa debilidad en el gluten (Villanueva Flores, 2014; Hosene, 1994).

El endurecimiento de la miga, se provoca por dos principales razones: la transferencia de humedad de la miga hacia la corteza y la retrogradación del almidón durante el almacenamiento, la cual depende de la relación inicial de almidón-agua y de la pérdida de la misma durante el almacenamiento (Pérez García *et al.*, 2009; Cauvain y Young, 2002), en los panes evaluados se tuvo un incremento en la dureza como era de esperarse a los cinco días de elaboración respecto al primer día, pero esta se vio afectada debido a la presencia de los azúcares, puesto que en los fructanos se encuentran hidrolizados, entonces la forma como interaccionan es diferente a un azúcar simple, en el pan con 4% FA fue del 194.60%, del 61% en el pan control y del 16.80% en el pan con 2% JOA (Figura 25).

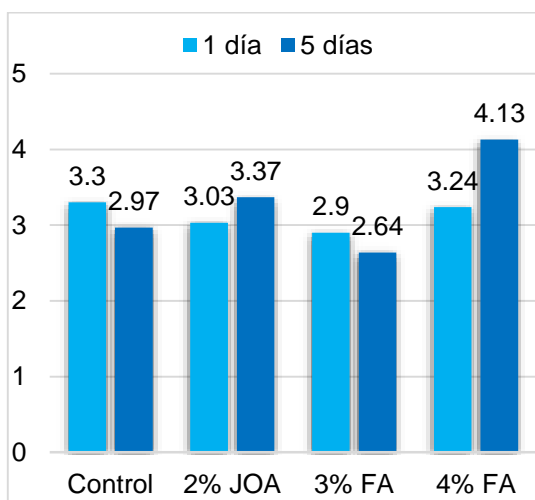


Figura 21. Envejecimiento en volumen específico.

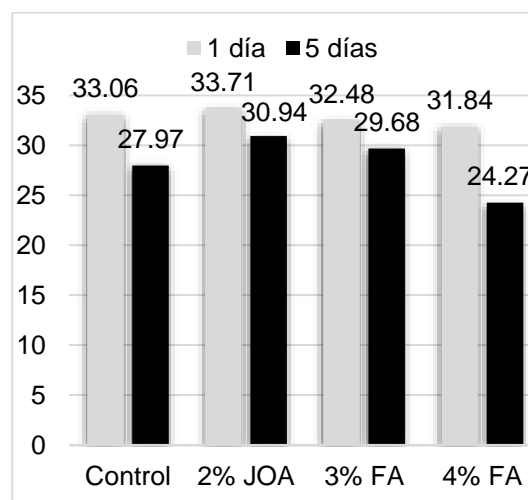


Figura 22. Envejecimiento en humedad.

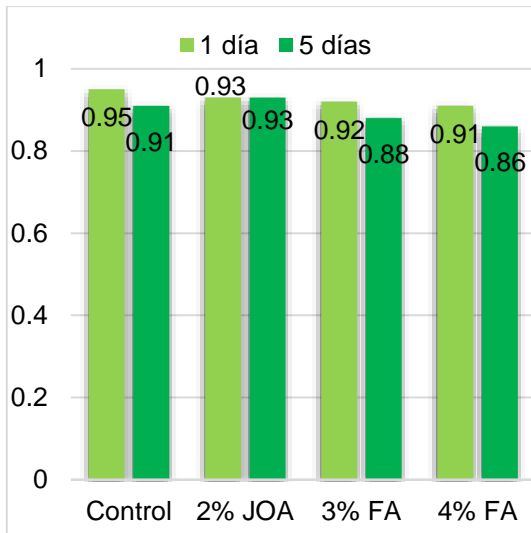


Figura 23. Envejecimiento en elasticidad total.

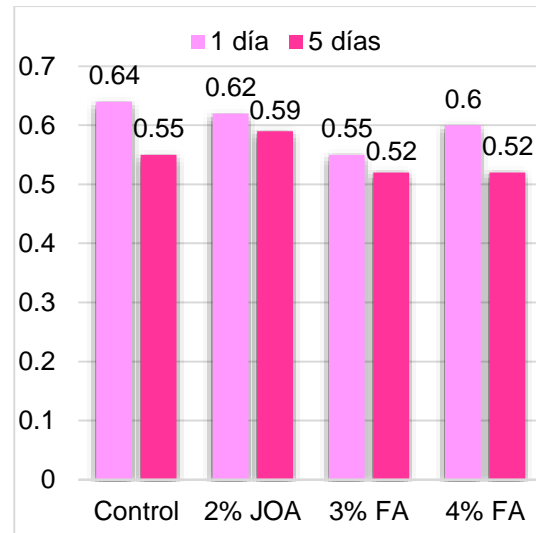


Figura 24. Envejecimiento en cohesividad.

