



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN PAN A BASE
DE HARINA DE QUINUA Y RESIDUO DE MALTA
CERVECERA”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

PRESENTA

KARLA ESTEFANIA OLVERA LEDESMA

DIRIGIDA POR

DR. CARLOS REGALADO GONZÁLEZ

SANTIAGO DE QUÉRETARO, QUERÉTARO, 2023



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales
de Información



Elaboración y caracterización de un pan a base de
harina de quinua y residuo de malta cervecera

por

Karla Estefanía Olvera Ledesma

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0
Internacional](#).

Clave RI: FQLIN-289595



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN PAN A BASE
DE HARINA DE QUINUA Y RESIDUO DE MALTA
CERVECERA”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

PRESENTA

KARLA ESTEFANÍA OLVERA LEDESMA

DIRIGIDA POR

DR. CARLOS REGALADO GONZÁLEZ

SINODALES

DR CARLOS REGALADO GONZÁLEZ

DIRECTOR

DRA GEORGINA CALDERON DOMÍNGUEZ

CODIRECTOR

DRA MONSERRAT ESCAMILLA GARCÍA

SINODAL

DR JOSÉ ANGEL GRANADOS ARVÍZU

SINODAL

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE DE CUADROS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN.....	i
1. INTRODUCCIÓN	2
2. ANTECEDENTES.....	4
2.1. Pan	4
2.2. Función del gluten en el pan	6
2.3. Residuo de malta cervecera	7
2.3.1. Pan de malta.....	10
2.4. Quinoa	11
2.4.1. Pan de quinoa.....	12
2.5. Aditivos como sustitutos de gluten	13
2.5.1. Goma xantana	13
2.5.2. Mucílago de nopal.....	14

2.6.	Pruebas de calidad panadera	16
2.6.1.	Volumen de hogaza por el método de desplazamiento de semillas.....	17
2.6.2.	Farinógrafo.....	18
2.6.3.	Alveógrafo de Chopin	19
2.7.	Digestibilidad.....	20
2.8.	Análisis de imagen.....	21
2.9.	Calorímetro diferencial de barrido.....	22
2.10.	Análisis de textura.....	23
2.11.	Cuantificación de gluten.....	24
3.	HIPÓTESIS.....	26
4.	OBJETIVOS.....	27
4.1.	General	27
4.2.	Específicos.....	27
5.	MATERIALES Y MÉTODOS	28
5.1.	Materiales y reactivos	28
5.2.	Medios de cultivo	29
5.3.	Métodos.....	29

5.3.1. Obtención de la harina de cebada	29
5.3.2. Análisis químico proximal.....	30
5.3.3. Cuantificación de gluten.....	30
5.3.4. Elaboración del pan	30
5.3.5. Caracterización de la harina	31
5.3.5.1. Pruebas farinográficas.....	31
5.3.5.2. Pruebas extensográficas y alveográficas	32
5.3.6. Caracterización del pan	32
5.3.6.1. Volumen	32
5.3.6.2. Análisis de imagen	33
5.3.6.3. Textura.....	33
5.3.6.4. Color.....	33
5.3.6.5. Microscopía electrónica de barrido.....	34
5.3.7. Pruebas microbiológicas	34
5.3.8. Evaluación sensorial	34
5.4. Diseño experimental	36
5.5. Análisis estadístico	36

6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
6.1.	Obtención de la harina de cebada	37
6.2.	Análisis químico proximal.....	37
6.3.	Cuantificación de gluten.....	40
6.4.	Diseño experimental	41
6.5.	Elaboración del pan	43
6.6.	Caracterización de la mezcla de harinas (M4).....	44
6.6.1.	Pruebas farinográficas	44
6.6.2.	Pruebas extensográficas y alveográficas.....	45
6.7.	Caracterización del pan	47
6.7.1.	Volumen.....	47
6.7.2.	Análisis de imagen.....	52
6.7.3.	Textura	55
6.7.4.	Color	57
6.7.5.	Microscopía electrónica de barrido	59
6.8.	Pruebas microbiológicas.....	63
6.9.	Evaluación sensorial	64

7.	CONCLUSIONES	66
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	67

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Aplicaciones de la malta cervecera.....	10
2. Aplicaciones actuales del mucilago de nopal en diversas áreas.....	16
3. Resultados del análisis químico proximal de harina de cebada.....	38
4. Resultados de cuantificación de gluten.....	41
5. Diseño experimental de puntos y proporciones de harina de quinua y residuo de cebada cervecera.....	42
6. Diseño experimental y proporciones de sustitutos de gluten.....	43
7. Índices farinográficos.....	45
8. Volumen de los diferentes panes obtenidos.....	49
9. Análisis de imagen de panes de harina de quinua y cebada adicionados con sustitutos de gluten.....	53
10. Color de los diferentes panes obtenidos.....	58
11. Resultados de pruebas microbiológicas y valores permitidos en NOM.....	63
12. Aceptabilidad de panes.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Proceso de elaboración de cerveza a partir de cebada cervecera.....	9
2. Tipos de calidad de los alimentos y su influencia en el proceso de producción...	17
3. Farinograma tradicional.....	19
4. Panes obtenidos.....	43
5. Farinograma de mezcla de harina de quinua y cebada cervecera.....	44
6. Miga de pan procesada usando ImageJ.....	53
7. Análisis de partículas de pan control de trigo, pan sin sustitutos de gluten y pan adicionado con sustitutos.....	55
8. Análisis de textura TPA.....	56
9. Microscopia electrónica de barrido de harinas (quinua, cebada y trigo).....	61
10. Microscopia electrónica de barrido de panes.....	62
11. Resultados de la evaluación sensorial realizada.....	65

RESUMEN

El pan, elaborado principalmente con harina de trigo, es uno de los alimentos más consumidos en el mundo desde la antigüedad. La principal proteína presente en el pan de trigo y la responsable de la mayoría de sus propiedades estructurales y sensoriales es el gluten. En México, el 2.6% de la población es celiaca, por lo que la industria ha buscado alternativas tales como el uso de harinas libres de gluten. Por otro lado, puede utilizarse el residuo de malta cervecera, que representa 2.4 millones de toneladas anuales a nivel mundial, y cuyo aprovechamiento es escaso. No obstante, los productos elaborados con harinas libres de gluten poseen propiedades de menor calidad comparados con los elaborados con trigo. Por lo anterior, este trabajo tuvo como objetivo evaluar el efecto de sustitutos de gluten en la microestructura, propiedades físicas y organolépticas del pan elaborado a base de harina de quinua y residuos de malta cervecera. Se realizó un diseño de mezclas para determinar la proporción de harinas y sustitutos de gluten para obtener un pan con propiedades similares a un pan de trigo. Se encontró que la mejor mezcla de harinas se encuentra utilizando 90% de quinua y 10% de cebada cervecera; mientras que para los sustitutos la mejor mezcla fue de 86% goma xantana y 6.5% mucílago de nopal. Se encontraron mejoras significativas en las propiedades viscoelásticas del pan. Asimismo, el análisis de la microestructura mediante microscopía electrónica de barrido y análisis de imagen mostró la formación de alveolos de gas y el establecimiento de una red, relacionándolo con sus propiedades físicas (volumen, textura, calidad de miga). Se observó una mejor aceptación del pan al adicionar los sustitutos de gluten, el cual representa una alternativa para personas con enfermedad celiaca.

1. INTRODUCCIÓN

La enfermedad celiaca y otras intolerancias al gluten han cobrado especial importancia en temas de salud pública mundial en los últimos años. Lo anterior se debe a que su incidencia ha comenzado a incrementar de forma más drástica y a que, además de no existir una cura, muchos de los productos que se encuentran actualmente en el mercado están fabricados con trigo, por lo cual, contienen gluten. Asimismo, pese a que este tipo de enfermedades no son tipificadas como mortales, generan grandes molestias y muchos síntomas indeseados en las personas que la padecen. De este modo, la industria de alimentos tiene como reto producir alimentos, en este caso pan, que sean libres de gluten o que no impacten en la salud de las personas celiacas.

La industria panadera ha propuesto el uso de harinas clasificadas como libres de gluten para generar productos tales como panes de amaranto, galletas de almendras, totopos de nopal, entre otros. Sin embargo, la mayoría de estos productos se encuentran en desventaja frente a los productos realizados con trigo, ya que, debido a la ausencia de la proteína del gluten, se producen panes con mala calidad de miga, apelmazamiento y agrietamientos indeseables. Para dar solución a estos problemas, en el presente trabajo se propone la adición de sustitutos de gluten, los cuales, remplacen algunas de las funciones de estas proteínas dentro de las redes estructurales del pan. De este modo se tiene como objetivo obtener un producto libre de gluten a base de harina de quinua y cebada cervecera que cuente con las propiedades deseables para los consumidores.

Por otro lado, la gran producción y contaminación del ambiente derivado de los desechos agroindustriales es una cuestión de gran preocupación hoy en día. Uno de estos desechos es el remanente de cebada obtenido de la producción de cerveza. Se plantea la utilización de este subproducto para la obtención de una harina libre de gluten que permita la elaboración de panes aptos para celíacos. El mucílago de nopal obtenido luego de la cocción de los nopales es otro producto secundario poco aprovechado en el sector doméstico e industrial. No obstante, además de poseer beneficios nutraceúticos, funciona como un sustituto de gluten que mejora las propiedades de los panes a realizados con harinas libres de gluten. Así, se propone el uso de estos dos remanentes en la elaboración de un pan como una posible solución para contrarrestar algunos de los desperdicios que existen hoy en día y a su vez generar una economía circular que brinde beneficio a la sociedad.

2. ANTECEDENTES

2.1. Pan

El pan, uno de los productos fundamentales en la dieta de la población mundial desde la antigüedad, es un alimento hecho a partir de la cocción de una masa, generalmente fermentada, proveniente de la harina de uno o diversos tipos de cereales (Carrero y Armendáriz, 2019). Además del sabor, olor y textura, algunas propiedades nutricionales son las que agregan gran valor e importancia al pan. Lo anterior, lo lleva a constituir hasta el 75% de la dieta de algunas regiones, y a mostrar un consumo mundial promedio de 50 kg por persona al año (Maga y Ponte, 1975; Rosell y col., 2016). En México existe un consumo anual por persona de 33.5 kg, según lo reportado por CANAINPA en conjunto con la Secretaría de Economía (2017), lo cual posiciona al país muy cerca del consumo anual promedio.

La NOM-247-SSA1-2008 establece que del proceso de panificación pueden obtenerse productos tales como pan blanco, pan de harina integral, pan duce, pasta, pastel o panque y pay, mismos que difieren por su composición y proceso de elaboración. De acuerdo con esta clasificación, el pan dulce elaborado con grasas, levadura, sal, leche, huevo, azúcar y algún tipo de harina es el que cobra relevancia en este trabajo (Secretaría de Salud, 2009).

Sin embargo, de forma más general, el pan suele clasificarse en común y especial, de acuerdo con su composición. Según Mesas y Alegre (2002), el primero de ellos es el que usualmente se elabora con harina de trigo y lleva un proceso de elaboración

tradicional sin aditivos especiales. Por otro lado, el pan especial es aquél que se formula con harina, procedimientos, aditivos u otros ingredientes especiales o enriquecidos, que cumplan alguna función específica dentro del mismo (Alegret y col., 2004). Dentro de esta última clasificación se encuentra el pan de caja, también llamado de molde o americano, el cual se hornea dentro de un molde y posee una corteza lisa y dorada al exterior. Este pan es muy popular por su fácil consumo y acceso, además de mostrar una larga vida de anaquel (Benítez y col., 2019). Un pan de caja con propiedades organolépticas idóneas es aquel que, entre otras cosas, posee rebanadas simétricas y sin defectos apreciables tanto en la corteza como en la miga, un aroma distintivo, un sabor intenso durante su degustación y una suavidad y humedad agradables al tacto y rebanadas sin adherencia al paladar (Bedolla y col., 2004). En este sentido, se han estudiado propiedades físicas y organolépticas del pan con diversos tipos de harina mediante diversos ensayos, como los realizados por Kim y Yokoyama, (2011); Shin y col., (2013) y Zhu y Sun, (2019).

Una correcta elaboración de pan conlleva un proceso particular dependiendo el tipo de pan que se vaya a realizar. Pese a esto, comúnmente el proceso incluye la fase de amasado, división y pesado, boleado, reposo, formado, fermentación y cocción (Padilla, 2012). El mezclado incorpora los ingredientes y genera las características físicas de la masa, la división y pesado fracciona la masa, el boleado permite que la masa regenere su estructura, el reposo facilita la recuperación del gas y el formado da el aspecto deseado. Posteriormente la fermentación produce etanol, CO₂ y otros productos mediante las levaduras presentes, y finalmente la cocción genera los

cambios que terminan por estabilizar la estructura del pan mediante la modificación molecular de la masa (Verdú, 2013; Garda, 2020).

2.2. Función del gluten en el pan

Las proteínas que se encuentran en algunos tipos de cereales, sobre todo en el trigo, y que son insolubles en agua y soluciones salinas diluidas, son denominadas gluten (Arendt y Dal-Bello, 2011). El gluten está compuesto principalmente por gliadinas monoméricas y gluteninas poliméricas, que contienen elevadas cantidades de residuos de glutamina y prolina (Biesiekierski, 2017). Dentro del trigo, el gluten constituye la mayor parte de las proteínas presentes en los granos, cumpliendo importantes funciones en la germinación y en el desarrollo de las plántulas al ser fuentes de nitrógeno (Shewry, 2019). Del mismo modo, por su abundancia y presencia inherente en muchos tipos de harinas, el gluten brinda características específicas al pan. El gluten de forma general cumple funciones relacionadas con la elasticidad de la masa y la consistencia y esponjosidad del pan (Barriga, 2011). Esto es debido a su capacidad de conservar el aire producido dentro de la masa tras formar una especie de red tridimensional impermeable producida por los enlaces formados con el rompimiento de las proteínas durante el amasado (Colgrave y col., 2021). Más específicamente, se ha sugerido que las gliadinas se encargan de dar fuerza y elasticidad, así como el volumen y cohesividad característicos del pan; mientras que las gluteninas confieren resistencia y extensibilidad (Marquina, 2021).

Sin embargo, a pesar de las ventajas que aporta el gluten al pan de trigo, también es responsable de algunos malestares en algunas de las personas que lo consumen,

entre ellas las que padecen alergia al gluten, la enfermedad no celiaca al gluten y la enfermedad celiaca (Estévez y Araya, 2016). La enfermedad celiaca ha cobrado gran relevancia en los últimos años debido a su aparente incremento en la población mundial, llegando a afectar al 1% de la población mexicana (Cobos-Quevedo y col., 2017). Esta enfermedad autoinmune, es causada por problemas en la absorción del gluten en el intestino delgado, que conduce a una inflamación y atrofia de la mucosa de éste (Pérez, 2017). Su síntoma más común es la diarrea y el dolor abdominal, aunque también hay otros síntomas comunes como el vómito, pérdida de peso, anemia y otras deficiencias en la absorción de vitaminas y minerales (Sciarini y col., 2016). Para tratar de contrarrestar este problema, se han estudiado métodos para eliminar el gluten de las harinas de trigo, por ejemplo mediante el uso de enzimas (Wei y col., 2020) o realizando modificaciones genéticas (Escorza, 2018). Sin embargo, estas técnicas suelen ser costosas y complicadas, además de que eliminan algunas de las propiedades funcionales de las harinas. Por lo anterior, actualmente se están buscando alternativas a la harina de trigo que permitan un contenido menor a 20 ppm (en base húmeda) en los productos de acuerdo con la FDA (2023) y 500 ppm (en base seca) de acuerdo con normas mexicanas (DOF, 1996). Algunas de estas alternativas incluyen el uso de harinas de cebada malteada, almendras, quinoa, arroz, sorgo, maíz o leguminosas como el frijol (Rosell y col., 2015).

2.3. Residuo de malta cervecera

La cerveza es una bebida alcohólica altamente producida y consumida alrededor del mundo, llegando a consumirse casi dos millones de hectolitros al año (Webb, 2021).

Esta bebida es fermentada anaerómicamente por medio de levaduras como *Sacharomyces cerevisiae* utilizando cereales y otras sustancias amiláceas tales como la cebada, de los cuales se obtienen los azúcares necesarios para la fermentación (Wang y col., 2021; Romero y col., 2022). La elaboración de la cerveza requiere de una serie de pasos que implican la preparación de la malta, la obtención del mosto, la fermentación y la maduración (Figura 1).

Sin embargo, la elaboración de este tipo de productos supone la generación de una gran cantidad de residuos. El subproducto de mayor abundancia es el residuo de la malta cervecera, también llamado bagazo cervecero, el cual consiste en la parte insoluble y sólida del grano de cebada malteada generada después de la maceración y la filtración. Hasta el momento no existen cifras exactas de la cantidad de gluten en el bagazo de cebada, sin embargo, se ha reportado que posee una mínima cantidad de este tipo de proteínas. De acuerdo con Arauzo y col., (2019), del total de proteínas, más del 50% corresponden a hordeínas (solubles en alcohol) y aproximadamente el 20% corresponde a albúminas (solubles en agua), de modo que la fracción de glutelinas y otros tipos de proteínas como las globulinas es mínima. Lo anterior puede deberse a la dilución del gluten durante el tratamiento que conlleva la elaboración de la cerveza (Colpo y col., 2022). Por otro lado, el bagazo de cerveza representa aproximadamente el 85% (p/p) del total de residuos de esta industria y el 30% del total del grano malteado. Por lo tanto, se calcula una producción de 0.2 kg de bagazo por litro de cerveza y 37.2 millones de toneladas anuales a nivel mundial (Agrawal y col., 2022; Qazanfarzadeh y col., 2022), mientras que en México se generan 2.4 millones de toneladas anuales (Secretaría de Economía, 2015).

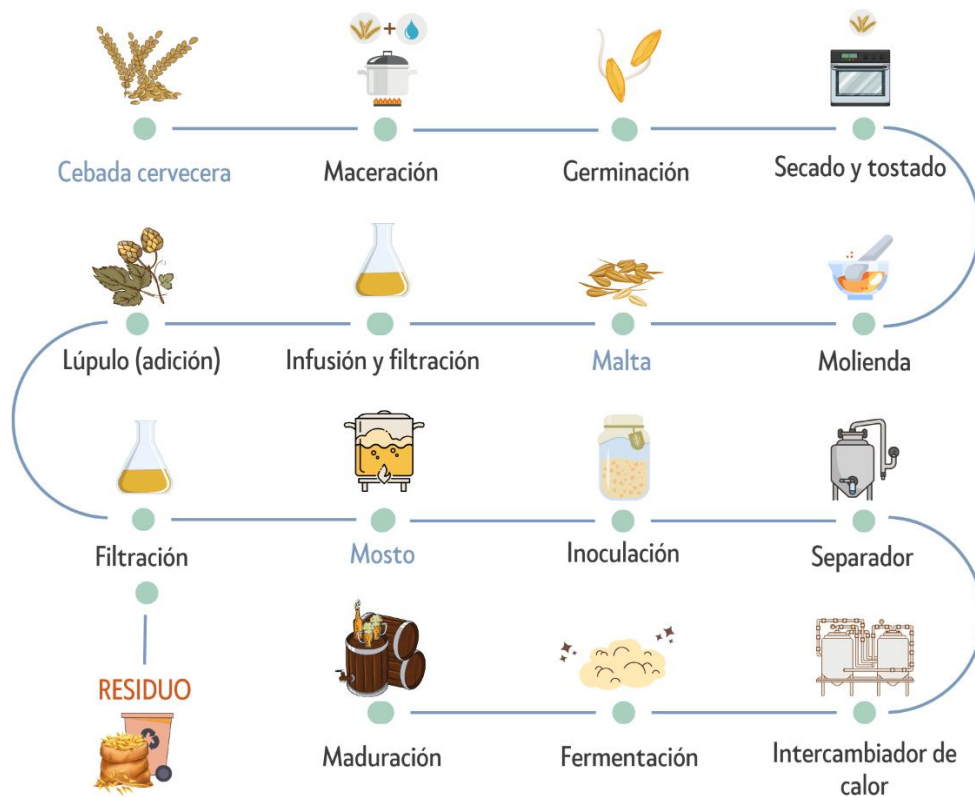


Figura 1. Proceso de elaboración de cerveza a partir de cebada cervecedora. Se resalta en rojo la etapa de obtención del residuo cervecedero (adaptado de Rodríguez y Gallego, 1999; Agrawal y col., 2022).

