



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS ECONÓMICO ADMINISTRATIVAS

LICENCIATURA EN GASTRONOMÍA

**CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA Y ACEPTACIÓN SENSORIAL
DE UN PRODUCTO DE PANIFICACIÓN ELABORADO
MEDIANTE FERMENTACIÓN MIXTA**

Para obtener el título de
Licenciado en Gastronomía

PRESENTA

Carlos Chávez Morales

Directores

Dr. Juan Ramírez Godínez

L.G. Tania Irais González Quintanar

Comité tutorial

Dra. Elizabeth Contreras López

E. en B. Juan Francisco Gutiérrez Rodríguez

San Agustín Tlaxiaca, Hgo., México., abril 2026



OFICIO DE INCORPORACIÓN AL REPOSITORIO DE TESIS

OF.ICEA/AAT/LG/198/2026

Mtro. Jorge E. Peña Zepeda
Director de Bibliotecas y Centro de Información
PRESENTE

Por medio de la presente hago constar que la tesis en formato digital titulada "Caracterización fisicoquímica y aceptación sensorial de un producto de panificación elaborado mediante fermentación mixta", que presenta el pasante de la Licenciatura en Gastronomía, C. Carlos Chávez Morales, con número de cuenta 434333, es la versión final validada por el Comité Tutorial y cumple con el oficio de autorización de impresión, por lo que solicito su integración al repositorio institucional de tesis.

ATENTAMENTE

"AMOR, ORDEN Y PROGRESO"

San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, 23 de abril de 2026



DRA. ARLIN CERÓN ISLAS
DIRECTORA

Juan Ramírez Godínez
DR. JUAN RAMÍREZ GODÍNEZ
COORDINADOR DE LA LICENCIATURA EN GASTRONOMÍA

C. Carlos Chávez Morales
C. CARLOS CHÁVEZ MORALES
AUTOR

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR,
PRESENTE.

Con fundamento en los Artículos 1° y 3° de la Ley Orgánica y el Título Quinto, Capítulo II, Artículo 114, Fracción X y XI del Estatuto General, así como en el Título Cuarto, Capítulo I, Artículos 40 y 41 del Reglamento de Titulación, ordenamientos de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, el jurado del examen recepcional ha revisado, analizado y evaluado el trabajo titulado **"Caracterización fisicoquímica y aceptación sensorial de un producto de panificación elaborado mediante fermentación mixta"**, presentado por el C. CARLOS CHÁVEZ MORALES, con número de cuenta 434333, de la LICENCIATURA EN GASTRONOMÍA, otorgando el voto aprobatorio para extender la presente:

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Por lo que el sustentante deberá cubrir los requisitos de acuerdo al Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, en el que sustentará y defenderá el documento de referencia.

ATENTAMENTE
"AMOR, ORDEN Y PROGRESO"
San Agustín Tlaxiaca, Hgo., a 22 de abril de 2026

EL JURADO

DRA. ELIZABETH CONTRERAS LÓPEZ
PRESIDENTA

L.G. TANIA TRAIS GONZÁLEZ QUINTANAR
SECRETARIA

Juan Ramirez Godínez
DR. JUAN RAMÍREZ GODÍNEZ
PRIMER VOCAL

E. EN B. JUAN FRANCISCO GUTIÉRREZ RODRÍGUEZ
SUPLENTE



DR. ARLEN CERÓN ISLAS
DIRECTORA

c.c.p. Coordinador de Titulación del ICEA.
Lider del Cuerpo Académico
Coordinación del programa educativo
Alumno/Egresado

Circuito la Concepción Km 2.5, Col. San Juan
Tilcuautla, San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo,
México; C.P. 42160
Teléfono: 771 71 72000 Ext. 4101
icea@uaeh.edu.mx

Dedicatoria

La presente tesis es el resultado de un proceso construido con paciencia, constancia, esfuerzo y dedicación en cada una de sus etapas. Cada página refleja no solo el trabajo académico realizado, sino también el compromiso, la disciplina, la paciencia y la atención que fueron necesarias para su culminación, incluso en aquellos momentos en los que la incertidumbre y el cansancio se hacían presentes. Está dedicada, en primer lugar, a mi familia: a mi madre, a mi padre y a mi hermana, quienes han sido el sostén fundamental de mi vida. A mi tía materna Carolina, quien, a pesar de la distancia física que nos separa, ha mantenido una presencia constante a través de su apoyo, su cercanía y su cariño incondicional. Asimismo, a mis abuelos maternos, quienes, aunque ya no se encuentran físicamente conmigo, permanecen como pilares esenciales en mi formación, no solo en el ámbito académico, sino también en mi vida personal, a través de los valores, principios y enseñanzas que dejaron profundamente arraigados en mí. Su legado ha sido una guía silenciosa pero firme a lo largo de este camino.