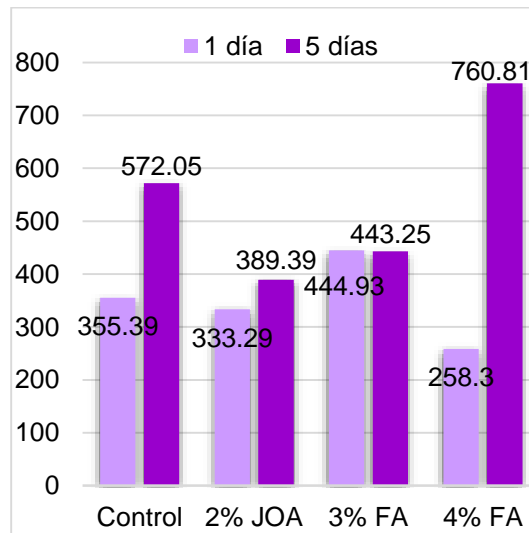


Figura 25. Envejecimiento en dureza.

CONCLUSIONES

Se determinó que el jarabe orgánico de agave a utilizar en el objetivo dos sería JOA ya que al tener un menor contenido de fructanos (0.8%) se logró manejar de manera más sencilla la adición de diferentes concentraciones de FA, esto debido a que en la mayoría de las pruebas realizadas no se presentó una diferencia significativa en los resultados, de manera que lo más notable fue un volumen específico menor, mayor humedad, altura y uniformidad semejante a la del pan control, además de perder menos peso. La apariencia de la miga en este pan no fue tan seca y en cuanto a una comparación entre JOA y control no hay diferencia significativa y la uniformidad del pan con 2% JOA es estadísticamente igual al pan control. En perfil de textura con el JOA se obtuvo menor dureza, mientras que el JOA 50 presentó mayor dureza y disminuyó su elasticidad con respecto al resto de los panes adicionados con JOA.

En lo que respecta al efecto de la concentración de fructanos de agave, el pan con las propiedades de calidad buscadas fue el de 3% debido a que se obtuvo el mayor volumen específico y humedad, la altura fue buena y uniforme y la apariencia en la corteza fue lisa. Con 2, 3 y 4% de fructanos, las características de la miga son similares, pero con 4% se obtuvieron más poros, así como mayor fineza y uniformidad, además de que la miga es más suave y cohesiva, lo que provoca un mayor desmoronamiento al corte. Con 5% de fructanos, la miga era compacta y con muchos poros, pero muy pequeños y en consecuencia con una fracción vacía muy baja y la mayor dureza. Lo anterior muestra que el máximo contenido de fructanos que se puede incorporar es de 3% y dependiendo de las características deseadas se puede elegir la concentración de fructanos a emplear entre 2 y 3%, ya que sus atributos son similares con el pan control, además de características cualitativas favorables.

La concentración de 4% FA es factible a utilizar, pero los inconvenientes que se presentan son el desmoronamiento y una apariencia poco agradable debido a su poca uniformidad en la altura y su corteza corrugada, además de parámetros texturales con muy altos coeficientes de variación, lo que demuestra que fue la muestra más heterogénea.

Los panes obtenidos con 2% y 3% FA permitieron cumplir con el objetivo general, el cual era adicionar jarabe y fructanos de agave sin presentar cambios indeseables en las propiedades reológicas, físicas y texturales de la masa y el pan blanco de caja. El efecto de la adición de jarabe orgánico de agave depende del grado de hidrólisis, a un menor grado afecta de manera favorecedora al color de la corteza y la miga principalmente, puesto que al estar hidrolizados las fructosas que contienen están más disponibles y por lo tanto el grado de la reacción de Maillard y de caramelización es más notable. Al tener un grado de hidrólisis mayor y adicionar los fructanos de agave se encuentra un equilibrio de dichos efectos en las concentraciones indicadas en los párrafos anteriores.