En los últimos años se ha intentado aumentar el aprovechamiento de este tipo de residuos ya que además de su enorme producción representan un alto valor nutritivo. La cebada utilizada al inicio del proceso suele ser un grano especial, que contiene una alta cantidad de almidón, poca proteína, una elevada capacidad de germinar y sobre todo un alto poder diastático (Rodríguez y Gallego, 1999). Una vez procesada, la malta posee una composición química muy variada debido a factores como el tipo de cebada utilizada, aditivos utilizados y condiciones de cultivo. Sin embargo, diversas investigaciones coinciden en su alto contenido de fibra dietética (30-50%) y proteínas (19-30%), así como bajos niveles lipídicos (3-10%) y de almidón (1-10%),

además del contenido en diversas vitaminas y minerales (Mussato, 2014; Neylon y col., 2021).

En el Cuadro 1 se muestran algunas de las aplicaciones más recientes del residuo de malta cervecera en diversos ámbitos.

Cuadro 1. Aplicaciones de la malta de cerveza

Aplicaciones	Características del producto	Referencia
Biomateriales para envasado de alimentos	Obtención de productos de alto valor agregado tales como compuestos fenólicos, lignina, celulosa, proteínas y hemicelulosa a partir de bagazo cervecero mediante técnicas de biorrefinería	Qazanfarzadeh y col., (2022)
Fermentados a partir de pan y residuos de cebada	Uso de pan rancio y residuos cerveceros adicionados con proteínas de hongos filamentosos para su reintroducción en la industria de alimentos.	Gmoser y col., (2020)
Gas combustible a partir de bagazo de cerveza	Estudio para la producción de gas combustible mediante gasificación con vapor usando granos de cebada cervecera	Ferreira y col., (2019)
Películas comestibles	Desarrollo y evaluación de películas comestibles a partir de la proteína del residuo de malta.	Shroti y Saini, (2022)

2.3.1. Pan de malta

El origen y consumo del pan de cebada se remonta al Antiguo Egipto. Debido a que el cultivo de trigo no era tan común cerca del Nilo (Kimbell, 2020), la mayor parte del pan en estas zonas era fabricado con cebada. Sin embargo, se sabe que, debido a su bajo contenido de gluten, estos panes carecían de esponjosidad, una de las

características por las cuales hasta el día de hoy carecen de popularidad (Zuloaga, 2020). Además de tener un menor volumen y ser más pesado en comparación al pan de trigo, el pan de cebada suele caracterizarse por poseer un ligero sabor dulce, una estructura poco firme y un color marrón oscuro (Quintanar, 2023).

Sin embargo, pese a estas desventajas organolépticas, en los últimos años se ha visto un auge en el consumo de alimentos que se consideran más naturales y nutritivos. Es por esto que el consumo de panes tales como el de cebada ha cobrado aceptación en los consumidores por sus posibles efectos para disminuir el colesterol y el azúcar en sangre, así como por su alto contenido en fibra y beta glucanos (Mansoor y col., 2022). Tan solo en México, de acuerdo con la Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural (2017), se cultivan más de 734 mil toneladas de cebada, de los cuales se considera que un 6% es utilizado para consumo humano (Lukinac y Jukić, 2022). Pese a esto, no se tienen cifras precisas de la cantidad exacta de cebada que se destina a la producción de pan.

2.4. Quinua

La quinua (*Chenopodium quinoa Willd*) es un pseudocereal, es decir, una planta con características y usos similares a los de un cereal pero que no pertenece a la familia Quenopodiácea, típica de los cereales (Arroyave y Esguerra, 2016). Gracias a su especial adaptabilidad a diversas condiciones climáticas es posible cultivarla en diversas regiones del mundo, entre ellas México, donde se producen más de 70 toneladas al año para diversos fines (SIAP, 2016). Esta versatilidad se debe sobre todo a la composición del grano de quinua, el cual está compuesto principalmente

por carbohidratos (74%), proteínas (8-22%), lípidos (4-7.6%), fibra (5%) y humedad (6%) (Campos-Rodríguez y col., 2022).

Este tipo de semilla andina ha sido parte de la alimentación base en América desde las poblaciones prehispánicas, sin embargo, con el auge de cereales como el trigo, su consumo se vio reducido a zonas marginadas (Pando y Aguiar, 2016). En los últimos años, la quinua ha cobrado una gran relevancia gracias a la serie de propiedades benéficas que posee para la salud, entre éstas, se encuentran sus efectos antidiabéticos, antioxidantes y cardioprotectores. Además, tiene efecto en la mejora de la función gástrica, su completo contenido de aminoácidos esenciales, y alto contenido en minerales, omega-3 y fibra, los cuales contribuyen a una mejora en la nutrición de las personas (Laise, 2018; Narvaez, 2020; Chaudhary y col., 2023). Aunado a esto, la harina obtenida de la quinua está clasificada como libre de gluten, por lo que supone una solución para el consumo de los celíacos (Melini y Melini, 2021).

2.4.1. Pan de quinua

Debido a que el pan hecho con harina de quinua es un producto libre de gluten, representa una ventaja para la salud de los celíacos, pero una desventaja a nivel sensorial. Esto debido a que la falta de gluten limita la calidad del horneado y la textura del pan, al carecer de la red característica del gluten (Wang y col., 2021). Además, de forma general, la quinua suele tener un ligero sabor amargo y astringente debido al residuo de saponinas que no logra eliminarse durante el proceso de perlado mediante el cual se remueven estos compuestos. Por lo anterior, los panes

elaborados con este tipo de harina pueden llegar a tener esta característica de sabor (Suárez-Estrella y col., 2020). Sin embargo, las grandes ventajas nutricionales que presenta la quinua aumentan su aceptabilidad entre la población, por lo cual su consumo dentro de panes y otros tipos de alimentos es cada vez más común.

2.5. Aditivos como sustitutos de gluten

El uso de harinas tipificadas como libres de gluten suponen inconvenientes sensoriales y físicos en las características reológicas del pan debido a la falta de estas proteínas, obteniéndose productos con menor volumen, textura, vida útil y homogeneidad de la miga (Moran y Soledispa, 2013). Para solucionar este inconveniente, se busca añadir aditivos que funcionen como sustitutos de gluten, tales como proteínas, agentes aglutinantes, emulsionantes o hidrocoloides. Estos aditivos eliminan o reducen en gran medida las desventajas sensoriales de un pan hecho con harinas libres de gluten, gracias al aumento en la retención de gases durante la fermentación y el horneado (Miranda y col., 2018).

2.5.1. Goma xantana

Un tipo de hidrocoloide usado con gran frecuencia en la producción de alimentos es la goma xantana. Los hidrocoloides, tal como la goma xantana, poseen un alto peso molecular y permiten la formación de geles viscosos que estabilizan los alimentos (Riera, 2004). La goma xantana es un polisacárido extracelular habitualmente producido durante la fermentación de carbohidratos de la bacteria *Xanthomonas campestris* (Waksmundzka-Hajnos y Sherma, 2010). Sus usos dentro de la industria

alimentaria se deben a sus características como espesante, estabilizador y emulsionante (Parker y Pace, 2016). Algunas de las características que explican la importancia de la goma xantana son su solubilidad en agua, su nula toxicidad (generalmente reconocido como seguro “GRAS”), su gran estabilidad y su bajo costo. Además, presenta una alta viscosidad utilizando bajas concentraciones y buena capacidad para trabajarse en amplios rangos de temperatura y pH (Monferrer y col., 2023; Maroufi y col., 2023). Dentro del área de panificación, este tipo de goma es utilizado ya que evita el desmoronamiento prematuro del pan, disminuye la formación de grumos mejorando la homogeneidad de la masa y mejora la estabilidad al congelamiento y descongelamiento de los mismos. Estas propiedades se obtienen debido a su gran retención de agua que permiten estabilizar los geles de almidón, sin afectar su color, olor o sabor (Belitz y col., 2008; Jafari y col., 2018; Bhat y col., 2022).

2.5.2. Mucílago de nopal

Los nopales (*Opuntia ficus-indica*) son cactáceas con gran variedad genética originarias de América Tropical y subtropical. Presentan una gran importancia desde las antiguas culturas mesoamericanas en México, donde ya era cultivado de manera formal (Sáenz, 2006). Hoy en día, su importancia es aún mayor, y tan sólo en México en 2019, de acuerdo con datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) se produjeron alrededor de 891,821 toneladas de nopal. Su elevada producción se debe al extenso uso de sus frutos, tallos y flores; tanto para consumo humano cuando son tiernos, como para consumo como forraje al madurar (Inglese,

2018). Su consumo humano actual se da a través una larga lista de preparaciones gastronómicas tradicionales y exóticas; y en recientes años, en productos empaquetados como tortillas o snacks que se encuentran fácilmente en supermercados (de Albuquerque y col., 2019).

Sin embargo, durante su cocción, necesaria en muchas de las preparaciones domésticas y comerciales, se libera una sustancia llamada mucílago, la cual habitualmente es desechada. El mucílago de nopal es un polisacárido de consistencia gelatinosa que es liberado naturalmente como respuesta a las heridas en los nopales y que es considerado un hidocoloide (Cabrera y col., 2013). Algunas de sus propiedades incluyen la capacidad de formar geles y películas, retener agua y aceite, modificar la viscosidad y unir iones; lo cual lo hace tener prometedoras aplicaciones como aditivo en la industria alimentaria con fines gelificantes, emulsionantes y espesantes (Hernández-Becerra, 2022; Cakmak, 2023). Además de estas propiedades, se ha demostrado que el mucílago, compuesto principalmente por carbohidratos, proteínas y minerales, posee grandes propiedades nutraceuticas. Entre estas propiedades se encuentra su potencial prebiótico gracias a los monosacáridos presentes y sus altos niveles de fibra dietética que además de regular la digestión, modula las bacterias intestinales (Kassem y col., 2021; Monteiro, 2023).

El mucílago de nopal tiene potencial de uso en áreas más allá de la industria alimentaria (Cuadro 2). Sin embargo, hasta ahora no es estudiado ampliamente, por lo que es importante buscar alternativas para aprovechar todos sus beneficios y evitar el desperdicio de este subproducto.

En este proyecto se propone el uso de este polisacárido como un sustituto de gluten, fundamentándose en sus propiedades hidrocoloides.

2.6. Pruebas de calidad panadera

A pesar de la gran importancia que poseen las características sensoriales y cualitativas en un pan para ser del agrado del consumidor, la calidad de un pan debe medirse mediante factores cuantitativos. Este tipo de factores permiten que tanto el pan, como otros alimentos, sean elaborados siguiendo normas de seguridad alimentaria que garanticen su buena calidad (Figura 2) (Molina y Ortega, 2016).

Cuadro 2. Aplicaciones actuales del mucílago de nopal en diversas áreas.

Aplicaciones	Características	Referencia
Eliminación de multimetales.	Elaboración de copolímeros a partir de almidón de papa y mucílago de nopal para remover multimetales del agua.	Choque y col., (2023).
Recubrimiento de manzanas.	Recubrimiento de manzanas rojas con nano emulsiones de mucílago de nopal para evaluar el índice de pardeamiento y actividades de polifenol oxidasa y pectina metilesterasa.	Zambrano-Zaragoza y col., (2014).
Mejora en durabilidad de materiales.	Mejora de la durabilidad del concreto con derivados de nopal. Se observó un detenimiento en el transporte de agua y cloruro al concreto.	Torres-Acosta y Díaz-Cruz, (2020).
Remoción de turbidez en agua	Sustitución del sulfato de aluminio con mucílago de nopal y almidón de yuca para remover la turbidez del agua en potabilización.	Lugo-Arias y col., (2020)

Por lo que, a nivel industrial el pan y sus materias primas, como las harinas, deben someterse a pruebas de laboratorio que permitan conocer si éstas tienen las condiciones necesarias para ser consideradas de calidad, por ejemplo por medio de

propiedades tales como el volumen, el color, la textura, extensibilidad, etc. (Mir, 2017). Algunas de estas técnicas se describen con mayor detalle a continuación.

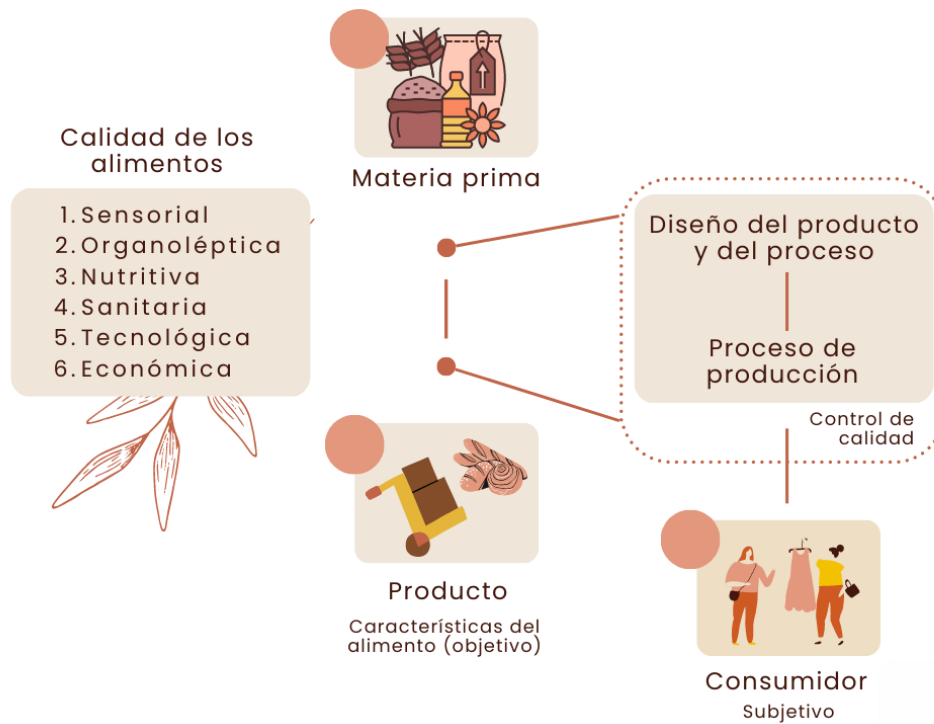


Figura 2. Tipos de calidad de los alimentos y su influencia en el proceso de producción (Molino y Ortega, 2016).

2.6.1. Volumen de hogaza por el método de desplazamiento de semillas.

El volumen de un producto, tal como el pan, se evalúa habitualmente mediante el desplazamiento de semillas de nabo, mostaza o alguna semilla semejante (Yambay y Arcos, 2018). El procedimiento se basa en introducir en un recipiente cilíndrico las semillas y posteriormente, introducir el pan para medir cuantitativamente el volumen desplazado.

Dicho procedimiento se fundamenta en el principio de Arquímedes, el cual menciona que al introducir un objeto en un fluido este desplazará un volumen de fluido equivalente a su peso o tamaño (Duarte y Niño, 2004).

2.6.2. Farinógrafo

El farinógrafo de Brabender es el instrumento que, en términos generales, permite medir la plasticidad y consistencia de una harina mediante la resistencia de una masa al amasado (Manrique y Vera, 2022). Las características de amasado tales como el tiempo que tarda en desarrollarse una masa y su posterior estabilidad al sobre amasado son datos que se obtienen en el farinógrafo. Estas pruebas son de especial relevancia en el proceso de panificación, pues muestran bajo principios reológicos la dinámica de los cambios en la consistencia de la masa durante el mezclado (Miś y col., 2012).

El funcionamiento del farinógrafo se basa en el uso de una mezcladora a temperatura (30 °C) y velocidad (63 rpm) constantes, donde dos palas giratorias amasan y someten a esfuerzo mecánico una masa obtenida al mezclar agua con harina (Roa y col., 2021). Con esto, se obtiene un farinograma (Figura 3), donde el eje de las abscisas representa el tiempo en minutos y el de las ordenadas las unidades Brabender o unidades farinográficas. Dicha técnica requiere de amasar el tiempo necesario para que el centro de la curva se encuentre en el punto máximo, es decir, 500 unidades Brabender (Jiménez, 2008).

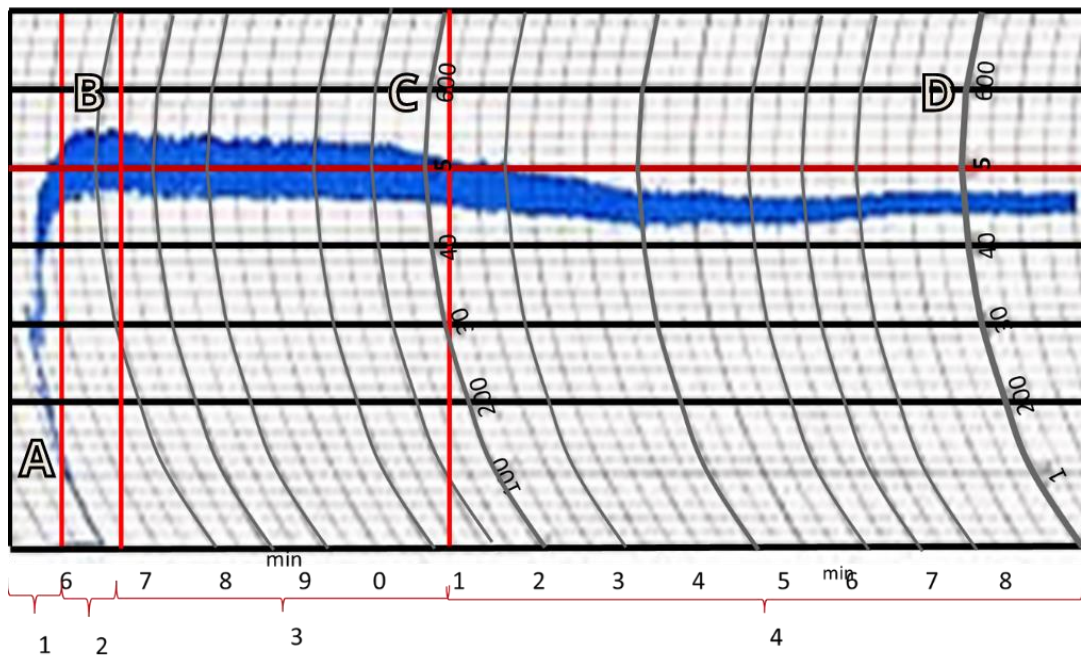


Figura 3. Farinograma tradicional. La etapa A-B corresponde al desarrollo de la masa; la etapa B a C muestra la etapa de estabilidad; la etapa C-D corresponde al grado de reblandecimiento.