Este logro no es únicamente individual; es el resultado del amor, la paciencia, la disciplina y el esfuerzo que me han brindado e inculcado desde mis primeras etapas de formación. En cada paso de este proceso ha estado presente su apoyo, su preocupación y su confianza, incluso en los momentos de mayor dificultad, cuando las dudas parecían superar las certezas. Por ello, esta meta alcanzada representa también un reflejo de todo lo que ustedes han sembrado en mí. Este trabajo no solo simboliza la culminación de una etapa académica, sino también la consolidación de una historia compartida de esfuerzo, amor y perseverancia, constituyendo, sin duda, un logro que también les pertenece y Asimismo, representa el inicio de una nueva etapa, abierta a las oportunidades que Dios ha dispuesto para mi camino, las cuales, con fe, compromiso y determinación, estoy dispuesto a alcanzar, y con mayor seguridad, sé que así serán bajo su cuidado y amor.

Agradecimientos

A Dios, por darme la fortaleza en los momentos de debilidad, por sostener a mi familia y a mí, bajo su amor y cuidado. Por guiarme a lo largo de este camino, incluso cuando no entendía los planes que él ya tenía para mí. A mi familia por ser ese hogar al que siempre puedo volver, por su paciencia, por su apoyo incondicional, por su amor real y por enseñarme que la constancia, la disciplina y el esfuerzo son las principales llaves para obtener nuevos logros y recompensas.

Dentro de mi núcleo familiar directo, reconozco de manera especial a mi madre Martha Patricia Morales, quien cada mañana se ha levantado para brindarme un amor incondicional. A través de gestos cotidianos, como alimentarme —no solo a mi estómago, sino también a mi alma—, procuró mi bienestar integral, emocional y mental, mediante palabras motivadoras y alentadoras, compartido desde su experiencia y aprendizajes para ayudarme a sobrellevar este proceso. Gracias por tu entrega constante, por tu guía y, sobre todo, por el privilegio de ser tu hijo.

Menciono a mi padre, Gabriel Chávez, quien, aunque nuestros caminos hoy transiten de manera distinta y su presencia ya no se encuentre cercana, sigue siendo una figura fundamental, que quedó marcada en mi vida. Le agradezco profundamente por su amor paternal, por el esfuerzo y la fortaleza que implica ser padre de familia, y por haber procurado siempre cubrir mis necesidades materiales para el cumplimiento de mis objetivos, metas y sueños. Reconozco en él no solo a un proveedor, sino a un formador: alguien que, junto a mi madre, contribuyó a mi educación, a mis valores y a la construcción de mi carácter. Gracias por haber sido parte esencial en mi formación, por ayudarme a convertirme en un mejor hijo, un mejor hermano, en un mejor hombre, una mejor persona y, hoy, un mejor profesionalista.

Asimismo, a mi hermana Betty, por su compañía constante a lo largo de mi vida; por ser mi confidente, mi mejor amiga y mi compañera desde la niñez hasta este momento. Gracias por los momentos compartidos y por formar parte esencial de este camino que me ha traído hasta aquí. Su presencia ha sido fundamental en mi desarrollo personal, recordándome siempre el valor de la familia y el significado de

crecer juntos. A pesar de las adversidades, diferencias o desacuerdos, he aprendido contigo que el vínculo familiar permanece por encima de todo, fortaleciéndose incluso en los momentos más complejos.