REFERENCIAS

- A. I. B. (1999). AIB Standard Procedure. *White Pan Bread Firmness Measurement*, 1. USA: Research Department.
- AACC. (2000). Method 10-05.01. *Guidelines for Measurement of Volume by Rapeseed Displacement*. USA: AACC International Approved Methods.
- Alvis, A., Pérez, L. J., y Arrazola, G. S. (2011). Estudio de propiedades físicas y viscoelásticas de panes elaborados con mezclas de harinas de trigo y de arroz integral. *Información Tecnológica*, 22 (4), 107-116.
- Arrizon, J., Morel, S., Gschaedler, A., y Monsan, P. (2010). Comparison of the water-soluble carbohydrate composition and fructan structures of *Agave tequilana* plants of different ages. *Food Chemistry*, 122 (1), 123-130.
- Arvidson, S. A., Rinehart, B., y Gadala-Maria, F. (2006). Concentration regimes of solutions of levan polysaccharide from *Bacillus sp.* *Carbohydrate Polymers*, 65, 144-149.
- Asociación Nacional de Proveedores Profesionales de la Industria del Pan, Repostería y Similares A. C. (2016). Mexipan. Feria internacional de la industria del pan. *Industria de la panificación, datos estadísticos* (págs. 1-25). Ciudad de México: 14a edición.
- Badui Dergal, S. (2013). *Química de los Alimentos* (Quinta ed.). México: Pearson Educación.
- Barriga, X. (2003). *Panadería Artesana, Tecnología y Producción*. España: Montagud Editores, S. A.
- Bautista Justo, M., García Oropeza, L., Salcedo Hernández, R., y Parra Negrete, L. A. (2001). Azúcares en agaves (*Agave tequilana* Weber) cultivados en el

- estado de Guanajuato. *Acta Universitaria. Universidad de Guanajuato*, 11 (1), 33-38.
- Bertrand, D., Le Guernevé, C., Marion, D., Devaux, M. F., y Robert, P. (1992). Description of the textural appearance of bread crumb by video image analysis. *Cereal Chemistry*, 69 (3), 257-261.
- Bourges, H., Casanueva, E., y Rosado, J. L. (2009). *Recomendaciones de Ingestión de Nutrientes para la Población Mexicana* (Tomo 2). México: Editorial Médica Panamericana.
- Brasil, J. A., Silveira, K. C., Salgado, S. M., Livera, A. V., Faro, Z. P., y Guerra, N. B. (2011). Effect of the addition of inulin on the nutritional, physical and sensory parameters of bread. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 47 (1), 185-191.
- Calaveras, J. (2004). *Nuevo Tratado de Panificación y Bollería* (Segunda ed.). España: AMV Ediciones y Mundi-Prensa.
- Cámara Nacional de la Industria de Panificación. (2016). *De panadero a panadero*. Madrid, España: The Cube Company Group.
- Casas Alencáster, N., y Pardo García, D. G. (2005). Análisis de perfil de textura y propiedades de relajación de geles de mezclas almidón de maíz ceroso entrecruzado-gelano. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 4 (1), 107-121.
- Cauvain, S. P., y Young, L. S. (2002). *Fabricación de pan*. Editorial Acribia S.A.
- Charley, H. (1997). Pan de levadura. En *Tecnología de Alimentos. Procesos Químicos y Físicos en la Preparación de Alimentos* (H. Charley, ed), pp. 277-304. México: Limusa.
- Cherbut, C. (2002). Inulin and oligofructose in the dietary fibre concept. *British Journal of Nutrition*, 87 (2), S159-S162.