Asimismo, dentro del farinograma existen distintos puntos (Figura 3). El primero de ellos (a) corresponde al tiempo de desarrollo de la masa, donde se determina el tiempo ideal de trabajo mecánico para obtener una masa ideal para la fabricación del pan; los valores normales van de 5-10 min. Posteriormente del punto b al c, es la etapa de estabilidad, fase en la cual la masa podrá tener una mejor fermentación y requerirá mayor fuerza para amasarse. Finalmente, se da el grado de reblandecimiento (c-d), el cual entre más pronto se observe más corta deberá ser la fermentación y menor trabajo mecánico soportará la masa (Brabender, 2021).

2.6.3. Alveógrafo de Chopin

El alveógrafo de Chopin es una técnica de laboratorio que permite medir la capacidad de formar alveolos. Proporciona información sobre la resistencia a la expansión y la

resistencia de la masa, así como de la fuerza de la harina y su relación con la elasticidad y extensibilidad de la masa. Para realizar esta prueba, se hidrata una harina que de manera común contendría gluten y se introduce aire, de modo que se forme una especie de globo en la masa. Con la formación de esta burbuja de aire se obtiene un alveograma con el comportamiento de la masa ante la fuerza del aire que se aplica (Peña y col., 2008). Los datos obtenidos en los alveogramas son el trabajo de deformación, denominado W, el cual indica la fuerza de la masa y se encuentra en rangos entre 200 y 300 ($\times 10^4$); y el equilibrio de la curva que relaciona la tenacidad y la extensibilidad de la masa (Quintana y col., 2004).

2.7. Digestibilidad

El pan provee una alta cantidad de hidratos de carbono complejos, particularmente el almidón, el cual se digiere en el intestino delgado para obtener monómeros de glucosa. El grado de digestión se ve afectado por la proporción de amilosa y amilopectina y las técnicas de procesamiento como la molienda, refinado y cocción (Qi y col., 2022).

La digestión del almidón se puede medir mediante métodos *in vitro* en el cual se mide el grado de digestión durante 2 horas de incubación. En base al grado de digestión, el almidón se puede clasificar en tres grupos: almidón de rápida digestión que se digiere dentro de los primeros 20 minutos, almidón de lenta digestión que se digiere dentro de los minutos 20 a 120 y por último, el almidón resistente que permanece sin digerir después de los 120 minutos (Liu y col., 2019).

La importancia de medir la digestibilidad de la harina radica en el índice glucémico el cual mide el aumento de la concentración de glucosa en la sangre tras ingerir un carbohidrato. El índice glucémico es un indicativo clave para pacientes diabéticos ya que un menor índice glucémico indica un menor aumento en los niveles de la glucosa en sangre. Por ejemplo, el almidón resistente no se logra hidrolizar en el intestino delgado, por lo que entra al colón para ser fermentado (Liu y col., 2007).

Wang y col. (2021) compararon panes a base de quinua contra panes a base de harina de trigo. Para ello, incubaron al pan molido en una solución enzimática con pancreatina y amiloglucosidasa a 37 °C para simular el proceso que se lleva a cabo en el tracto digestivo. Encontraron que la harina de quinua reduce la digestibilidad debido a una considerable cantidad de polifenoles y fibras dietéticas que son responsables de inhibir la actividad de las enzimas digestivas del almidón. De manera similar, Wu y col. (2022) evaluaron la digestibilidad *in vitro* con el procedimiento anteriormente descrito, para comparar panes de trigo contra panes de cebada. Obtuvieron una menor digestibilidad para los panes de cebada ocasionado por una reducción en la hidrólisis debido a la presencia de β -glucano ya que éste aumenta la viscosidad en los intestinos, disminuyendo la digestibilidad del almidón. Además, compuestos fenólicos pueden ser adsorbidos en la superficie del almidón para inhibir la actividad de la enzima α -amilasa.

2.8. Análisis de imagen

Existen diversas pruebas para determinar la calidad del pan. Una de ellas, es el análisis de imagen, el cual consiste en un proceso de observación y posterior estudio

de una imagen digital, de modo que se pueda obtener información cuantitativa de la misma (Pertusa, 2003). De forma general, un análisis de imagen puede ser realizado de forma manual o mediante el uso de programas de cómputo que permitan el estudio de criterios específicos.

Uno de estos programas es ImageJ, un programa de código abierto proporcionado por el Instituto Nacional de Salud (NIH) de EUA, que permite obtener datos relacionados con la textura, el tamaño, número y distribución de la miga. También puede determinar el segundo momento angular, la entropía, contraste, fracción vacía, entre otros, los cuales ayudan a conocer y explicar la microestructura de los panes (Abramoff y col., 2004).

Esta herramienta ha sido de gran ayuda en los últimos años, pues además de los análisis cualitativos, este tipo de programas ha permitido conocer de forma más exacta algunas de las propiedades del pan, tales como la densidad de la miga. Es así, que entre muchos otros estudios, mediante análisis de imagen se ha logrado estudiar la estructura y calidad de un pan al vapor de pulpa de papa libre de gluten (Song y col., 2023); así como optimizar formulaciones de pan libre de gluten permitiendo analizar la microestructura y textura de los mismos (Ammar y col., 2022; Canelo y col., 2023).

2.9. Calorímetro diferencial de barrido

La calorimetría diferencial de barrido (DSC) es una técnica ampliamente utilizada para observar la calidad del pan por medio de sus propiedades térmicas (Spink,

2008). Este método permite conocer los cambios y transiciones a nivel molecular de las estructuras, estados físicos e interacciones del almidón a través de la exposición de la muestra a variaciones en la temperatura en una atmósfera determinada. Dichos datos son de gran utilidad para realizar estimaciones relacionadas con la transferencia de calor que existe dentro del pan, así como otros parámetros que aseguren su calidad, seguridad y estabilidad (Farah y col., 2018). Además, este método es muy utilizado por la facilidad en el manejo de los instrumentos y la poca cantidad de muestra que implica su realización (Johnson, 2013).

A lo largo de los años, se ha utilizado el DSC para el estudio de las propiedades de diversos tipos de pan y alimentos. Korus y col. (2022), por ejemplo, estudiaron mediante DSC las propiedades de un pan libre de gluten utilizando mezquite como harina base. Asimismo, utilizando esta técnica, Qin y col. (2021) evaluaron la calidad de un pan sin gluten realizado con arroz. En ambos casos, el DSC permitió observar cambios significativos entre el control y los panes sin gluten realizados en los ensayos.

2.10. Análisis de textura

La textura es uno de los parámetros más importantes en la calidad del pan, pues está estrechamente relacionada con su aceptabilidad. La textura en un pan consiste en el conjunto de características físicas que se relacionan con la deformación, desintegración y fluidez tras someterse a una fuerza por determinado tiempo y distancia (Arendt y col., 2007). Como se ha mencionado anteriormente, la textura del

pan debe ser suave y con estructura esponjosa en el centro y debe estar envuelta por una corteza rígida.

Habitualmente, estas características suelen medirse por medio de un texturómetro. Este equipo tiene una sonda que es empujada sobre el pan hasta causar una compresión irreversible para así medir la fuerza necesaria para que la muestra de pan sea penetrada. Dependiendo de la forma en que se aplique la fuerza, existen distintos tipos de texturómetros; entre ellos los de compresión, flujo, cizalla, extrusión, penetración, corte, flujo y mezcla (Vuarant, 2010). El más utilizado en pruebas de pan es el de compresión, denominado Análisis del Perfil de Textura (TPA), por medio del cual se obtienen datos referentes a la elasticidad, adhesión, cohesión, dureza, masticabilidad, gomosidad y fracturabilidad (Hleap y Velasco, 2010).

Existen diversos factores que pueden modificar la textura final de un pan, entre ellos el origen y calidad de las materias primas tales como la harina y el tipo de grano del que provenga, y el estado general de la masa que se utilice (Ordoñez y Osorio, 2012).

2.11. Cuantificación de gluten

Como se mencionó anteriormente, para que un producto sea considerado libre de gluten, es importante que contenga menos de 500 ppm (base seca) de este tipo de proteínas (DOF, 1996). Hoy en día, existen varias técnicas que permiten evaluar la presencia de gluten dentro de las muestras, las cuales van desde su aislamiento mediante agua y soluciones salinas, hasta pruebas moleculares tales como las

pruebas ELISA, PCR, Western Blot o pruebas analíticas como espectrometría de masas, tiras inmunocromatográficas y biosensores (González y col., 2007).

Una de las técnicas más utilizadas es el aislamiento gravimétrico mediante lavados con agua y soluciones salinas ya que, al ser insolubles en este tipo de soluciones, su aislamiento se vuelve rápido y fácil. La técnica consiste en realizar lavados para eliminar el almidón y todas aquellas proteínas solubles en agua y soluciones salinas, dejando solo el gluten, que luego de ser centrifugado y tamizado representará el peso total del gluten húmedo (Mir, 2017). Posteriormente, se puede conocer el valor del gluten seco secando el gluten húmedo, lo cual además de indicar la cantidad de gluten en el pan, indica la capacidad de retención de agua del gluten, por medio de la diferencia de pesos entre el gluten húmedo y el seco (Flores, 2022).

A pesar de la sencillez de este método, en ocasiones es necesario utilizar técnicas más exactas. En estos casos son utilizadas técnicas como las pruebas ELISA, ensayos inmunogénicos que detectan un producto de interés al formar un complejo específico de antígeno-anticuerpo, el cual formará un producto coloreado fácilmente cuantificable por medio de espectrofotometría gracias a la unión a una enzima (Alhajj y col., 2023). Existen diversos tipos de ELISA, sin embargo, para la detección de gluten el más usado es el tipo sándwich, en el cual se utiliza un anticuerpo primario y uno secundario que está unido a la enzima propiciando que el antígeno (proteínas del gluten) quede situado en medio de ambos (González, 2007).

3. HIPÓTESIS

La adición de sustitutos de gluten (goma xantana y mucilago de nopal) en pan elaborado con harina de quinua y residuos de malta cervecera permitirá obtener un producto de características similares al pan de harina de trigo, ya que estos le conferirán mayor elasticidad y retención de CO₂ en comparación con los panes libres de gluten.

4. OBJETIVOS

4.1. General

Elaborar y caracterizar la microestructura, propiedades físicas y grado de aceptabilidad de un pan a base de harinas de quinua y residuo de malta cervecera adicionado con sustitutos de gluten.

4.2. Específicos

- Obtener y caracterizar las harinas de quinua y del residuo de malta cervecera
- Establecer un diseño de mezclas en un pan para determinar las proporciones adecuadas de las harinas de quinua y residuo de malta cervecera
- Usar la mezcla seleccionada (objetivo previo), añadiendo diferentes relaciones de los sustitutos de gluten.
- Caracterizar las propiedades físicas y microestructura de los panes con y sin sustitutos de gluten.
- Obtener un pan libre de gluten que cumpla con los parámetros microbiológicos de la NOM-210-SSA1-2014 y NOM-147-SSA1-1996.
- Determinar el grado de aceptabilidad del pan libre de gluten por parte del consumidor.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Materiales y reactivos

Para el presente proyecto se utilizaron residuos de cebada provenientes de la elaboración de cerveza proporcionado por la Cervecería Hércules de Querétaro (Hércules, Santiago de Querétaro, México), así como harina de quinua (Sango, CDMX, México) y harina de trigo (Selecta, CDMX, México). El ácido sulfúrico concentrado (97% p/v, de pureza), éter etílico, carbonato de sodio, ácido clorhídrico, hidróxido de sodio y pastillas catalizadoras para análisis de nitrógeno proteico se obtuvieron de Merck (Merck, Darmstadt, Alemania). Se utilizó un kit ELISA para la detección de gluten en alimentos proporcionadas de Mellitec (Mellitec, CDMX, México).

La elaboración de los panes se realizó adquiriendo de forma comercial los ingredientes. Las materias primas utilizadas fueron huevo deshidratado (Molinos B&B, Monterrey, México), levadura (Nevada, Toluca, México), leche en polvo (Svelty, CDMX, México), sal de mesa (La Fina, Veracruz, México), mantequilla (La Gloria, CDMX, México) y azúcar (Member's Mark, CDMX, México). Para la evaluación del volumen se requirió semilla de linaza adquirida en un mercado local.

Asimismo, para la evaluación de digestibilidad se utilizó α -amilasa pancreática, pepsina porcina, pancreatina porcina, sales biliares bovinas y CaCl_2 obtenidos de (Merck Darmstadt, Alemania). Fueron utilizados también KCl , KH_2PO_4 , NaHCO_3 ,

NaCl, $MgCl_2(H_2O)_6$, $(NH_4)_2CO_3$, $CaCl_2$ como electrolitos para la fase gástrica e intestinal (Merck, Darmstadt, Alemania).

5.2. Medios de cultivo

Para las pruebas microbiológicas se utilizó agua peptonada, caldo y agar para Salmonella y Shigella, caldo y agar para métodos estándar, caldo y agar dextrosa y papa y agar para métodos estándar, los cuales se adquirieron de Bioxon (Bioxon, Estado de México, México).

5.3. Métodos

5.3.1. Obtención de la harina de cebada

El residuo húmedo de cebada obtenido directamente de la cervecería fue secado en un horno (Memmert, Schwabach, Alemania) a 65 °C hasta eliminar completamente la humedad. Posteriormente el residuo seco se molió en un procesador (Nutribullet, CDMX, México) hasta obtener un polvo fino, el cual fue tamizado usando una malla del No.80 (Liseal, Taiwán, China), para obtener la harina que se utilizó en las distintas pruebas. Se utilizó este tamaño de tamiz con el objetivo de obtener una harina con un tamaño de partícula entre 0.175 mm y 0.18 mm (Harris, 2003). Se eligió este tamaño de partícula ya que las harinas para panificación presentan tamaños de partícula entre 0.11 y 0.18 mm (INSST, 2020). Además, se ha encontrado que, en tamaños de partícula similares a estos, se obtiene una mejor calidad en los panes (Ruiz-Calero, 2020; Sakhare y col., 2014).

5.3.2. Análisis químico proximal

Se realizó un análisis químico proximal para la harina de cebada obtenida, así como para los panes libres de gluten con la mezcla final elegida. El contenido de cenizas se midió incinerando las muestras en una mufla (Thermo Scientific, Madrid, España) y midiendo la diferencia de pesos, siguiendo el método 942.05 de la Asociación de Químicos Analíticos Americanos (AOAC, 2015). La cuantificación de proteínas se llevó a cabo siguiendo el método 2001.11 (Kjeldahl) (AOAC 2015) usando un digestor y un destilador del amoníaco que se forma (Buchi, Switzerland, Suiza). El contenido de grasa de las harinas se determinó por el método 920.39 (goldfish) (AOAC, 1990). La humedad de las harinas se obtuvo utilizando una termobalanza (Precisa, Switzerland, Suiza) por diferencias de peso mediante secado.

5.3.3. Cuantificación de gluten

Para llevar a cabo la cuantificación de gluten en la harina de cebada, se utilizó el kit ELISA para pruebas de gluten en alimentos de acuerdo con las recomendaciones del fabricante.

5.3.4. Elaboración del pan

Para la elaboración de pan se siguió la formulación panadera base propuesta por Escamilla-García (2013), con ciertas modificaciones. Como control, se elaboró pan de harina de trigo, cebada y quinua. Se realizó un premezclado de los ingredientes secos (sal, azúcar, leche, levadura y harina) en una batidora (Oster, CDMX, México) durante 2 minutos a baja velocidad con una mezcladora de gancho. Posteriormente,

se adicionó la mantequilla y el huevo para continuar mezclando por 2 minutos más a baja velocidad.

Se añadió el agua mezclando a velocidad media, utilizando ahora el mezclador de pala, deteniendo el mezclado a los 7 y 10 minutos para realizar limpieza de tazón. Después se mezcló hasta el desarrollo óptimo de la masa, hasta que la masa estuvo completamente desarrollada y los ingredientes completamente incorporados.

Luego, se procedió a la fermentación en el horno Binder (Tuttlingen, Alemania), en un rango de temperatura entre 37 y 45 °C, realizando procesos intermedios de eliminación de aire de la masa (80, 120 y 145 minutos).

Finalmente, se realizó el boleado de la masa, formando muestras de 60 g y dejándolas fermentar 40 minutos más. El pan fue cocinado en un horno (Ninja, Boston, MA, EUA) a 180 °C durante 18 minutos.

5.3.5. Caracterización de la harina

5.3.5.1. Pruebas farinográficas

Mediante el uso del farinógrafo Brabender (Brabender, Toulouse, Francia), se determinaron los siguientes parámetros: absorción de agua, tiempo de desarrollo de la masa, estabilidad y grado de reblandecimiento (Graça y col, 2018). Se realizaron tres mediciones para cada muestra. Se obtuvieron las curvas farinográficas de acuerdo con el método AACCC N° 54-21.02 (2013).

5.3.5.2. Pruebas extensográficas y alveográficas

Por medio de un extensógrafo Brabender y un alveógrafo de Chopin, se midieron los parámetros extensográficos y viscoelásticos de la masa. Lo anterior permitió determinar la resistencia y estabilidad de la masa por medio de la resistencia máxima a la extensión y extensibilidad; así como la fuerza, elasticidad y tenacidad de la masa a partir del inflamiento de una burbuja de masa.

Se siguieron las instrucciones del fabricante para triplicar las muestras de quinua, cebada, trigo y la muestra de la mezcla de harinas (quinua y cebada cervecera) elegida en el diseño de mezclas. Las medidas extensográficas fueron analizadas al inicio y al final de la fermentación.

5.3.6. Caracterización del pan

5.3.6.1. Volumen

El volumen fue determinado de acuerdo con el método de desplazamiento de semillas de colza con ciertas modificaciones, reemplazando la semilla de colza por semilla de linaza. Utilizando un recipiente cilíndrico de mayor tamaño que el pan obtenido, se cuantificó el desplazamiento con semilla de linaza. El volumen específico se determinó por la relación volumen / masa, expresado en ml/g (Corral y col., 2017; Marti y col., 2018).

5.3.6.2. Análisis de imagen

Se realizaron cortes longitudinales a la mitad de los panes obtenidos. Posteriormente se escanearon en una impresora (Epson, CDMX, México) para obtener imágenes digitales a escala completa a 600 puntos por pulgada (ppp). Las imágenes se guardaron en formato Tagged Image File (TIF) (Caputo, 2015), que luego fueron analizadas con el programa IMAGEJ (versión Fiji 1.46). En este programa, se realizó una modificación de la imagen a 8-bit y posteriormente se evaluó la calidad de la miga por medio del análisis de circularidad, área, densidad de poros, perímetro, segundo momento angular, entropía, dimensión fractal y contraste.

5.3.6.3. Textura

La fuerza requerida para penetrar el pan se determinó utilizando un texturómetro (Brookfield, Mod. CT3-4500, Toronto, Canadá). Se prepararon muestras de pan de 120 g para realizar cortes en los panes de aproximadamente 4 cm x 4 cm. Para determinar la fuerza de penetración, se realizó un análisis de doble compresión de perfil de textura (APT) con una carga de activación de 4.5 g, velocidad de 0.5 mm/s y porcentaje de compresión del 40%, de modo que los cuadrados de pan se comprimieron hasta que la sonda rompió la estructura (Sciarini y col., 2012; Miri y col, 2018).

5.3.6.4. Color

La luminosidad y la saturación de la intensidad del color de la miga de pan y la corteza fueron medidas con un colorímetro Vinckolor Pro (Vinckolor, Zhengzhou, China)

(Acosta-Estrada y col, 2014), obteniendo los valores L^* (luminosidad), a^* (componente rojo-verde) y b^* (componente amarillo-azul) (Inglett y col., 2015).

5.3.6.5. Microscopía electrónica de barrido

Las muestras de pan elegidas para observar bajo microscopio SEM se mantuvieron bajo las mismas condiciones (en congelación a $\sim -18^{\circ}\text{C}$) hasta su utilización. Para su medición, fueron preparadas macerando una pequeña cantidad de pan previamente congelado. Para visualizarlo, se utilizó un microscopio electrónico de barrido Thermo Scientific (Thermo Scientific, Madrid, España).

Para esta prueba, se evaluaron las harinas control (quinua, cebada y trigo), el pan control de trigo y el pan elegido como la mejor mezcla de acuerdo con las pruebas de color, volumen y análisis de imagen.

5.3.7. Pruebas microbiológicas

Basado en las normativas nacionales (NOM-110-SSA1-1994 y NOM-147-SSA1-1996), se realizaron pruebas microbiológicas con *Salmonella*, *Shigella*, mesófilos aerobios, coliformes, hongos y levaduras para la materia prima (harinas de quinua y cebada) y para los panes obtenidos. Estas pruebas se realizaron mediante sembrado en placa bajo distintas diluciones.

5.3.8. Evaluación sensorial

Se llevó a cabo una evaluación hedónica estableciendo una escala Likert (Malhotra, 2004) con los panes finales obtenidos, considerando la declaración de Helsinki, la

ley General de Salud y las pautas de la CIOMS. Dicha escala tuvo cinco opciones de respuesta a cada pregunta, en una escala que iba desde "muy en desacuerdo" a "muy de acuerdo". Se evaluaron características referentes al aspecto, textura, color, olor y sabor; con la finalidad de estudiar su aceptabilidad en la población.

Se tomó en cuenta la participación de 50 personas voluntarias sin capacitación previa (mayores de 18 años; 25 hombres y 25 mujeres; seleccionados dentro de la comunidad universitaria; residentes del territorio nacional), de modo que se eliminaran sesgos estadísticos. El número de participantes fue elegido de modo que el estudio fuera significativo estadísticamente bajo las condiciones mencionadas en el apartado de análisis estadístico (sección 5.5); así como basándose en recomendaciones encontradas en literatura (García y col., 2013).

El riesgo derivado de la participación en el estudio fue mínimo debido a la probabilidad de alergia o intolerancia a alguno de los ingredientes dentro de la formulación. Los criterios de exclusión incluyeron la presencia de intolerancia al gluten (o la sospecha de su padecimiento) o a alguno de los ingredientes de la formulación, así como aquellas afecciones que pudieran influir en la percepción sensorial. Para la evaluación se proporcionó un pan de cada tratamiento (tres controles y la mezcla elegida) numerados aleatoriamente; los cuales se probaron secuencialmente enjuagando el paladar con agua entre cada muestra. La prueba sensorial tuvo una duración de aproximadamente 20 minutos, y el participante pudo ser retirado de la prueba en caso de conductas inapropiadas.

5.4. Diseño experimental

El diseño experimental consistió en un diseño de mezclas, el cual se llevó a cabo mediante el uso del paquete MiniTab (Versión 1.4.2, PA, EUA) para obtener la mezcla más apropiada de harina de trigo, quinua, cebada y sustitutos de gluten, considerando como variables respuesta el volumen, la textura y la calidad de la miga. Para el caso de las harinas se tomó como 100% la cantidad total de harina, es decir, 200 g. Para los sustitutos de gluten se consideraron 5 g como 100%.

5.5. Análisis estadístico

Todas las muestras se analizaron por triplicado reportando el promedio \pm desviación estándar. Para el diseño de mezclas y la evaluación sensorial, se compararon los promedios de los tratamientos y se determinó la diferencia significativa usando la prueba de Tukey con $\alpha < 0.05$.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Obtención de la harina de cebada

Tras el secado de la malta cervecera se obtuvo un grano seco color café claro, mismo que tras ser pulverizado y tamizado se volvió una harina color café oscuro con textura suave similar a la de una harina de trigo y un olor intenso.

Por otro lado, la harina obtenida puede ser considerada una harina integral, dado que a excepción del endospermo almidonoso, contiene todas las partes del grano; entre estos el germen, el salvado, el pericarpio y cubierta del grano (Lappé, 2022).

El endospermo no estaba presente ya que fue degradado enzimáticamente durante el proceso de elaboración de cerveza, de modo tal que la liberación de compuestos tales como carbohidratos y proteínas sea posible (Lynch y col., 2016). Esta propiedad, permite que la harina obtenida tenga un mayor contenido de fibra y propiedades nutricionales.

6.2. Análisis químico proximal

Se realizaron los análisis bromatológicos correspondientes a la harina de malta de cebada cervecera una vez tamizada, obteniendo los resultados mostrados en la Cuadro 4. La humedad se determinó para una muestra de harina (base seca), así como para una muestra de la cebada recién recibida de la cervecería (base húmeda).

Como se observa, la humedad de la cebada tras el secado se redujo en un 95%, siendo importante para que la harina generada cumpla con los parámetros de calidad

necesarios para la elaboración de panes y para que su resistencia al deterioro sea mayor (Bianco y col., 2014). Esto último, ya que debido a su alto contenido de carbohidratos, proteínas y humedad hace que este subproducto sea altamente susceptible al crecimiento microbiano, incluyendo bacterias y hongos (Lynch y col., 2016).

Cuadro 3. Resultados del análisis químico proximal de harina de residuo de malta cervecera

Propiedad	Valor (% p/p)
Humedad de la harina	77.55 ± 0.41
Harina deshidratada	
Humedad	3.50 ± 0.20
Proteína	16.91 ± 0.02
Ceniza	2.83 ± 0.05
Grasa	4.61 ± 0.28

El contenido de humedad de la harina de cebada es bajo en comparación a harinas de trigo comerciales, las cuales de acuerdo con Ponce y col. (2016) tras ser empaquetadas obtienen una humedad final entre 13 y 14.5%; y mismas que según la NMX-F007-1982, deben tener un máximo de 14% de humedad.

Se encontró que la harina obtenida se encuentra en un rango similar de humedad al encontrado en estudios anteriores, donde se encontró un valor promedio de humedad de 5.90±0.05 (Cermeño y col., 2021).

La proteína cuantificada en la harina es superior a la reportada en diversos tipos de harina de trigo comerciales, las cuales rondan entre el 9 y el 14% de proteína (Osborne, 2009). Los datos obtenidos son coincidentes con los reportados por

Cermeño y col., (2021), quienes encontraron 15.83 ± 0.48 ; y Lamas y col., (2023) con 14.5 ± 0.5 .

Pese a su alto contenido de proteínas, estas no representan un problema al no tratarse de proteínas del gluten, ya que se ha demostrado que del total de proteínas, las hordeínas representan más del 50% (Vieira, 2017). Asimismo, el perfil de proteínas del residuo de malta cervecera es importante, ya que del total de proteínas presentes en el grano, aproximadamente el 30% está representado por aminoácidos esenciales, de los cuales la lisina es la más abundante. Esto último, cobra especial relevancia ya que la lisina suele ser deficiente en otros cereales, por lo que representa una ventaja en el uso de este tipo de harina (Lynch, 2016).

Las cenizas encontradas en la harina del residuo de malta cervecera corresponden con estudios previos, tales como los realizados por Lamas (2023), Czubaszek y col., (2021) y Celus y col., 2006, quienes encontraron valores de 2.6 ± 0.1 ; 2.74 ± 0.04 y 3.3% respectivamente. Este contenido es alto en comparación a harinas de trigo tradicionales, las cuales de acuerdo con literatura contienen entre 1 y 1.4% de cenizas del total del grano en peso seco (Hallén y col., 2004).

Este alto porcentaje puede deberse al mayor contenido de germen y salvado provenientes del grano, lo cual a su vez, permite que exista una mayor cantidad de materiales inorgánicos, entre ellos minerales como el fósforo, calcio y magnesio (Ahmed y col., 2016). Lo anterior ya que este tipo de minerales se encuentran concentrados en estas fracciones del grano de la cebada (Atwell y Finnie, 2017).

Los lípidos encontrados en la harina de malta cervecera difirieron con los resultados reportados por Czubaszek y col., (2021) quienes encontraron un contenido mayor de este componente (7.26 ± 0.04), lo cual pudo deberse al tipo de extracción utilizado. En la literatura consultada se utilizó el método de Soxhlet, mientras que en este proyecto se utilizó el método de Goldfish.

El contenido de lípidos encontrados coincide con lo propuesto por Ginindiza y col., 2022 quienes sugieren un rango entre 4.5 y 8.3% de los componentes totales. Asimismo, el contenido de lípidos encontrados se encuentra en el rango sugerido por Devnani y col., (2023), donde se reporta que el grano gastado de cerveza posee rangos de lípidos entre 3 y 10%.

6.3. Cuantificación de gluten

La cuantificación de la harina de malta cervecera y el pan con sustitutos de gluten obtenido arrojó los datos mostrados en el cuadro 4. De acuerdo con la NOM-086-SSA1-1994, un producto se puede considerar libre de gluten si contiene hasta 500 ppm (base seca). En este caso, la harina de de malta cervecera cumple con este criterio bajo normas mexicanas. En el caso de la FDA (2023), en los últimos años se ha establecido un límite máximo de 20 ppm (base húmeda), por lo que en el caso de la legislación mexicana sí se cumple con la norma, mientras que se excede el límite fijado por la FDA.

Sin embargo, el contenido de gluten en la harina es inferior al del pan, contrario a lo que se esperaría. Esto debido a que al incorporar la harina con los demás

ingredientes de la formulación, se esperaría una reducción en el contenido del gluten. De este modo, puede deducirse que existió una contaminación cruzada probablemente debido a los residuos del tratamiento usando la harina de trigo (control) durante la elaboración del pan, la cual elevó los valores del gluten en el mismo (Wieser, 2021).

Cuadro 4. Resultados de cuantificación de gluten (ppm, b.s.)

Harina de malta cervecera	Pan (tratamiento M4 con S2)
24.5 ppm	54 ppm

Por otro lado, se ha estudiado el consumo de productos con diversos contenidos de gluten para determinar el umbral de consumo en las personas con intolerancia al mismo. Gilbert y col., (2006) concluyeron que un consumo de hasta 100 ppm supone un rango seguro para una dieta libre de gluten en celíacos. Asimismo, otros estudios han reportado como seguro el consumo de productos con <100 ppm (Cohen, 2019).

6.4. Diseño experimental

Se obtuvo el diseño de mezclas para las harinas de quinua y de cebada mostrado en el Cuadro 5. Se eligió trabajar con un diseño de mezclas con la intención de potencializar las propiedades de cada una de las harinas seleccionadas. Asimismo, se eligió una mezcla de las harinas con el objeto de producir una harina compuesta, las cuales han sido utilizadas con éxito en alimentos horneados (Julianti y col., 2019). En los últimos años se han realizado estudios con diseños experimentales para la obtención de panes libres de gluten. Ammar y col. (2022) evaluaron un pan libre de gluten con harinas de garbanzo, algarroba y arroz usando un diseño experimental;

mientras que Tuna y col. (2023) mediante un diseño de mezclas produjeron un pan libre de gluten con harina de judía blanca y avellanas.

Cuadro 5. Diseño experimental de puntos y proporciones de harinas de quinua y residuo de malta cervecera.

Tratamiento	Quinua (%)	Cebada cervecera (%)
CQ	100	0
CC	0	100
M1	50	50
M2	75	25
M3	85	15
M4	90	10
M5	95	5

Control quinua (CQ), Control cebada (CC)

Asimismo, se añadió un control con harina de trigo (CT) para evaluar las diferencias encontradas con los panes libres de gluten y tener un punto de referencia contra el cual comparar los resultados de los panes libres de gluten.

Tras la elaboración del pan y la evaluación del volumen, se eligió trabajar con la mezcla M4. Esto ya que como se verá en la sección de volumen (6.7.1), fue el que mejores características mostró; además de ser la mezcla que mostraba un menor resquebrajamiento al momento de su manipulación.

A partir de este momento, se comenzó a trabajar con esta mezcla para la adición y evaluación de los sustitutos de gluten.

Por otro lado, el diseño de mezclas para los sustitutos de gluten arrojó los datos siguientes (Cuadro 6). Como se mencionó, dicho diseño considera el uso de la mezcla M4 para la elaboración de los panes.

Cuadro 6. Diseño experimental y proporciones de sustitutos de gluten.

Tratamiento	Goma xantana (%)	Mucílago nopal (%)
S1	5	0
S2	3.75	12.5
S3	2.5	25
S4	1.25	37.5
S5	0	50

6.5. Elaboración del pan

Se elaboraron los panes control y los correspondientes a cada tipo de mezcla. Se muestra un corte transversal en cada tipo de pan en la siguiente figura (Figura 4).

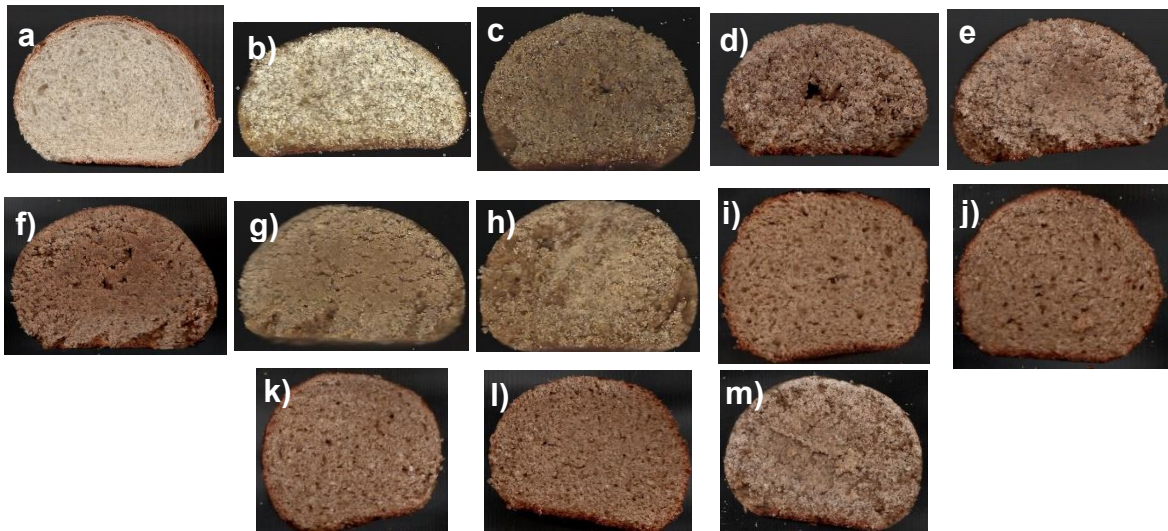


Figura 4. Panes obtenidos. a) CT b) CQ c) CC; d) M1 e) M2 f) M3 g) M4 h) M5 i) S1 j) S2 k) S3 l) S4 m) S5. Las mezclas S1-S5 se realizaron con la formulación M4

Como se observa, existen diferencias notorias a simple vista entre los panes sin sustitutos y aquellos que los poseen. Asimismo, existe una mayor similitud entre la miga obtenida en el pan control de trigo y los panes con sustitutos de gluten debido a la formación de una red de gel viscoelástica producida por los hidrocoloides adicionados (Mir y col., 2021). En las secciones subsecuentes se profundiza sobre las características de los panes obtenidos.

6.6. Caracterización de la mezcla de harinas (M4)

6.6.1. Pruebas farinográficas

El farinograma y los datos obtenidos con esta prueba se muestran en las figuras siguientes (Figura 5 y Cuadro 7).

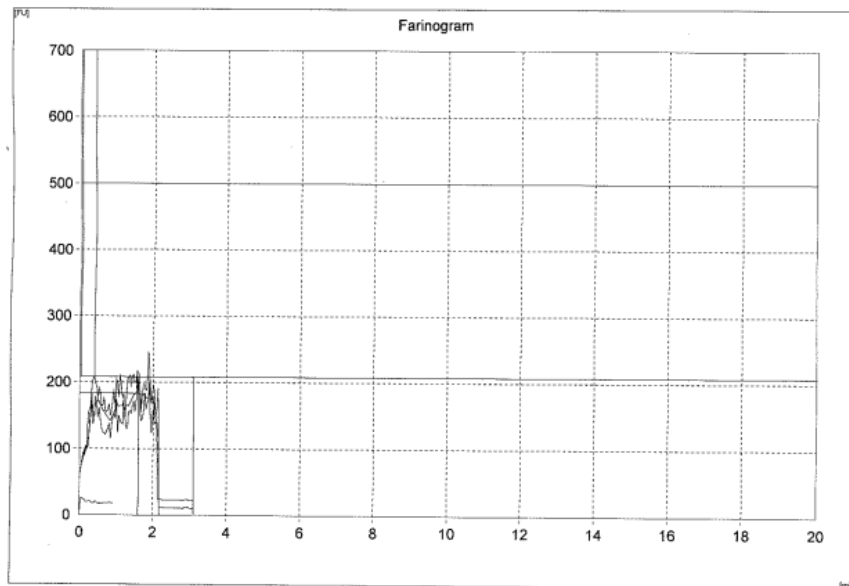


Figura 5. Farinograma de mezcla de harina de quinua y malta cervecera (M4).

Se observa que hay una ligera mayor absorción de agua en la mezcla de harinas que en la harina control. Esto puede deberse a la naturaleza propia de los cereales que conforman la mezcla, ya que se ha demostrado que la absorción de agua incrementa directamente con el contenido de fibra (Ginindza y col., 2022).

Pese a que la diferencia no es muy significativa, se ha observado que si existe un incremento del 58% al 61% al sustituir la harina de trigo con harina de malta cervecera en los panes (Ktenioudaki y col., 2013).

Sin embargo, como se observa en la Figura (5), ocurrió un decaimiento a los 1.6 minutos, lo cual no permitió que la masa se desarrollara y por ende, no se pudo determinar de forma correcta ninguno de los demás índices.

Cuadro 7. Índices farinográficos

Índice	CT	M4
WA% (500 FU)	59.5	60.9
WA% (14%)	56.1	57.1
DDT _{min}	6.3	1.6
Estabilidad _{min}	8.8	0
MTI _{FU}	28	208
Decaimiento _{min}	11.8	1.6

WA: Absorción de agua; DDT: Tiempo de desarrollo de la masa; MTI: Índice de tolerancia de mezclado

Esto pudo deberse a la composición proteica de las harinas, puesto que, al carecer de gluten, no se puede generar una masa con elasticidad o cohesividad que permitan llevar a cabo la extensión de la masa en el farinógrafo (Peña y Quintero, 2019).

De haberse realizado la prueba de forma correcta, se habría esperado un aumento en el tiempo de desarrollo y estabilidad de la masa debido al aumento de fibra dentro de la muestra (Ktenioudaki y col., 2013).

6.6.2. Pruebas extensográficas y alveográficas.

Se realizó un alveograma para la mezcla de harina elegida (M4) para conocer la plasticidad de la masa. Sin embargo, esta arrojó datos indeterminados debido a la falta de proteínas del gluten. Esto se debe a que los alveogramas se encargan de calcular la extensibilidad, tenacidad y la fuerza necesaria para que la masa se rompa, propiedades que son conferidas por el gluten (Henao y Aristizábal, 2009).