- Chiavaro, E., Vittadini, E., y Corradini, C. (2007). Physicochemical characterization and stability of inulin gels. *European Food Research and Technology*, 225 (1), 85-94.
- Civille, G. V., y Szczesniak, A. S. (1973). Guidelines to training a texture profile panel. *Journal of Texture Studies*, 4, 204-223.
- Delzenne, N., Daubioul, C., Neyrinck, A., Lasa, M., y Taper, H. (2002). Inulin and oligofructose modulate lipid metabolism in animals: review of biochemical events and future prospects. *British Journal of Nutrition*, 87 (2), S255-S259.
- Escudero, E., y González, P. (2006). La fibra dietética. *Nutrición Hospitalaria*, 21 (2), 61-72.
- Fikry Che Pa, N., Ling Chin, N., Aniza Yusof, Y., y Abdul Aziz, N. (2013). Measurement of bread crumb texture via imaging of its characteristics. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 11 (2), 48-55.
- Franck, A. (2002). Technological functionality of inulin and oligofructose. *British Journal of Nutrition*, 87 (2), S287-S291.
- Gan, Z., Gaillard, T., Ellis, P., Angold, R., y Vaughan, J. G. (1992). Effect of outer bran layers on the loaf volume of wheat bread. *Journal of Cereal Science*, 15 (2), 151-163.
- Gil Hernández, Á., y Serra Majem, L. (2010). *Libro Blanco del Pan*. Madrid, España: Editorial Médica Panamericana.
- Hager, A. S., Ryan, L. A., Schwab, C., Gänzle, M. G., O'Doherty, J. V., y Arendt, E. K. (2011). Influence of the soluble fibres inulin and oat B-glucan on quality of dough and bread. *European Food Research and Technology*, 232 (3), 405-413.
- 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 (3), 1092-1096.

- Hayta, M., y Schofield, J. D. (2005). Dynamic rheological behavior of wheat glutes during heating. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85 (12), 1992-1998.
- He, H., y Hosney, R. C. (1991). Differences in gas retention, protein solubility, and rheological properties between flours of different baking quality. *Cereal Chemistry*, 68 (5), 526-530.
- Hernández García, S., y Güemes Vera, N. (2010). Efecto de la adición de harina de cáscara de naranja sobre las propiedades fisicoquímicas, texturales y sensoriales de salchichas cocidas. *NACAMEH*, 4 (1), 23-36.
- Hosney, R. C. (1994). *Principles of cereal science and technology* (Segunda ed.). USA: American Association of Cereal Chemists (AACC).
- Joint FAO/WHO food standards programme. (2007). Report of the 29th session of the Codex committee on nutrition and foods for special dietary uses. *Codex alimentarius commission*, (pp. 1-88). Bad Neuenahr-Ahrweiler, Germany.
- Katime Amashta, I., Mendiozabal Mijares, E., y Rojas de Gascue, B. (2002). Glosario de terminología reológica. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 3 (2), 55-77.
- Laurikainen, T., Härkönen, H., Autio, K., y Poutanen, K. (1998). Effects of enzymes in fibre-enriched baking. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 76, 239-249.
- Llavina Nadal, X., y Pujol Fornos, X. (2004). Pan de molde. En P. López Alegret, J. Boatella Riera, y R. Codony Salcedo, *Química y Bioquímica de los alimentos II* (págs. 89-103). Edicions Universitat Barcelona.
- López Sánchez, L. G. (2013). *Elaboración, control de calidad y evaluación de la actividad antidiabética de la miel de agave (Agave americana L.)*. Tesis de licenciatura, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Facultad de Ciencias.

- López Mujica, G. y Mancilla-Margalli, A. (2007). The nature of fructooligosaccharides in *Agave* plants. En *Recent Advances in Fructooligosaccharides Research* (S. Norio, B. Noureddine, y O. Shuichi, eds), pp. 47-67. Kerala, India: Research Signpost.
- López, Mujica G. y Urias Silvas, J. E. (2007). *Agave fructans as prebiotics*. En *Recent Advances in Fructooligosaccharides Research* (S. Norio, B. Noureddine, y O. Shuichi, eds.), pp 297-310. Kerala, India: Research Signpost.
- Macoto Cálix, C. J. (2014). *Evaluación de mermas en la materia prima durante la elaboración de panes en la panadería y repostería "El Hogar", Tegucigalpa, Honduras*. Tesis de licenciatura, Escuela agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.
- Magaña Barajas, E., Ramírez Wong, B., Platt L., López Ahumada, L.C., Torres Chávez, P. I. y Sánchez Machado, D. I. (2009). Caracterización viscoelástica de masas de variedades de trigos suaves. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 24 (1), 12-22.
- Magaña Barajas, E., Ramírez Wong, B., Torres Chávez, P. I., Sánchez Machado, D. I., y López Cervantes, J. (2011). Efecto del contenido de proteína, grasa y levadura en las propiedades viscoelásticas de la masa y la calidad de pan tipo francés. *Interciencia*, 36 (4), 248-255.
- Magdic, D., Horvat, D., Drezner, G., Jurkovic, Z., y Simic, G. (2006). Image analysis of bread crumb structure in relation to gluten strength of wheat. *Poljoprivreda*, 12 (1), 58-62.
- Mani, K., Eliasson, A.-C., Lindahl, L., y Trägårdh, C. (1992). Rheological Properties and breadmaking quality of wheat flour doughs made with different dough mixers. *Cereal Chemistry*, 69 (2), 222-225.
- Mariotti, M., Lucisano, M., Pagani, M., y Ng, K. P. (2009). The role of corn starch, amaranth flour, pea isolate, and Psyllium flour on the rheological properties