La extensibilidad es la encargada de cuantificar cuánto se puede extender la masa antes de romperse, por lo que se ha demostrado que está profundamente relacionada con la estructura de la red del gluten, puesto que, el entrelazamiento de los polímeros a nivel molecular permite que la masa sea estirada (Jødal y Larsen, 2021).

Así, al no existir suficientes proteínas de este tipo dentro de la mezcla de harina de quinua y cebada, esta red es inexistente y por ende, la masa no puede estirarse. Por otro lado, la fuerza de deformación, es decir, la energía necesaria para que la masa se rompa, es conocido por ser un indicativo directo de la cantidad y calidad del gluten, por lo que al no existir dichas proteínas, la masa se rompe de inmediato al aplicar fuerza (Espitia y col., 2008).

Esta falta de plasticidad en la masa explica, además, el resquebrajamiento y agrietamiento que se obtuvo en los panes antes y durante su cocción. Esto ya que, junto con otras propiedades, la extensibilidad es la encargada de evitar que las estructuras de la masa se rompan (Jødal y Larsen, 2021). Asimismo, la falta de extensibilidad se debe primordialmente a la falta de proteínas del gluten, mismas que generan fuerzas de unión estables en el interior de la masa durante la formación de la red tridimensional.

6.7. Caracterización del pan

6.7.1. Volumen

El volumen de los panes control y de los diseños de mezclas de harina y sustitutos fue medido para posteriormente ser utilizados como variables de respuesta del diseño experimental.

Como se observa (Cuadro 8), el volumen del control de trigo es significativamente superior a los panes realizados con las mezclas de harina sin gluten. Como se mencionó anteriormente, este menor volumen se debe a la falta de las proteínas de gluten dentro de la masa. De este modo, al no existir una red tridimensional que atrape los gases, se producen burbujas inestables que generan esta reducción en los volúmenes; además de ser participar en la generación de la textura seca y desmoronable que se observó al realizar los panes (Sader, 2018).

Una vez comparados los volúmenes de cada tipo de pan, se determinó que M4 es la mejor mezcla (90% quinua y 10% residuo de malta cervecera) misma que obtuvo un volumen específico promedio de 1.14 ± 0.05 mL/g.

No obstante, se encontraron diferencias en los valores obtenidos en este trabajo en comparación con los encontrados en literatura. En el caso de los controles de quinua y malta cervecera se reportaron 1.81 ± 0.1 (Elgeti y col., 2014) y 1.92 ± 0.2 (Xu y col., 2020), respectivamente. Asimismo, pese a que aún no se han publicado resultados de panes realizados con la mezcla de harina de quinua y residuo de malta cervecera, los volúmenes promedio de diversas mezclas de panes libres de gluten son mayores a las encontradas en este proyecto. Czubaszek y col. (2021), encontraron un volumen específico de 2.18 ± 0.07 mL/g en un pan libre de gluten a base de harina de centeno con 10% de malta cervecera. Tuna y col. (2023) hallaron volúmenes promedio entre 1.7 ± 0.01 y 3.8 ± 0.01 para panes realizados con una mezcla de harina de judía blanca y avellanas. Estas diferencias, además del tipo de pan que se realizó, pudo deberse a diversos factores, tales como los que se describen a continuación.

Se ha demostrado que el tamaño de partícula y el daño del almidón del grano tienen una estrecha relación con el volumen y calidad de los panes sin gluten (Hera y col., 2013). Se ha observado un mayor volumen específico en panes elaborados con harinas de tamaños de partícula pequeños, sin embargo, se debe tener cuidado de no dañar el almidón durante el procesamiento mecánico, pues diversos estudios han demostrado que existe una mayor retención de gases cuando el daño del almidón es bajo (Qin y col., 2021).

De este modo, el menor tamaño obtenido en los panes con harina de quinua y cebada cervecera pudo deberse al daño del almidón producido en la cebada al momento de su molienda o a la obtención de partículas demasiado grandes. Por otro lado, también pudo influir el tipo de quinua utilizado, ya que Elgeti y col., (2014) obtuvieron menores volúmenes en panes de quinua integral (1.81 ± 1.8 mL/g) en comparación a la quinua blanca (2.19 ± 0.04 mL/g).

Relacionado al tipo de pan elaborado, las cantidades de cada uno de los ingredientes añadidos pudo tener una influencia sobre el volumen de los panes. Pese a que la sal cumple una función en la absorción de agua en la masa debido a su carácter hidróscópico, su exceso pudo frenar la acción de la levadura debido a la presión osmótica y la reducción de la acidez de la masa (Reynhart, 2017). Asimismo, el uso de huevo deshidratado en pudo alterar los resultados, esto ya que durante el proceso de pulverización del huevo, se pueden llegar a dañar algunas sustancias importantes para su aprovechamiento como incorporador de aire y emulsionante en la miga (Arias y Elias, 2006).

De este modo, algunas alternativas para mejorar el volumen de los panes libres de gluten pueden consistir en la adición del huevo líquido, el estudio de los niveles de sal añadidos, e incluso la aplicación de nuevos tratamientos, tales como la cocción por extrusión (Jafari y col., 2018).

En base a los volúmenes obtenidos, se comenzó a trabajar exclusivamente con la mezcla M4 para la adición de los sustitutos. Asimismo, en base en el volumen, se encontró que la mejor mezcla de sustitutos es la que contiene 3.75% de goma

xantana y 15 ml de mucílago de nopal, siendo este el más cercano al volumen del control de trigo. Mismo que una vez validado por medio de un modelo de optimización, arrojó que la mejor mezcla es la dada por 86% goma xantana y 6.5% mucílago de nopal.

Dicho modelo de optimización fue realizado con MatLab, eligiéndose el modelo estadístico de Tukey, dado que mostró el mejor ajuste respecto a las variables introducidas (volumen específico y entropía) con una R^2 de 95.66 y un valor $p < 0.05$.

Cuadro 8. Volumen específico de los diferentes panes obtenidos

Muestra	Volumen específico (mL/g)
CT	3.11±0.14 ^a
CQ	0.91±0.06 ^b
CC	1.14±0.04 ^c
M1	1.0±0.05 ^{bde}
M2	1.07±0.05 ^{cd}
M3	0.92±0.04 ^{beg}
M4	1.14±0.05 ^{cdf}
M5	0.98±0.05 ^{bdegh}
S1	1.83±0.02 ⁱ
S2	1.96±0.06 ^j
S3	1.7±0.05 ^k
S4	1.41±0.05 ^l
S5	1.09±0.04 ^{cdefh}

Control trigo (CT); Control quinua (CQ); Control residuo de malta cervecera (CC); Mezcla harinas: M1-M5; Mezcla sustitutos: S1-S5 (añadidos a M4). Letras distintas representan diferencias significativas ($p < 0.05$)

Es importante resaltar que el aumento en el volumen de los panes al adicionar los hidrocoloides se debe a su propiedad hidrofílica y su capacidad de conferir

propiedades viscoelásticas a la masa, gracias a la formación de un gel frío que simula una red estructural que estabiliza las células de gas permitiendo que éste se retenga (Gallagher, 2009; Mir y col., 2021).

Si bien, el uso de la goma xantana ha sido enormemente estudiado (Hejrani y col., 2017; Encina-Celada y col., 2018; Wu y col., 2022) y se conoce su propiedad como sustituto de gluten; se observó un efecto sinérgico al añadir el mucílago de nopal. Este efecto pudo deberse a la interacción entre ambos tipos de hidrocoloides, ya que se ha descubierto que la mezcla de dos o más hidrocoloides optimiza la reología y textura de los productos al generar propiedades específicas en los mismos gracias a la formación de un gel más fuerte (Boukid, 2021; Cofelice y col., 2023). El aumento de volumen puede deberse a que actuando en conjunto, la red estructural formada por el gel de los hidrocoloides estabilizan la masa al incrementar la viscosidad entre las moléculas de la masa, de modo que se retiene una mayor cantidad de gas (Chakraborty y col., 2020).

Cabe mencionar que, el uso de goma xantana supone ser una buena opción para el aumento del volumen en el caso específico del uso de harinas de cebada cervecera ya que esta goma en concreto se caracteriza por ser resistente a la degradación enzimática, por lo que permite conferir sus ventajas pese a la naturaleza enzimática de la cebada (Matuda y col., 2008).

Además, se observa un mayor volumen en los panes con goma xantana en comparación al mucílago por sí solo, lo cual puede deberse a la abundancia de grupos hidroxilo de la goma, que le permiten interactuar y unirse con moléculas de

agua que a su vez, se traducen en una mayor absorción de la misma y con ello, un mayor volumen.

6.7.2. Análisis de imagen

Se realizó el análisis de imagen para cada una de las muestras de pan realizadas. Las imágenes obtenidas en el software ImageJ se observan en la figura 6. Los panes con más similitud al control de trigo (Fig. 6a) son aquellos a los que se adicionaron los sustitutos de gluten, mismos que poseen una miga más desarrollada y formación de alveolos gracias a la retención de gas.

Sabiendo que entre más cercano a 1 es el valor de circularidad, más próximos a un círculo son los alveolos de la miga, se observa que la mezcla S2 contiene los alveolos más circulares, incluso superando al control de trigo.

Se encontraron valores de circularidad con valores muy cercanos entre sí, esto debido a que la goma produjo burbujas de aire similares, aunque en mayor o menor proporción. Asimismo, la mayor circularidad de los alveolos en los panes libres de gluten se debe a que la red formada por el gluten no es una estructura totalmente ordenada (Heberle y col., 2022).

Se observó un incremento del segundo momento angular a la vez que el contenido de mucílago aumentaba. Este aumento significa que la uniformidad de la miga es directamente proporcional a la cantidad de mucílago e indirectamente proporcional a la cantidad de goma xantana (Fongaro y col., 2012).

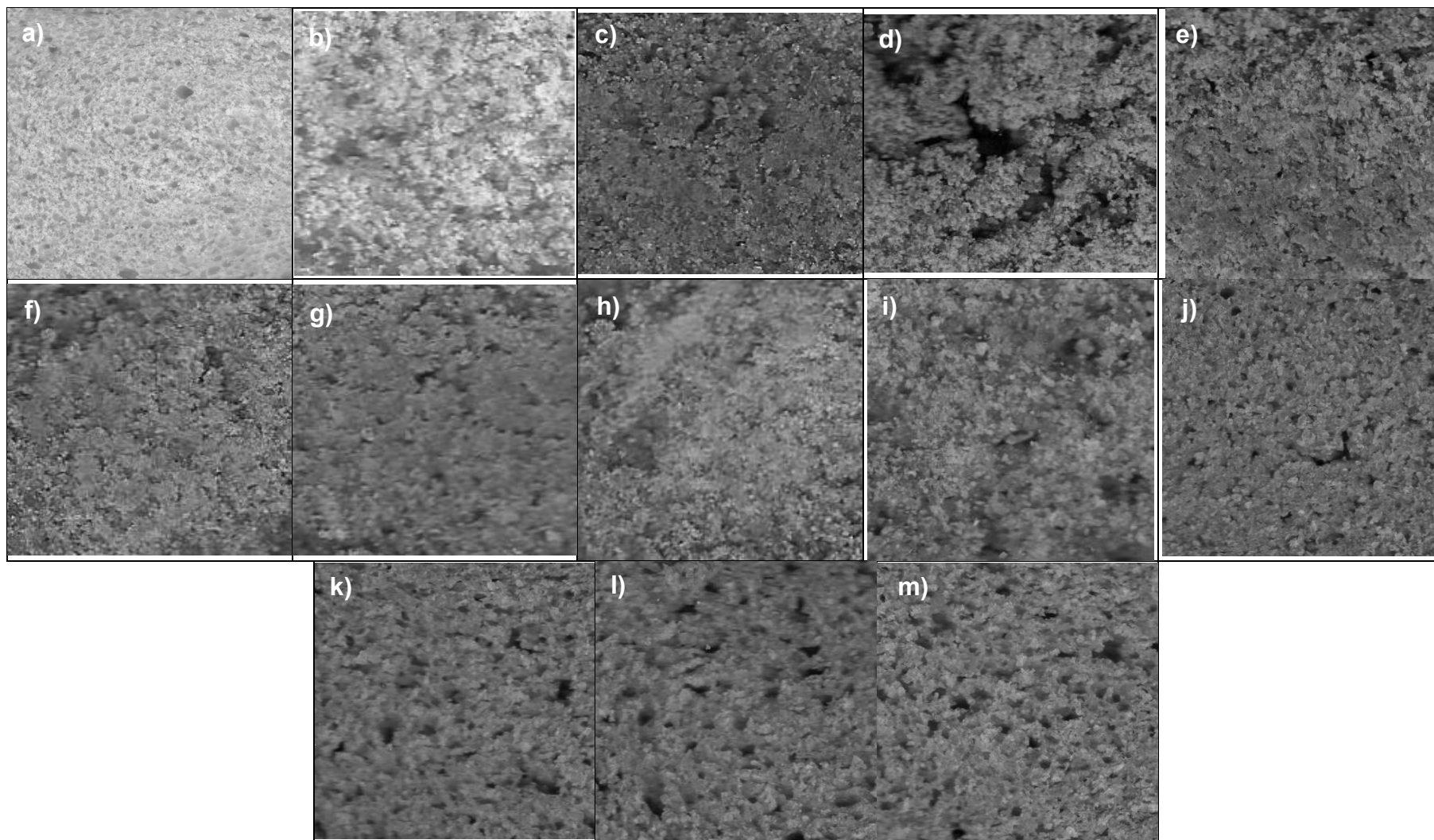


Figura 6. Miga de pan procesada en ImageJ. a) CT, b) CQ, c) CC, d) M1, e) M2, f) M3, g) M4, h) M5, i) S1, j) S2, k) S3, l) S4, m) S5.

La entropía hace referencia al desorden y complejidad dentro de la imagen, en este caso, en la miga de pan. De acuerdo con los resultados obtenidos, el valor de entropía de la mezcla S2 es la que mayor similitud tiene con el control de trigo; esto podría significar que la red más fuerte y/o parecida a la red estructural del gluten se formó con estas proporciones de hidrocoloides (Tournier y col., 2012).

El feret y el feret mínimo determinan la distancia que existe entre dos de los alveolos de la miga. El feret es la distancia más larga encontrada entre dos alveolos, siendo esta la de la mezcla S4. Por otro lado, el feret mínimo es la distancia más pequeña entre dos puntos; en este caso, el valor más semejante a los panes de trigo es el de la mezcla S2. Esto significa que esta mezcla contiene una miga más cerrada que las demás mezclas, y que por ende, tiene un comportamiento similar al pan de trigo (NIH, 2023)

Por otro lado, se ha demostrado que el tamaño y la cantidad de los poros de la miga están estrechamente relacionados con la masticabilidad (Ammar y col., 2022) por lo que, como se muestra en la Figura 7, se realizó una comparativa entre el número de alveolos y su tamaño. Dicha comparación se realizó entre el pan de trigo control (CT), el pan de la mezcla elegida sin sustitutos (M4) y el pan con sustitutos elegido (S2).

En esta se puede concluir que el pan con sustitutos tiene tamaño y número de alveolos semejante a los encontrados en un pan de trigo común; por lo que además de tener una estructura similar, tendrá una masticabilidad semejante.

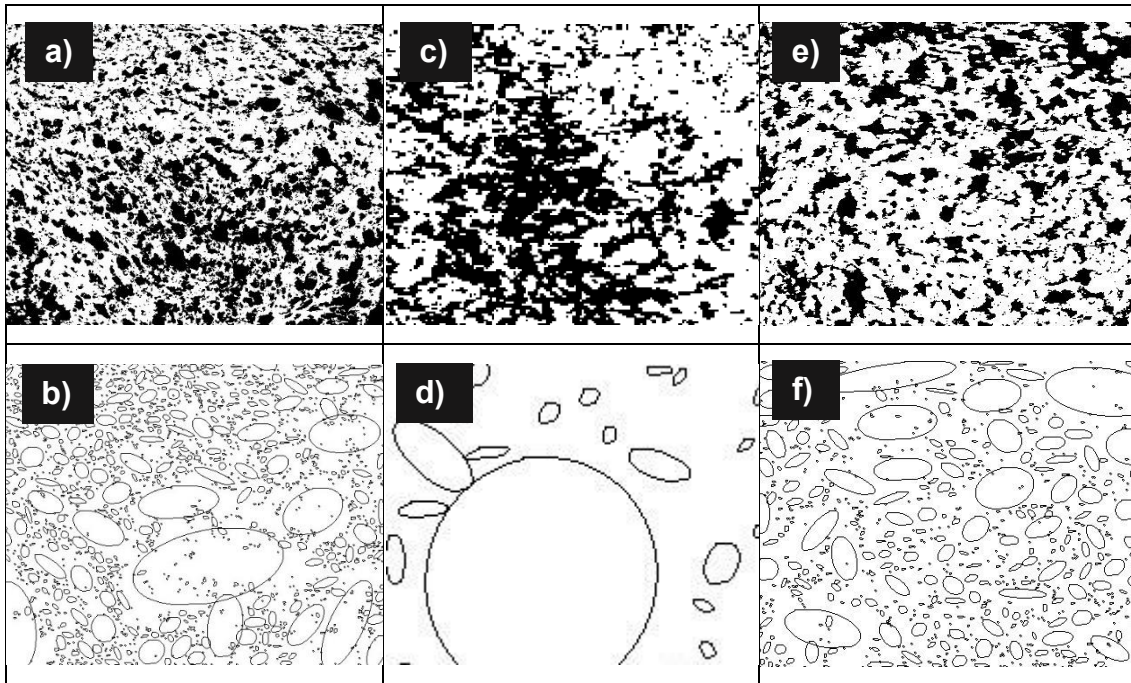


Figura 7. Análisis de partículas de pan control de trigo, pan sin sustitutos de gluten y pan adicionado con sustitutos. CT (a y b); M4 (c y d); S2 (e y f).

6.7.3. Textura

El análisis de textura de las mezclas de pan sin sustitutos no pudo realizarse debido a una sobrecarga del texturómetro. Dicha sobrecarga impidió que el pan fuera comprimido desde el momento de la aplicación de la carga inicial del equipo. Esta sobrecarga pudo ocurrir, al igual que en el caso del farinograma, por la falta de gluten en la estructura del pan, lo cual generó una textura apelmazada en el pan. Eso a su vez, pudo generar que el equipo detectara el pan como una unidad sólida que no se podía comprimir. Lo anterior significó un esfuerzo superior para el equipo y con ello, un error. No obstante, las pruebas para los panes con la mezcla de sustitutos elegida si lograron realizarse (Figura 8).

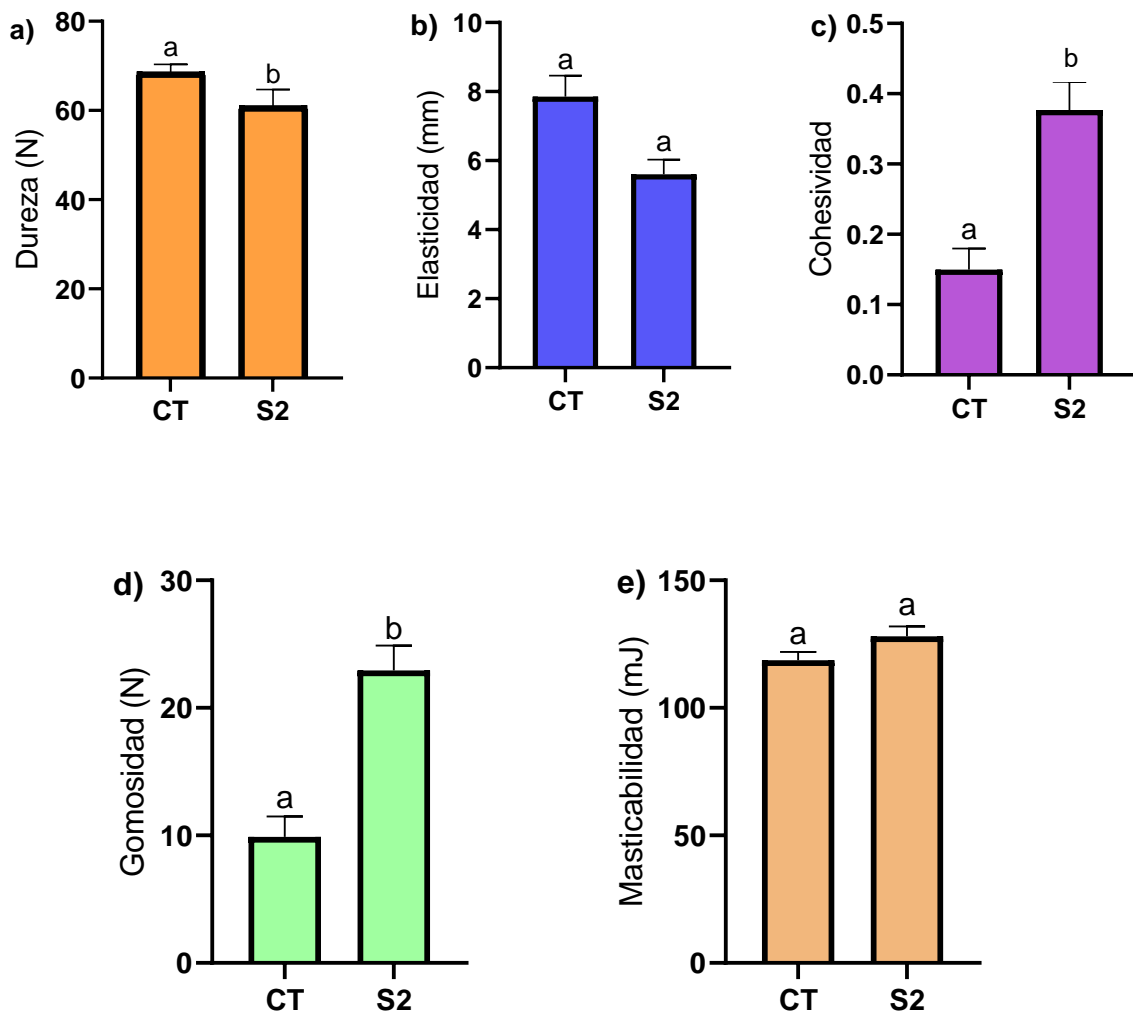


Figura 8. Análisis de textura TPA para pan control de trigo y pan seleccionado (M4 con S2). Letras diferentes representan diferencias significativas ($p < 0.05$)

Se observó una disminución significativa en la dureza del pan de harina de quinua y cebada cervecera respecto al pan de trigo. Esta menor dureza puede deberse a la presencia de los sustitutos de gluten. Se ha encontrado que la dureza está relacionada con el contenido de humedad, y que a mayor contenido de humedad, menor dureza (Wong, 2012). Así, debido a que la goma xantana interactúa con el

agua por medio de puentes de hidrógeno, genera una mayor absorción y retención de agua que puede reflejarse como una disminución en la dureza del pan (Tebben y Li, 2019).














La gomosidad también resultó en un aumento significativo en el pan con sustitutos de gluten. La gomosidad es el producto de la cohesividad y la dureza. El aumento de este atributo puede deberse a la adición de la goma que por su naturaleza de goma per se, puede incrementar la gomosidad del alimento. El aumento de esta propiedad puede considerarse positivo comparado con un pan sin sustitutos, ya que permite que el alimento sea mordido sin que se desmorone antes de incluso, ser masticado (Bielza, 2019). Por otro lado, el análisis estadístico de los datos permitió determinar que no existen cambios significativos en masticabilidad, elasticidad y cohesividad entre los panes estudiados, es decir, el pan de trigo control y el pan con sustitutos de gluten (S2). Estos resultados demuestran que los aditivos utilizados en el pan brindaron las características viscoelásticas deseadas en la masa para que se asemejara a una masa de trigo tradicional.

6.7.4. Color

Se evaluó el color de los diversos panes elaborados. Al compararlo con el pan control de trigo se observan diferencias significativas. Este cambio de color se debe en primer lugar a la naturaleza propia del residuo de malta cervecera, la cual genera una coloración café oscuro en el pan (Quintanar, 2023). Este parámetro no fue utilizado para elegir la mezcla idónea debido a que puede ser muy variable dependiendo el tostado que se de al pan al momento de su cocción (Alegret y col., 2004). Sin

embargo, cobra una especial relevancia en la aceptabilidad del pan, pues se buscan panes con colores cafés o dorados que sean agradables a la vista de los consumidores.

Cuadro 9. Color de los diferentes panes obtenidos

Pan	L*	a*	b*	Color
CT	47.26±6.7 ^a	16.56±1.2 ^a	30.79±4.78 ^a	
CQ	54.62±3.113 ^{ab}	9.32±1.116 ^b	30.09±1.98 ^{ab}	
CC	37.94±3.07 ^c	7.48±1.25 ^{abc}	16.33±4.45 ^c	
M1	37.07±1.37 ^{cd}	7.68±0.811 ^{bcd}	15.43±0.83 ^{cd}	
M2	38.81±2.47 ^{bcde}	8.94±1.62 ^{bcde}	20.12±1.30 ^{bcde}	
M3	40.44±5.94 ^{abcdef}	8.06±1.63 ^{abcdef}	22.36±2.20 ^{abcdef}	
M4	41.89±2.42 ^{abcdefg}	9.26±0.83 ^{abcdefg}	22.79±1.24 ^{abcdefg}	
M5	42.66±2.460 ^{abcdefgh}	9.56±1.47 ^{abcdefgh}	23.77±2.77 ^{abcdefgh}	
S1	44.88±5.92 ^{abcdefghi}	10.68±1.89 ^{abcdefghi}	24.03±2.81 ^{abcdefghi}	
S2	38.81±5.31 ^{abcdefghij}	13.77±1.79 ^{abcdefghij}	22.38±4.70 ^{abcdefghij}	
S3	40.96±4.62 ^{abcdefghijk}	13.02±2.25 ^{abcdefghijk}	24.22±2.46 ^{abcdefghijk}	
S4	44.56±3.755 ^{abcdefghijkl}	10.7±1.93 ^{abcdefghijkl}	25.07±1.78 ^{abcdefghijkl}	
S5	49.17±2.10 ^{abcdefghijkl}	7.54±1.16 ^{abcdefghijkl}	24.50±1.34 ^{abcdefghijkl}	

Letras diferentes representan diferencias significativas ($p < 0.05$)

Tanto cualitativa como cuantitativamente, se obtuvo un visible incremento de color conforme aumentaba la cantidad de residuo de cebada adicionada (M1-M5). Debido a esto, se ha encontrado que únicamente se puede incluir de forma satisfactoria hasta un del 10% de cebada en productos de panificación, pues de otro modo se obtienen panes con un color demasiado oscuro (Garret y col., 2021).

El valor de L^* va en una escala de 0 a 100 de acuerdo con la luminosidad u oscuridad de la muestra (Sánchez, 2014). Los panes de las mezclas oscilan entre 34.07 y 42.66, siendo 34.07 el que mayor contenido de cebada tiene. Por otro lado, las mezclas con sustitutos de gluten rondan entre 38.81 y 49.17, siendo S2 el de menor luminosidad. Esta menor luminosidad puede deberse al contenido de proteínas, azúcares reductores y enzimas que contiene la harina de cebada. Los dos primeros estarían relacionados con la reacción de Maillard, lo cual genera un color más oscuro (Korus y col., 2022). Además de que como se mencionó anteriormente, pudo influir el grado de horneado y el tipo de cerveza del que se extrajo la cebada; esto ya que las cervezas pueden llevar diversos granos de tostado y/o tener diferente grado de actividad enzimática. Esto último es importante ya que se ha demostrado que entre mayor la actividad enzimática más oscuro será el color de la cebada malteada, esto ya que habrá más partículas de la capa exterior del grano (Beranbaum y Witschonke, 2019).

Los valores de a^* y b^* hacen referencia a un punto dentro del círculo cromático. Los colores rojo(+)-verde(-) corresponden con a^* , mientras que los colores amarillo(+)-azul(-) corresponden con b^* (Sánchez, 2014). Se observan valores cercanos, que corresponden a tonalidades cercanas de café, las cuales como se observa en el cuadro de resultados, son similares a simple vista.

6.7.5. Microscopía electrónica de barrido

Para evaluar la microestructura del pan, se realizaron microscopías electrónicas de barrido (Figuras 9 y 10). Se observaron muestras de las harinas utilizadas (trigo,

quinua y cebada cervecera) para determinar su efecto sobre la microestructura del pan. Las muestras de pan evaluadas fueron CT, M4 y S2, de modo que fuera posible realizar una comparativa de la red estructural del pan de trigo (CT), el efecto de la ausencia de gluten sobre la microestructura del pan (M4) y el resultado de adicionar sustitutos de gluten en el pan (S2).

Debido al pequeño tamaño del gránulo de almidón que muestran las harinas de quinua y residuo de cebada cervecera, los gránulos de almidón fueron difíciles de percibir en las muestras de pan analizadas. De acuerdo con las imágenes obtenidas en microscopía, la quinua posee gránulos de almidón de aproximadamente 2 μm (Figura 9f), mientras que la harina de malta cervecera contiene gránulos pequeños de alrededor de 4 μm (Figura 9c). Esto coincide con lo reportado en literatura, donde se afirma que los gránulos de quinua poseen tamaños en un rango entre 0.5 y 3 μm y los de cebada entre 2 y 7 μm para los gránulos pequeños y entre 10 y 35 μm para los grandes (Li y Zhu, 2018; De Schepper, 2020). En cuanto a la abundancia de estos gránulos, se observa que en el caso de la harina de quinua existe un mayor número.

Lo anterior resulta coincidente con los datos conocidos de este tipo de granos, pues se sabe que en el caso de la quinua el almidón es más abundante (53-73%) que en el grano de malta cervecera (aprox. 20%) (Parchami y col., 2021; Mu y col., 2023).

El tamaño y cantidad de los gránulos de harina de trigo no fue estudiado con detenimiento debido a que los panes de interés no contienen este tipo de harina; no obstante como se observa, contiene gránulos más grandes y abundantes que incluso

logran verse con más facilidad en las micrográficas de los panes control, y que de acuerdo con Chung y col. (2003), poseen tamaños de hasta 35 μm .

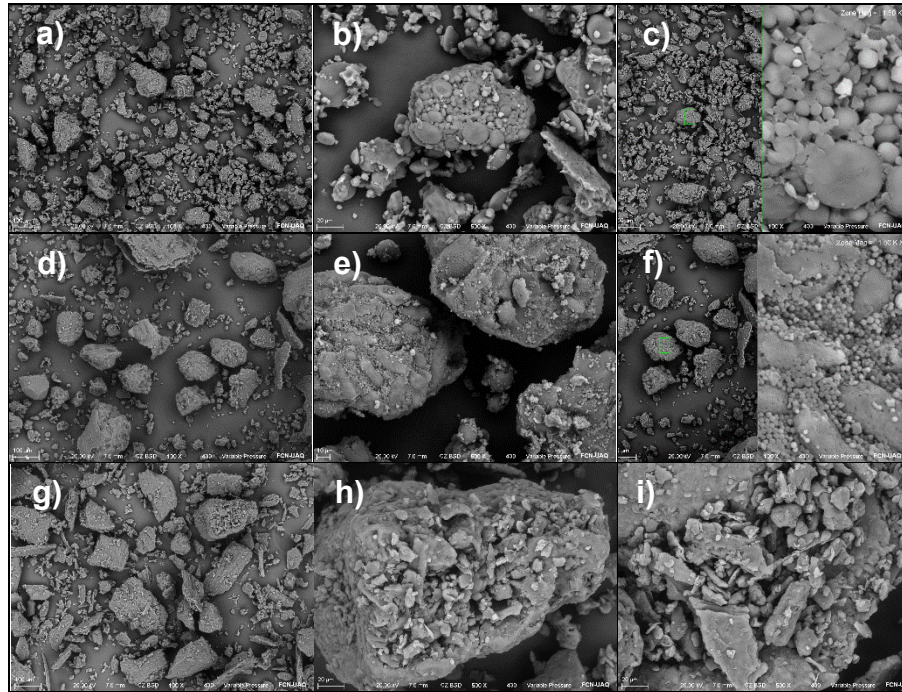


Figura 9. Microscopía electrónica de barrido de harina de cebada, quinua y trigo (Residuo de malta cervecera: a, b, c; quinua: c, d, e; trigo: f, g, h)

Se observan bajo diferentes aumentos las estructuras formadas en el pan. Como se ha mencionado ya, el mayor volumen en el pan de trigo se debe a la captura de aire dentro de la red de gluten, misma que genera la formación de burbujas de aire (Su y col., 2023).

En las micrográficas obtenidas, logran visualizarse poros formados en la masa, los cuales corresponden a las zonas donde el aire fue captado. Este tipo de estructuras no se observan en el pan sin gluten, en el cual únicamente se ven rasgaduras.

Este tipo de rompimientos se deben a que la masa no tenía las propiedades viscoelásticas necesarias para que las burbujas expandieran la masa. Al adicionar

los sustitutos de gluten, este tipo de poros comenzaron a volver a formarse, lo cual comprueba que las masa adoptó mayor extensibilidad y con ello, logró capturar aire, explicando así el mayor volumen generado en estos panes. Sin embargo, los poros y estructuras formadas no son iguales a las formadas en el pan de trigo, ya que a pesar de que los sustitutos permiten la formación de una red, esta no tiene las características de la red de gluten observada en la imagen de la Fig. 10a.

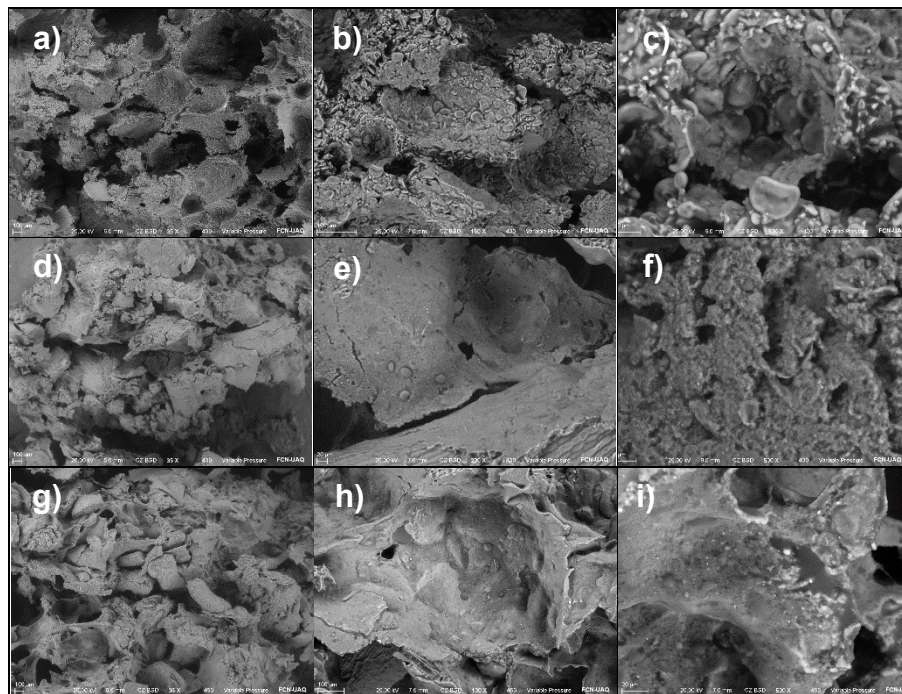


Figura 10. Microscopía electrónica de barrido de los panes obtenidos (CT: a, b, c; M4: d, e, f; S2: g, h, i)

Por otro lado, la goma xantana y el mucílago de nopal crearon un tipo de red continua y uniforme que envolvió a los almidones en todas las micrografías. De acuerdo con Zhao y col., 2021, la estructura en forma de velo se ve ayudada por estos gránulos de almidón para la retención de gases y la estabilidad de la estructura per se. La falta de este complejo en el pan sin sustitutos es otra razón por la que este pan tuvo

un volumen específico tan bajo en comparación a los panes CT y los añadidos con sustitutos.

Debido al tamaño de los gránulos de almidón, estos no son tan perceptibles en los aumentos analizados, en comparación al pan de trigo, donde además se encuentran embebidos en la red de gluten (Su y col., 2021).

6.8. Pruebas microbiológicas

Para asegurar la calidad de los panes y la seguridad microbiológica de la harina de cebada cervecera obtenida, se realizaron pruebas microbiológicas de acuerdo con la NOM-210-SSA1-2014 y NOM-147-SSA1-1996 (Cuadro 10).

Cuadro 10. Resultados de pruebas microbiológicas y niveles permitidos en norma.

Microorganismo	Harina		Pan	
	Permitido	Encontrado	Permitido	Encontrado
Coliformes	<30 UFC/g	<10 UFC/g	<10 UFC/g	<10 UFC/g
Salmonella	Negativa	<10 UFC/g	Negativa	No detectable
Hongos y levaduras	300 UFC/g	<10 UFC/g	300 UFC/g	<10 UFC/g
Mesófilos	100000 UFC/g	<10 UFC/g	1000 UFC/g	1x10 ³ UFC/g

Según con los datos obtenidos, tanto el pan como la harina de malta cervecera obtenidos cumplen con las normas microbiológicas mexicanas, por lo que su consumo es seguro.

6.9. Evaluación sensorial

Se realizó una evaluación sensorial para determinar el grado de aceptabilidad de los panes realizados. Basados en la escala Likert, se obtuvieron los resultados mostrados en el Cuadro 11 y en la Figura 11. Como se observa, el pan CT es el que mayor aceptabilidad tiene, esto debido a las propiedades que poseen estos tipos de panes y a la habituación del paladar a estos sabores.

Cuadro 12. Aceptabilidad de los panes de quinua y residuo de malta cervecera con una escala de 1 a 5

Tratamiento	Sabor	Color	Textura	Olor
CT	4.58 ± 1.1 ^{be}	4.76 ± 0.9 ^c	4.48 ± 0.9 ^c	4.38 ± 0.9 ^c
CQ	2.92 ± 1.0 ^a	3.72 ± 0.8 ^a	2.66 ± 0.8 ^a	3.80 ± 0.9 ^a
CC	3.54 ± 0.6 ^{cd}	3.04 ± 0.4 ^{ab}	3.12 ± 0.7 ^{ab}	3.34 ± 0.8 ^{ab}
M4	3.20 ± 0.9 ^{ad}	3.56 ± 1.0 ^{ab}	3.00 ± 1.1 ^{ab}	3.72 ± 0.7 ^{ab}
S2	3.90 ± 1.0 ^e	4.05 ± 0.8 ^c	3.86 ± 0.9 ^{bc}	4.13 ± 1.0 ^{bc}

Letras diferentes representan diferencias significativas ($p < 0.05$)

Se obtuvieron valores bajos de aceptabilidad en los panes libres de gluten, lo cual concuerda con otros estudios realizados, en los cuales la incorporación de cebada cervecera ha disminuido considerablemente la aceptabilidad de los productos (Garret y col., 2021).