- and the ultrastructure of gluten-free doughs. *Food Research International*, 42 (8), 963-975.
- Martínez Cruz, E., Villaseñor Mir, H. E., Hortelano Santa Rosa, R., Pérez Herrera, P., y Espitia Rangel, E. (2015). El efecto de las bajas temperaturas sobre la calidad industrial del trigo temporal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6 (4), 793-802.
- Martínez Sánchez, J. C. (2017). Una aproximación metodológica al uso de datos de encuestas en hogares. *Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 8 (2), 59-80.
- Mellado Mojica, E., y López, M. G. (2015). Identification, classification, and discrimination of agave syrups from natural sweeteners by infrared spectroscopy and HPAEC-PAD. *Food Chemistry*, 167, 349-357.
- Mesas, J. M., y Alegre, M. T. (2002). El pan y su proceso de elaboración. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 3 (5), 307-313.
- Mezger, T. (2011). *Glosario de reología*. Recuperado el 2019, de World of Rheology: <http://www.world-of-rheology.com/es/glossary/>
- Mieles Campos Azules S. A. de C. V. (2014). *Mieles Campos Azules*. Obtenido de <http://www.camposazules.mx/mca/index.html>
- Mijangos Santiago, M. B. (1994). *Estudio de la fabricación y tratamiento de la miel de maguey*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, México.
- Miranda Mozo, H. (2015). *Desarrollo de una formulación para elaborar pan de caja libre de gluten*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Estado de México, México.
- Montañez, J. L., Victoria, J. C., Flores, R., y Vivar, M. Á. (2011). Fermentación de los fructanos del Agave tequilana Weber Azul por *Zymomonas mobilis* y

- Saccharomyces cerevisiae* en la producción de bioetanol. *Información Tecnológica*, 22 (6), 3-14.
- Muñoz Gutiérrez, I., Rodríguez Alegría, M. E., y López-Munguía Canales, A. (2007). Caracterización enzimática de fructanos. *Memorias del XII Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería*. Morelia Michoacán.
- Navickis, L. L. (1989). Rheological Changes of Fortified Wheat and Corn Flour Doughs with Mixing Time. *Cereal Chemistry*, 66 (4), 321-324.
- NMX-F-083-1986. (1986). Alimentos. *Determinación de humedad en productos alimenticios*. Norma mexicana.
- NMX-F-159-S-1983. (1983). Alimentos. *Pan blanco de caja*. Norma mexicana.
- NMX-F-516-1992. (1992). Alimentos. *Productos de panificación. Clasificación y definiciones*. Norma mexicana.
- NMX-FF-110-SCFI-2008. (2008). Productos alimenticios. *Jarabe de agave. Especificaciones y métodos de prueba*. Norma mexicana.
- Nyman, M. (2002). Fermentation and bulking capacity of indigestible carbohydrates: the case of inulin and oligofructose. *British Journal of Nutrition*, 87 (2), S163-S168.
- Olvera Carranza, C., Ávila Fernández, A., Bustillo Armendáriz, G. R., y López Munguía, A. (2015). Processing of Fructans and Oligosaccharides from Agave Plants. En V. Preedy, *Processing and impact on active components in food* (págs. 121-129). Londres, Inglaterra: Elsevier.
- Órgano Informativo del Instituto de Nutrición y Salud Kellogg's sobre la Relación entre la Nutrición y la Salud. (2009). Fibra. (P. A. Prieto Trejo, & S. Villaseñor Mendoza, Edss.) *Revista Dieta y salud*, 18, 1-36.
- Passamai, V. J., Passamai, T., Pareja, S., y Pinal, G. (2008). Fabricación de pan, comparación con la elaboración mediante energía solar. Consideraciones