No obstante, el pan S2, que contiene sustitutos de gluten, obtuvo una aceptabilidad bastante cercana al pan de trigo. El incremento en la aceptabilidad se dio gracias a las propiedades que confirieron los aditivos, dado que disminuyeron la consistencia terrosa y desmoronable al tacto de los panes y aumentaron la esponjosidad y el volumen. Esto es importante, ya que de manera habitual, la textura esperada en un

pan es jugosa y elástica, así como comprensible y deformable al tacto (Pacheco, 2016).

La evaluación sensorial permitió concluir que el pan elegido posee una aceptabilidad elevada, por lo que, la mezcla de pan elaborada tiene beneficios prometedores para su consumo en la población, con lo cual, se cumple el objetivo de ayudar a la población celiaca.

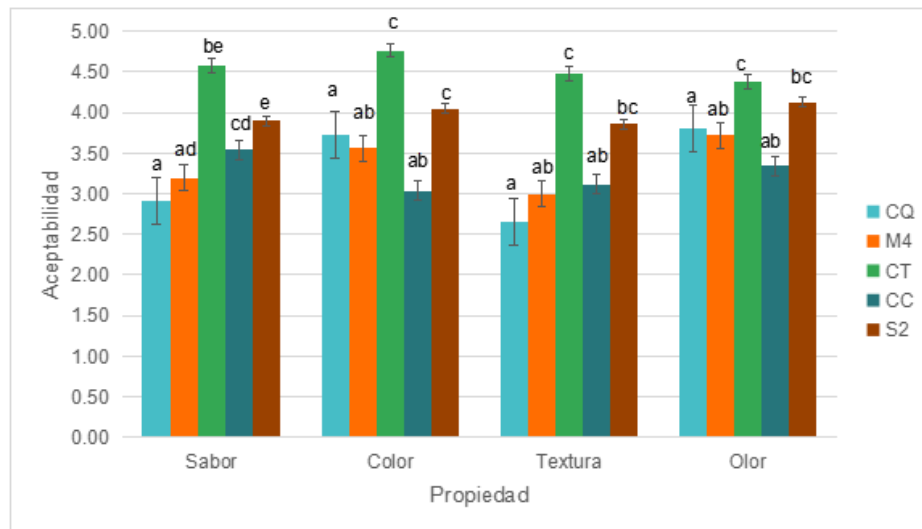


Figura 11. Resultados de la evaluación sensorial realizada. Letras diferentes representan diferencias significativas ($p < 0.05$)

7. CONCLUSIONES

La adición de mucílago de nopal y goma xantana brindó mejores propiedades (volumen, textura, calidad de miga y aceptación sensorial) en el pan libre de gluten.

La sustitución óptima de aditivos encontrada para la elaboración de pan gluten es 6.5% de mucílago de nopal y 3.75% de goma xantana. El pan elaborado a base de quinua y residuo de malta cervecera representa una alternativa para las personas que padecen alguna intolerancia al gluten y una posible solución a la gran producción de residuos industriales como lo son el residuo cervecero y el mucílago de nopal.

8. BIBLIOGRAFÍA.

Abràmoff, M. D., Magalhães, P. J., & Ram, S. J. (2004). Image processing with ImageJ. *Biophotonics international*, 11(7), 36-42.

Agrawal, D., Gopaliya, D., Willoughby, N., Khare, S. K., & Kumar, V. (2022). Recycling potential of brewer's spent grains for circular biorefineries. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 100748.

Ahmed, M. A. R. H., Mustafa, A. I., Hussan, H. A. R., & Elfaki, A. E. (2016). Proximate analysis, protein and starch digestibility, specific volume, and sensory evaluation of (Gluten-Free) tin bread. *Open Access Library Journal*, 3(6), 1-8.

Alegret, P. L., Riera, J. B., & Salcedo, R. C. (2004). *Química y Bioquímica de los alimentos II (eBook)*. Edicions Universitat Barcelona.

Alhajj, M, Zubair, M., & Farhana, A. (2023). Enzyme linked immunosorbent assay. StatPearls.

Ammar, I., Sebi, H., Aloui, T., Attia, H., Hadrich, B., & Felfoul, I. (2022). Optimization of a novel, gluten-free bread's formulation based on chickpea, carob and rice flours using response surface design. *Heliyon*, 8(12).

Arauzo, P. J., Du, L., Olszewski, M. P., Zavala, M. M., Alhnidi, M. J., & Kruse, A. (2019). Effect of protein during hydrothermal carbonization of brewer's spent grain. *Bioresource technology*, 293, 122117.

Arendt, E. K., Ryan, L. A., & Dal Bello, F. (2007). Impact of sourdough on the texture of bread. *Food microbiology*, 24(2), 165-174.

Arendt, E., & Dal Bello, F. (Eds.). (2011). *Gluten-free cereal products and beverages*. Elsevier.

Arias, C., & Eliaz, J. (2006). Como hacer pan en casa. Los libros del Nacional

Armendáriz-Sanz, J. L., & Carrero-Casarrubios, M. P. (2019). *Elaboraciones de pastelería y repostería en cocina* (2.a ed.). Ediciones Paraninfo, SA.

Arroyave Sierra, L. M., & Esguerra Romero, C. (2006). Utilización de la Harina de Quinoa (*Chenopodium quinoa wild*) en el proceso de panificación.

Atwell, W. A., & Finnie, S. (2016). *Wheat flour*. Elsevier.

Barriga, X. (2011). *Pan: hecho en casa y con el sabor de siempre*. Grijalbo.

Bedolla, S., Dueñas-Gallegos, C., Esquivel, I., Favela, T., Guerrero, R., Mendoza, E., Navarrete, A., Olguin, L. E., Ortiz, J., Pacheco, O., Quiroz, M., Ramirez, A., & Trujillo, M. (2004). *Introducción a la Tecnología de Alimentos* (2.ª ed.). Editorial Limusa.

Belitz, H. D., Grosch, W., & Schieberle, P. (2008). *Food chemistry*. Springer Science & Business Media.

Benitez-Serrano, M., Nayares-Gómez, M., & Jaime-Ornelas, T. Elaboración y evaluación de un pan de caja con harina integral de trigo y frijol negro (*Phaseolus vulgaris*). *Memorias*, 108.

- Beranbaum, R. L., & Witschonke, A. (2019). *La biblia del pan*. RBA Libros.
- Bhat, I. M., Wani, S. M., Mir, S. A., & Masoodi, F. A. (2022). Advances in xanthan gum production, modifications and its applications. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 42, 102328.
- Bianco, H. W., Capote, T., & Garmendia, C. (2014). Determinación de humedad en harina precocida de maíz blanco utilizando un horno de microondas doméstico. *Revista del Instituto Nacional de Higiene Rafael Rangel*, 45(2), 50-63.
- Bielza López-Manterola, G. (2019). Caracterización de la percepción oral de la textura de seis alimentos sólidos.
- Biesiekierski, J. R. (2017). What is gluten?. *Journal of gastroenterology and hepatology*, 32, 78-81.
- Brabender. (2021). Farinógrafo®-TS ensayo de calidad de la harina fácil de ejecutar y estandarizado en todo el mundo. Brabender. Recuperado 9 de febrero de 2023 de <https://www.brabender.com/typo3conf/ext/cokcb2web/Resources/Public/Files/4df00e6c3376b4805b4a3de7c77cf87e.pdf?d=1&p=TkdSbURCbE5Nek16MllqUU1EVmlH RXpaVTNZejNZMIOMIU9X01tYzROR2M0.pdf>
- Cabrera, C. G., Arteaga, Q. J. D. P., & Benavides, Q. I. S. E. (2013). Extracción y caracterización reológica del mucílago de *Malvaviscus penduliflorus* (San Joaquín). *Revista Cubana de plantas medicinales*, 18(4), 567-574.

Cakmak, H., Ilyasoglu-Buyukkestelli, H., Sogut, E., Ozyurt, V. H., Gumus-Bonacina, C. E., & Simsek, S. (2023). A review on recent advances of plant mucilages and their applications in food industry: Extraction, functional properties and health benefits. *Food Hydrocolloids for Health*, 100131.

Campos-Rodriguez, J., Acosta-Coral, K., & Paucar-Menacho, L. M. (2022). Quinoa (*Chenopodium quinoa*): Composición nutricional y Componentes bioactivos del grano y la hoja, e impacto del tratamiento térmico y de la germinación. *Scientia Agropecuaria*, 13(3), 209-220.

Canelo-Álvarez, F., de Dios Figueroa-Cárdenas, J., Martínez-Cruz, E., Pérez-Robles, J. F., Villa, G. A., Mariscal-Moreno, R. M., & Medina, J. J. V. (2023). Effect of nixtamalization on gluten-free whole corn, dough viscoelasticity, and the bread-making quality of leavened corn bread. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 31, 100648.

Cermeño, M., Dermiki, M., Kleekayai, T., Cope, L., McManus, R., Ryan, C., ... & FitzGerald, R. J. (2021). Effect of enzymatically hydrolysed brewers' spent grain supplementation on the rheological, textural and sensory properties of muffins. *Future Foods*, 4, 100085.

Chakraborty, S. K., Kotwaliwale, N., & Navale, S. A. (2020). Selection and incorporation of hydrocolloid for gluten-free leavened millet breads and optimization of the baking process thereof. *LWT*, 119, 108878.

Chaudhary, N., Walia, S., & Kumar, R. (2023). Functional composition, physiological effect and agronomy of future food quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): A review. *Journal of Food Composition and Analysis*, 105192.

Choque, D., Ligarda-Samanez, C. A., Choque-Quispe, Y., Solano-Reynoso, A. M., Ramos-Pacheco, B. S., Zamalloa-Puma, M. M., ... & Alzamora-Flores, H. (2023). Multimetal removal in aqueous medium using a potato starch/nopal mucilage copolymer: A study of adsorption kinetics and isotherms. *Results in Engineering*, 18, 101164.

Chung, O. K., Park, S. H., Tilley, M., & Lookhart, G. L. (2003). Improving wheat quality. *Bread making: improving quality*, 536-561.

Cobos-Quevedo J, Hernández-Hernández, G. A., & Remes-Troche, J. M. (2017). Trastornos relacionados con el gluten: panorama actual. *Medicina interna de México*, 33(4), 487-502.

Cofelice, M., Messia, M. C., Marconi, E., Cuomo, F., & Lopez, F. (2023). Effect of the xanthan gum on the rheological properties of alginate hydrogels. *Food Hydrocolloids*, 142, 108768.

Cohen, I. S., Day, A. S., & Shaoul, R. (2019). Gluten in celiac disease—more or less?. *Rambam Maimonides Medical Journal*, 10(1).

Colgrave, M. L., Scherf, K. A., Downs, M., & Caminero, A. (2021). Gluten, From Plant to Plate: Implications for People With Celiac Disease. *Frontiers in Nutrition*, 8, 680418.

Colpo, I., Rabenschlag, D. R., de Lima, M. S., Martins, M. E. S., & Sellitto, M. A. (2022). Economic and financial feasibility of a biorefinery for conversion of brewers' spent grain into a special flour. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 8(2), 79.

Czubaszek, A., Wojciechowicz-Budzisz, A., Szychaj, R., & Kawa-Rygielska, J. (2021). Baking properties of flour and nutritional value of rye bread with brewer's spent grain. *LWT*, 150, 111955.

De Albuquerque, J. G., de Souza Aquino, J., de Albuquerque, J. G., de Farias, T. G. S., Escalona-Buendía, H. B., Bosquez-Molina, E., & Azoubel, P. M. (2019). Consumer perception and use of nopal (*Opuntia ficus-indica*): A cross-cultural study between Mexico and Brazil. *Food Research International*, 124, 101-108.

De Schepper, C. F., Michiels, P., Langenaeken, N. A., & Courtin, C. M. (2020). Accurate quantification of small and large starch granules in barley and malt. *Carbohydrate polymers*, 227, 115329.

Devnani, B., Moran, G. C., & Grossmann, L. (2023). Extraction, Composition, Functionality, and Utilization of Brewer's Spent Grain Protein in Food Formulations. *Foods*, 12(7), 1543.

Duarte, C. A., & Niño, J. R. (2004). *Introducción a la mecánica de fluidos*. Univ. Nacional de Colombia.

Elgeti, D., Nordlohne, S. D., Föste, M., Besl, M., Linden, M. H., Heinz, V., ... & Becker, T. (2014). Volume and texture improvement of gluten-free bread using quinoa white flour. *Journal of Cereal Science*, 59(1), 41-47.

Encina-Zelada, C. R., Cadavez, V., Monteiro, F., Teixeira, J. A., & Gonzales-Barron, U. (2018). Combined effect of xanthan gum and water content on physicochemical and textural properties of gluten-free batter and bread. *Food Research International*, 111, 544-555.

Escorza, E. (2018). *Gluten Wars, en busca de la dieta perfecta*. Elsevier.

Espitia Rangel, E., Martínez Cruz, E., Peña Bautista, R. J., Villaseñor Mir, H. E., & Huerta Espino, J. (2008). Polimorphism of high molecular weight glutenins and its relationship with in rainfed bread wheat. *Agricultura técnica en México*, 34(1), 57-67.

Estévez, V., & Araya, M. (2016). La dieta sin gluten y los alimentos libres de gluten. *Revista chilena de nutrición*, 43(4), 428-433.

Farah, J. S., Silva, M. C., Cruz, A. G., & Calado, V. (2018). Differential calorimetry scanning: current background and application in authenticity of dairy products. *Current Opinion in Food Science*, 22, 88-94.

Ferreira, S., Monteiro, E., Brito, P., Castro, C., Calado, L., & Vilarinho, C. (2019). Experimental analysis of brewers' spent grains steam gasification in an allothermal batch reactor. *Energies*, 12(5), 912.

Flores E (2022). Obtención de gluten de trigo para cuantificar: gluten húmedo, gluten seco, contenido indirecto de proteína y porcentaje de almidón. *Food Research*. 20, 452

Fongaro, L., Lucisano, M., & Mariotti, M. (2012). Assessment of surface aspect of foods using ImageJ plugins. In *Proceedings of the ImageJ User and Developer Conference 2012* (pp. 245-248). Centre de Recherche Public Henri Tudor.

Food & Drug Administration (2023). 'Gluten-Free' Means What It Says. U.S. *Food And Drug Administration (FDA)*. <https://www.fda.gov/consumers/consumer-updates/gluten-free-means-what-it-says>

Gallagher, E. (Ed.). (2009). *Gluten-free food science and technology*. John Wiley & Sons.

García-García, J. A., Reding-Bernal, A., & López-Alvarenga, J. C. (2013). Cálculo del tamaño de la muestra en investigación en educación médica. *Investigación en educación médica*, 2(8), 217-224.

Garda, M. R. (2020). *Técnicas del manejo de los alimentos*. Eudeba.

Garrett, R., Bellmer, D., McGlynn, W., & Rayas-Duarte, P. (2021). Development of new chip products from brewer's spent grain. *Journal of Food Quality*, 2021, 1-6.

Gibert, A., Espadaler, M., Canela, M. A., Sanchez, A., Vaqué, C., & Rafecas, M. (2006). Consumption of gluten-free products: should the threshold value for trace amounts of gluten be at 20, 100 or 200 ppm?. *European journal of gastroenterology & hepatology*, 18(11), 1187-1195.

Ginindza, A., Solomon, W. K., Shelembe, J. S., & Nkambule, T. P. (2022). Valorisation of brewer's spent grain flour (BSGF) through wheat-maize-BSGF composite flour bread: optimization using D-optimal mixture design. *Heliyon*, 8(6).

Gmoser, R., Fristedt, R., Larsson, K., Undeland, I., Taherzadeh, M. J., & Lennartsson, P. R. (2020). From stale bread and brewers spent grain to a new food source using edible filamentous fungi. *Bioengineered*, 11(1), 582-598.

Gobierno de México, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2023). *México potencializa la producción de quinoa*. Gobierno de México. Recuperado 16 de febrero de 2023 de <https://www.gob.mx/siap/articulos/mexico-potencializa-la-produccion-de-quinoa>

González, J. M., García, E., Fernández, J. L., Gago, L., & Benito, J. (2007). Técnicas analíticas para la detección de gluten en alimentos.

Hallén, E., İbanoğlu, Ş., & Ainsworth, P. (2004). Effect of fermented/germinated cowpea flour addition on the rheological and baking properties of wheat flour. *Journal of food engineering*, 63(2), 177-184.

Harris, D. C. (2003). *Análisis químico cuantitativo*. Reverté.

Heberle, T., Ávila, B. P., do Nascimento, L. Á., & Gularte, M. A. (2022). Consumer perception of breads made with germinated rice flour and its nutritional and technological properties. *Applied Food Research*, 2(2), 100142.

Hejrani, T., Sheikholeslami, Z., Mortazavi, A., & Davoodi, M. G. (2017). The properties of part baked frozen bread with guar and xanthan gums. *Food Hydrocolloids*, 71, 252-257.

Henao Osorio, S., & Aristizábal Galvis, J. (2009). Influencia de la variedad de yuca y nivel de sustitución de harinas compuestas sobre el comportamiento reológico en panificación. *Ingeniería e investigación*, 29(1), 39-46.

Hera, E., Martinez, M., & Gómez, M. (2013). Influence of flour particle size on quality of gluten-free rice bread. *LWT-Food Science and Technology*, 54(1), 199-206.

Hernández-Becerra, E., de los Angeles Aguilera-Barreiro, M., Contreras-Padilla, M., Pérez-Torrero, E., & Rodriguez-Garcia, M. E. (2022). Nopal cladodes (*Opuntia Ficus Indica*): Nutritional properties and functional potential. *Journal of Functional Foods*, 95, 105183.

Hleap, J. I., & Velasco, V. A. (2010). Análisis de las propiedades de textura durante el almacenamiento de salchichas elaboradas a partir de tilapia roja (*Oreochromis sp.*). *Biotecnología en el Sector agropecuario y agroindustrial*, 8(2), 46-56.

Inglese, P. (2018). Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal. *Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*.

Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST). (2020). Elaboración de productos alimenticios en panaderías y pastelerías artesanales: exposición a harina. Recuperado 1 de marzo de 2023 de <https://www.insst.es/stp/basequim/030-elaboracion-de-productos-alimenticios-en-panaderias-y-pastelerias-artesanales-exposicion-a-harina-2020>

Jafari, M., Koocheki, A., & Milani, E. (2018). Functional effects of xanthan gum on quality attributes and microstructure of extruded sorghum-wheat composite dough and bread. *Lwt*, *89*, 551-558.

Jimenez, L. (2008). Incremento del valor nutritivo de la pasta base para la elaboración de pizza, mediante la incorporación de chocho. Universidad Tecnológica Equinoccial. Recuperado 1 de marzo de 2023 de <https://repositorio.ute.edu.ec/handle/123456789/5163?mode=full>.

Jødal, A. S. S., & Larsen, K. L. (2021). Investigation of the relationships between the alveograph parameters. *Scientific Reports*, *11*(1), 5349.

Johnson, C. M. (2013). Differential scanning calorimetry as a tool for protein folding and stability. *Archives of biochemistry and biophysics*, *531*(1-2), 100-109.

Julianti, E., Rusmarilin, H., & Yusraini, E. (2017). Functional and rheological properties of composite flour from sweet potato, maize, soybean and xanthan gum. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, *16*(2), 171-177.

Kassem, I. A., Ashaolu, T. J., Kamel, R., Elkasabgy, N. A., Afifi, S. M., & Farag, M. A. (2021). Mucilage as a functional food hydrocolloid: Ongoing and potential applications in prebiotics and nutraceuticals. *Food & function*, 12(11), 4738-4748.

Kim, Y., & Yokoyama, W. H. (2011). Physical and sensory properties of all-barley and all-oat breads with additional hydroxypropyl methylcellulose (HPMC) β -glucan. *Journal of agricultural and food chemistry*, 59(2), 741-746.

Kimbell, V (2020). *Pan ecológico con masa madre*. Blume.

Korus, J., Witczak, M., Korus, A., & Juszcak, L. (2022). Mesquite (*Prosopis L.*) as a functional ingredient in gluten-free dough and bread. *LWT*, 168, 113957.

Ktenioudaki, A., O'Shea, N., & Gallagher, E. (2013). Rheological properties of wheat dough supplemented with functional by-products of food processing: Brewer's spent grain and apple pomace. *Journal of Food engineering*, 116(2), 362-368.

Laise, CD (2018). *Desarrollo de snack salado con harina de quínoa*. Universidad de Argentina.

Lamas, D. L., & Gende, L. B. (2023). Valorisation of brewers' spent grain for the development of novel beverage and food products. *Applied Food Research*, 100314.

Lappé, F. M. (2022). *La dieta ecológica*. RBA Libros y Publicaciones.

Li, G., & Zhu, F. (2018). Quinoa starch: Structure, properties, and applications. *Carbohydrate polymers*, 181, 851-861.

Liu, Q., Gu, Z., Donner, E., Tetlow, I., & Emes, M. (2007). Investigation of digestibility in vitro and physicochemical properties of A-and B-type starch from soft and hard wheat flour. *Cereal Chemistry*, 84(1), 15-21.

Liu, X., Lu, K., Yu, J., Copeland, L., Wang, S., & Wang, S. (2019). Effect of purple yam flour substitution for wheat flour on in vitro starch digestibility of wheat bread. *Food Chemistry*, 284, 118-124.

Lugo-Arias, J., Lugo-Arias, E., Ovallos-Gazabon, D., Arango, J., de la Puente, M., & Silva, J. (2020). Effectiveness of the mixture of nopal and cassava starch as clarifying substances in water purification: A case study in Colombia. *Heliyon*, 6(6).

Lukinac, J., & Jukić, M. (2022). Barley in the production of cereal-based products. *Plants*, 11(24), 3519.

Lynch, K. M., Steffen, E. J., & Arendt, E. K. (2016). Brewers' spent grain: a review with an emphasis on food and health. *Journal of the Institute of Brewing*, 122(4), 553-568.

Maga, J. A., & Ponte, J. G. (1975). Bread staling. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 5(4), 443-486.

Malhotra, N. K. (2004). *Investigación de mercados: un enfoque aplicado*. Pearson educación.

Manrique, E. M., & Vera, V. J. (2023). *Cereales (Técnicas de análisis)*. UNAM, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán.

Mansoor, R., Ali, T. M., Arif, S., Saeed, M., & Hasnain, A. (2022). Impact of barley flour addition on dough rheology, glycemic index, textural and sensory characteristics of taftaan flat bread. *Food Chemistry Advances*, 1, 100148.

Maroufi, L. Y., Norouzi, R., Ramezani, S., & Ghorbani, M. (2023). Novel electrospun nanofibers based on gelatin/oxidized xanthan gum containing propolis reinforced by Schiff base cross-linking for food packaging. *Food Chemistry*, 416, 135806.

Marquina, J. (2021). *La pizza es alta cocina*. Oberon.

Matuda, T. G., Chevallier, S., de Alcântara Pessôa Filho, P., LeBail, A., & Tadini, C. C. (2008). Impact of guar and xanthan gums on proofing and calorimetric parameters of frozen bread dough. *Journal of cereal science*, 48(3), 741-746.

Melini, V., & Melini, F. (2021). Functional components and anti-nutritional factors in gluten-free grains: A focus on quinoa seeds. *Foods*, 10(2), 351.

Mesas, J. M., & Alegre, M. T. (2002). El pan y su proceso de elaboración the bread and its processing o pan eo seu proceso de elaboración. *CYTA-Journal of Food*, 3(5), 307-313.

Mir, B. M. (2017). *Materias primas y procesos en panadería, pastelería y repostería*. Síntesis.

Mir, S. A., Shah, M. A., & Hamdani, A. M. (Eds.). (2021). *Gluten-free Bread Technology*. Springer International Publishing.

Miranda Villa, P. P., Mufari, J. R., Bergesse, A. E., Planchuelo, A. M. R., & Calandri, E. L. (2018). Calidad nutricional y propiedades físicas de panes libres de gluten.

Miś, A., Grundas, S., Dziki, D., & Laskowski, J. (2012). Use of farinograph measurements for predicting extensograph traits of bread dough enriched with carob fibre and oat wholemeal. *Journal of Food Engineering*, 108(1), 1-12.

Molina, M., Ortega NB. (2016). *Panadería y pastelería comercial*. Editorial Macro.

Monferrer, A., Cortés, C., Cubero, N., & Gómez, L. (2023). *Modificando la textura de los alimentos. 2ª Edición: manual de uso de los hidrocoloides*. Ediciones Díaz de Santos.

Morán-Bravo, KM, Soledispa, KL. (2013). Efecto de la goma xantana y la hidroxipropilmetilcelulosa en las características físicas y reológicas del pan de arroz libre de gluten tipo molde. Escuela Superior Politécnica Del Litoral. Recuperado 1 de marzo de 2023 de <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/30926/D-79754.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Mu, H., Xue, S., Sun, Q., Shi, J., Zhang, D., Wang, D., & Wei, J. (2023). Research Progress of Quinoa Seeds (*Chenopodium quinoa* Wild.): Nutritional Components, Technological Treatment, and Application. *Foods*, 12(10), 2087.

Mussatto, S. I. (2014). Brewer's spent grain: a valuable feedstock for industrial applications. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94(7), 1264-1275.

Narvaez, L (2020). Producción de harina de jícama (*Smallanthus sonchifolius*) para la formulación de galletas enriquecida con harina de quínoa (*Chenopodium quinoa Willd*) Recuperado 22 de febrero de 2023 de <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/NARVAEZ%20GONZALEZ%20VALERIA%20LEONELA.pdf>

Neylon, E., Arendt, E. K., Zannini, E., & Sahin, A. W. (2021). Fermentation as a tool to revitalise brewers' spent grain and elevate techno-functional properties and nutritional value in high fibre bread. *Foods*, 10(7), 1639.

NIH. Image J. Disponible en <https://imagej.nih.gov/ij/docs/menus/analyze.html> NIH, SF

Ordoñez, M. H., & Osorio, D. D. (2012). Características reológicas del pan de agua producto autóctono de Pamplona (Norte de Santander). *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 10(2), 61-74.

Osborne, E. (2009). Proteínas de la harina de trigo: clasificación y propiedades funcionales. *Temas de Ciencia y Tecnología*, 13(38), 27-32.

Padilla, B. J. (2012). *Seguridad e higiene en un obrador de panadería y bollería. INAF0108: Panadería y bollería*. IC Editorial.

Pando, L., & Aguilar, E. (2016). Guía de cultivo de la quinua. *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Universidad Nacional Agraria La Molina*, 2, 17-18.

Parchami, M., Ferreira, J. A., & Taherzadeh, M. J. (2021). Starch and protein recovery from brewer's spent grain using hydrothermal pretreatment and their conversion to edible filamentous fungi—A brewery biorefinery concept. *Bioresource Technology*, 337, 125409.

Parker, R., & Pace, M. (2016). *Introduction to Food Science and Food Systems*. Cengage Learning.

Peña Bautista, R. J., Perez Herrera, P., Villaseñor Mir, E., Gomez Valdez, M. M., & Lozano, M. (2008). *Calidad de la cosecha de trigo en México: ciclo primavera-verano 2006*. CIMMYT.

Peña, W., & Quintero, N. (2019). Modelamiento de respuestas farinográficas de masas de harinas compuestas yuca-trigo adicionadas del hidrocoloide xantan. *Revista Agrollania de Ciencia y Tecnología*, 18.

Pérez J.A. (2017). *Aislamiento, identificación y caracterización de microorganismos involucrados en el metabolismo del gluten: implicaciones para la enfermedad celiaca y la salud humana* (Doctoral dissertation, Universidad de León).

Pertusa, J. F. (2003). Técnicas de análisis de imagen: Aplicaciones en biología. *Universidad de Valencia*.

Ponce, J., Málaga, J., Huamani, A., & Chuqui, S. (2016). Optimización de la concentración de la α -amilasa y lactosuero en el mejoramiento de las características

tecnológicas, nutricionales y sensoriales del pan francés. *Agroindustrial Science*, 6(2), 185-194.

Qazanfarzadeh, Z., Ganesan, A. R., Mariniello, L., Conterno, L., & Kumaravel, V. (2022). Valorization of brewer's spent grain for sustainable food packaging. *Journal of Cleaner Production*, 135726.

Qi, K., Yi, X., & Li, C. (2022). Effects of endogenous macronutrients and processing conditions on starch digestibility in wheat bread. *Carbohydrate Polymers*, 119874.

Qin, W., Lin, Z., Wang, A., Chen, Z., He, Y., Wang, L., ... & Tong, L. T. (2021). Influence of particle size on the properties of rice flour and quality of gluten-free rice bread. *Lwt*, 151, 112236.

Quintana de Viedma, L., Kohli, M. M., Pedretti, R., & Gómez, G. (2004). Avances y resultados de la investigación del trigo en el Paraguay.

Quintanar E (2023). *Pan, historia, ciencia y arte: una deliciosa aventura*. Editorial Quintanar.

Reynhart, P. (2017). *El aprendizaje de panadero*. RBA libros.

Riera, J. B. (2004). *Química y bioquímica de los alimentos II*. Edicions Universitat Barcelona.

Roa, J, Joya, F, Rozo, M.(2021). Actualización tecnológica de farinógrafo del laboratorio de calidad en la planta Bimbo Tenjo-Cundinamarca. Universidad Antonio Nariño. Recuperado 24 de febrero de 2023 de

<http://repositorio.uan.edu.co/bitstream/123456789/2219/2/2020JulioEdienRoaPinzon.pdf>

Rodríguez, M. H., & Gallego, A. S. (1999). *Tratado de nutrición*. Ediciones Díaz de Santos.

Romero-Rodríguez, R., Durán-Guerrero, E., Castro, R., Díaz, A. B., & Lasanta, C. (2022). Evaluation of the influence of the microorganisms involved in the production of beers on their sensory characteristics. *Food and Bioproducts Processing*.

Rosell, C. M., Bajerska, J., & El Sheikha, A. F. (Eds.). (2015). *Bread and its fortification: Nutrition and health benefits*. CRC Press.

Rosell, C. M., Bajerska, J., & El Sheikha, A. F. (Eds.). (2016). *Bread and its fortification: Nutrition and health benefits*. CRC Press.

Ruiz-Calero, G. (2020). Estudio de la influencia de las harinas de pan duro y su granulometría en la elaboración de galletas. Universidad de Valladolid

Sader de Melo, T. (2018). Enriquecimiento de panes sin gluten con mezclas proteicas.

Sáenz, C. (2006). Utilización agroindustrial del nopal, Carmen Sáenz. *Boletín de servicios agrícolas de la FAO*. 162.

Sakhare, S. D., Inamdar, A. A., Soumya, C., Indrani, D., & Rao, G. V. (2014). Effect of flour particle size on microstructural, rheological and physico-sensory characteristics of bread and south Indian parotta. *Journal of Food Science and Technology*, 51, 4108-4113.

Sánchez Aceves, L. M. (2014). Inclusión de proteína de chícharo en el desarrollo de alimentos funcionales de panificación (pan de caja).

Sciarini, L. S., Steffolani, M. E., & Leon, A. E. (2016). El rol del gluten en la panificación y el desafío de prescindir de su aporte en la elaboración de pan. *Agriscientia*, 33(2), 61-74.

Secretaría de Agricultura Y Desarrollo Rural. (2017). *La cebada: más allá de la cerveza*. Secretaría de Agricultura Y Desarrollo Rural. Recuperado 27 de febrero de 2023, de <https://www.gob.mx/se/articulos/industria-de-la-cerveza-en-mexico>

Secretaría de Economía & CANAINPA. (2017). *Conoce más sobre la industria panificadora en México*. Secretaría de Economía. Recuperado 27 de febrero de 2023, de <https://www.gob.mx/se/articulos/conoce-mas-sobre-la-industria-panificadora-en-mexico?idiom=es>

Secretaría de Economía. (2017). *Industria de la Cerveza en México*. Secretaría de Economía. Recuperado 27 de febrero de 2023, de <https://www.gob.mx/se/articulos/industria-de-la-cerveza-en-mexico>

Secretaría de Salud. (2009). NMX-F-007-1982. Harina de Trigo. Gobierno de México. *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado 29 de diciembre de 2022, de https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5100356&fecha=27/07/2009#gsc.tab=0

Secretaría de Salud. (2009). Norma Oficial Mexicana NOM-247-SSA1-2008, Productos y servicios. Cereales y sus productos. Cereales, harinas de cereales,

sémolas o semolinas. Alimentos a base de: cereales, semillas comestibles, de harinas, sémolas o semolinas o sus mezclas. Productos de panificación. Disposiciones y especificaciones sanitarias y nutrimentales. Métodos de prueba. *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado 29 de diciembre de 2022, de https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5100356&fecha=27/07/2009#gsc.tab=0

Shewry, P. (2019). What is gluten—why is it special?. *Frontiers in nutrition*, 101.

Shin, D. J., Kim, W., & Kim, Y. (2013). Physicochemical and sensory properties of soy bread made with germinated, steamed, and roasted soy flour. *Food Chemistry*, 141(1), 517-523.

Shroti, G. K., & Saini, C. S. (2022). Development of edible films from protein of brewer's spent grain: Effect of pH and protein concentration on physical, mechanical and barrier properties of films. *Applied Food Research*, 2(1), 100043.

Song, J., Jiang, L., Qi, M., Li, L., Xu, M., Li, Y., ... & Li, H. (2023). Study of ultrasonic treatment on the structural characteristics of gluten protein and the quality of steamed bread with potato pulp. *Ultrasonics Sonochemistry*, 92, 106281.

Spink, C. H. (2008). Differential scanning calorimetry. *Methods in cell biology*, 84, 115-141.

Su, T., Zhang, E., Yang, Y., Zheng, T., Xin, T., Dong, L., ... & Su, D. (2023). Utilization of ovalbumin-ferulic acid-carrageenan Pickering emulsion in baked bread for butter reduction: Bread microstructural properties and quality. *LWT*, 185, 115124.

Suárez-Estrella, D., Cardone, G., Buratti, S., Pagani, M. A., & Marti, A. (2020). Sprouting as a pre-processing for producing quinoa-enriched bread. *Journal of Cereal Science*, *96*, 103111.

Torres-Acosta, A. A., & Díaz-Cruz, L. A. (2020). Concrete durability enhancement from nopal (*Opuntia ficus-indica*) additions. *Construction and Building Materials*, *243*, 118170.

Tuna, A., Cappa, C., Tokatli, F., & Alamprese, C. (2023). White bean and hazelnuts flours: Application in gluten-free bread. *LWT*, 114995.

Verdú, J. M. (2013). *Nutrición para educadores*. Ediciones Díaz de Santos.

Vieira, E. F., da Silva, D. D., Carmo, H., & Ferreira, I. M. (2017). Protective ability against oxidative stress of brewers' spent grain protein hydrolysates. *Food chemistry*, *228*, 602-609.

Vuarant, C. O. (2010). *Arándanos: Avances Científicos-Tecnológicos*. (1ª edición) Argentina: Editorial Universidad Nacional de Entre Ríos.

Waksmundzka-Hajnos, M., & Sherma, J. (Eds.). (2010). *High performance liquid chromatography in phytochemical analysis*. CRC press.

Wang, J., Friedman, R., & Baba, M. (2021). Predynastic beer production, distribution, and consumption at Hierakonpolis, Egypt. *Journal of Anthropological Archaeology*, *64*, 101347.

Wang, X., Lao, X., Bao, Y., Guan, X., & Li, C. (2021). Effect of whole quinoa flour substitution on the texture and in vitro starch digestibility of wheat bread. *Food Hydrocolloids*, *119*, 106840.

Webb, T., & Beaumont, S. (2013). *Atlas mundial de la cerveza*. Blume.

Wei, G., Helmerhorst, E. J., Darwish, G., Blumenkranz, G., & Schuppan, D. (2020). Gluten degrading enzymes for treatment of celiac disease. *Nutrients*, *12*(7), 2095.

Wieser, H., Segura, V., Ruiz-Carnicer, Á., Sousa, C., & Comino, I. (2021). Food safety and cross-contamination of gluten-free products: A narrative review. *Nutrients*, *13*(7), 2244.

Wong, X. (2012). *Utilización de goma xanthan y monoglicérido destilado para el mejoramiento de la textura del pan elaborado a partir de almidón de yuca (Manihot esculenta)* (Bachelor's thesis). Universidad de Ambato

Wu, G., Liu, X., Hu, Z., Wang, K., & Zhao, L. (2022). Impact of xanthan gum on gluten microstructure and bread quality during the freeze-thaw storage. *Lwt*, *162*, 113450.

Wu, D., Yu, L., Guo, L., Li, S., Yao, X., Yao, Y., ... & Gao, X. (2022). Effect of highland barley on rheological properties, textural properties and starch digestibility of chinese steamed bread. *Foods*, *11*(8), 1091.

Xu, J., Zhang, Y., Wang, W., & Li, Y. (2020). Advanced properties of gluten-free cookies, cakes, and crackers: A review. *Trends in food science & technology*, *103*, 200-213.

Yambay, J, Arcos-Ponce, G. (2018). IV congreso internacional de ingenierías: La ingeniería como base del desarrollo. Universidad Politécnica Estatal de Carchi. Recuperado 27 de febrero de 2023 de <https://www.publicacionesupec.org/index.php/carchi/catalog/book/15>

Zambrano-Zaragoza, M. L., Gutiérrez-Cortez, E., Del Real, A., González-Reza, R. M., Galindo-Pérez, M. J., & Quintanar-Guerrero, D. (2014). Fresh-cut Red Delicious apples coating using tocopherol/mucilage nanoemulsion: Effect of coating on polyphenol oxidase and pectin methylesterase activities. *Food Research International*, 62, 974-983.

Zhao, F., Li, Y., Li, C., Ban, X., Cheng, L., Hong, Y., ... Li, Z. (2021). *Co-supported hydrocolloids improve the structure and texture quality of gluten-free bread. LWT*, 152, 112248.

Zhu, F., & Sun, J. (2019). Physicochemical and sensory properties of steamed bread fortified with purple sweet potato flour. *Food Bioscience*, 30, 100411.

Zuloaga, L. R. (2020). *Eso no estaba en mi libro de Historia de la Empresa*. Editorial Almuzara.