- energéticas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 12, 10.09-10.16.
- Pérez García, G., Vergara Balderas, F., y Bárcenas Pozos, M. E. (2009). Efecto de hidrocoloides en las propiedades de pan recalentado en horno de microondas. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 3 (2), 26-38.
- Ponce S., J. A., Macías B., E. R., Soltero M., J. A., Fernández E., V. V., Zúñiga P., V., y Escalona B., H. B. (2008). Physical-chemical and non-linear rheological properties o aqueous solutions of agave fructans. *Revista Digital Científica y Tecnológica e-Gnosis*, 6, 1-23.
- Quaglia, G. (1991). *Ciencia y Tecnología de la Panificación*. España: Editorial Acribia, S.A.
- Ramos, A. M., e Ibarz, A. (2006). Comportamiento viscoelástico de pulpa de membrillo en función de la concentración de sólidos solubles. *Food Science and Technology*, 26 (1), 214-219.
- Rao, M. A. (2014). Rheological properties of fluid foods. En M. A. Rao, S. Rizvi, A. Datta, y J. Ahmed, *Engineering Properties of Foods* (Cuarta ed., págs. 121-178). CRC Press.
- Renzetti, S., Dal Bello, F., y Arendt, E. (2007). Microstructure, fundamental rheology and baking characteristics of batters and breads from different gluten-free flours treated with a microbial transglutaminase. *Journal of Cereal Science*, 48 (1), 33-45.
- Rios, F. (2003). *Descripción del proceso de elaboración de pan de caja y de las responsabilidades generales para el control del departamento de producción en una fabrica productora de pan de caja*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Cuautitlán Izcalli, Estado de México.
- Roberfroid, M. B. (2007). Inulin-tipe fructans: functional food ingredients. *The Journal of Nutrition*, 137 (11), S2493-S2502.

- Rosell, C. M., Santos, E., y Collar, C. (2010). Physical characterization of fiber-enriched bread doughs by dual mixing and temperature constraint using the Mixolab. *European Food Research and Technology*, 231 (47), 499-634.
- Rubel, I. A. (2015). *Estudio de las propiedades fisico-químicas, organolépticas y nutricionales de productos panificados desarrollados utilizando ingredientes no tradicionales con propiedades funcionales*. Tesis doctoral, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.
- Sivam, A. S., Sun-Waterhouse, D., Quek, S., y Perera, C. O. (2010). Properties of bread dough with added fiber polysaccharides and phenolic antioxidants: A Review. *Journal of Food Science*, 75 (8), 153-174.
- Torres, K. I., y González, M. (2015). Diseño de un tanque agitado para la etapa de hidrólisis en la producción de miel de agave. *Jóvenes en la Ciencia*, 1 (3), 22-26.
- Van Bockstaele, F., De Leyn, I., Eeckhout, M., y Dewettinck, K. (2008). Rheological Properties of Wheat Flour Dough and Their Relationship with Bread Volume. II. Dynamic Oscillation Measurements. *Cereal Chemistry*, 85 (6), 762-768.
- Vega Castro, Ó. A., De Marco, R., y Di Risio, C. (2015). Propiedades físicas y sensoriales de un pan fresco, con la adición de las enzimas Lacasa, Xilanasas y Lipasa. *Revista EIA*, 12 (24), 87-100.
- VeSID. (14 de Mayo de 2008). *Gastronomía & Cía*. Obtenido de República de las ideas: <https://gastronomiaycia.republica.com/2008/05/14/prefermentos-poolish/>
- Villanueva Flores, R. (2014). El gluten del trigo y su rol en la industria de la panificación. *Ingeniería Industrial* (32), 231-246.
- Wang, J., Rosell, C. M., y Benedito de Barber, C. (2002). Effect of the addition of different fibres on wheat dough performance and bread quality. *Food Chemistry*, 79 (2), 221-226.

- Witczak, T., Juszcak, L., Ziobro, R., y Korus, J. (2016). Rheology of gluten-free dough and physical characteristics of bread with potato protein. *Journal of Food Process Engineering*, 40 (3), 1-11.
- Zghal, M. C., Scanlon, M. G., y Sapirstein, H. D. (2002). Cellular structure of bread crumb and its influence on mechanical properties. *Journal of Cereal Science*, 36 (2), 167-176.