A mi novia Sofí, quien desde el momento en que nuestros caminos se unieron me ha demostrado, con amor y constancia, lo valioso que es caminar a mi lado durante este proceso. Gracias por estar presente de todas las formas posibles, especialmente en aquellos momentos de cansancio, incertidumbre y desvelo, brindándome siempre tu apoyo, tu compañía y la calma necesaria para seguir adelante. Por escuchar incluso cuando no sabía cómo explicar lo que sentía; por ayudarme a cargar, en parte, con la carga pesada de todo este proceso. Gracias por su tranquilidad, comprensión, carácter y amor, por su impulso y por creer en mí, incluso en mis días frágiles e inseguros.

A todas aquellas personas que en algún momento formaron parte significativa de mi vida y con quienes hoy sigo caminos distintos, les agradezco por cada palabra, cada gesto de apoyo, cada consejo y cada momento compartido. Todo ello permanece en mí como aprendizaje y memoria, dejando una huella que ha contribuido a forjar mi esencia.

A mis asesores de tesis, quienes fueron el Dr. Juan Ramírez Godínez y la L.G. Tania Irais González Quintanar, por su guía, por su tiempo, por cada observación y corrección que ayudó a construir este preciado trabajo. Más allá de lo académico, por su paciencia y por exigir lo mejor de mí en cada etapa del proceso. A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, por brindarme el espacio para formarme, equivocarme, aprender y crecer, no solo como profesionista, si no como persona.

Y a mí, por haber sostenido este proceso con disciplina, constancia y responsabilidad. Por continuar incluso en los momentos de mayor incertidumbre, cuando el cansancio y las dudas parecían imponerse. Por aprender del error, por tener la paciencia de reconstruirme en cada tropiezo y por no perder de vista el objetivo, aun cuando el camino se tornaba complejo y largo. Reconozco el esfuerzo invertido, las horas dedicadas y la capacidad de mantenerme firme ante

las exigencias de este proceso. Este logro representa también un acto de compromiso personal, de crecimiento y de confianza en mis propias capacidades. Hoy valoro no solo el resultado alcanzado, sino la persona en la que me he convertido a lo largo de este camino.

INDICE

1. Introducción	11
2. Marco teórico	12
2.1 Producto de panificación	12
2.2 Clasificación del pan.....	12
2.3 Proceso de elaboración de productos de panificación.....	14
2.4 Ingredientes en la panificación y su función tecnológica	16
2.4.1 Harina de trigo	16
2.4.2 Masa madre.....	18
2.4.3 Agua.....	19
2.4.4 Sal.....	20
2.4.5 Grasas	20
2.5 Factores que afectan la calidad del pan.....	21
2.6 Materias primas y composición de harinas	22
2.6.1 Harina de trigo	22
2.6.2 Harina de centeno	22
2.6.3 Mezclas de harinas y compatibilidad tecnológica	23
2.7 Efecto de la fermentación mixta (levadura + masa madre).....	24
3. Justificación	25
4. Objetivos.....	26
4.1 General	26
4.2 Específicos.....	26
5. Metodología.....	27
5.1 Obtención de masa madre	27
5.2 Elaboración de pan de caja a base de harina de trigo y centeno	28
5.3 Diseño experimental de elaboración de producto de panificación	29
5.4 Evaluación sensorial.....	30
5.5. Caracterización fisicoquímica	32

5.5.1 Humedad	32
5.5.2 Cenizas.....	32
5.5.3 Grasa total	33
5.5.4 Proteína por Método Kjeldahl	34
5.5.5 Fibra cruda.....	36
5.5.6 Carbohidratos	37
5.5.7 Determinación de pH y actividad de agua (aw)	37
5.6.8 Determinación de color	38
6. Resultados y discusión	39
6.1 Evaluación sensorial.....	39
6.1.1 Apariencia	39
6.1.2. Aroma	40
6.1.3 Textura	41
6.1.4. Sabor	42
6.1.5. Calidad global	43
6.1.6 Preferencia del consumidor	43
6.2 Caracterización fisicoquímica	44
6.2.1 Humedad	44
6.2.2. Cenizas.....	46
6.2.3. Grasa total	47
6.2.4. Proteína	48
6.2.5 Fibra soluble	49
6.2.6. Carbohidratos	50
6.2.7. Actividad de agua y pH	52
6.3 Determinación de color en pan	53
7. Conclusiones	56
8. Referencias.....	57

INDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1: Proceso de elaboración de pan.....	14
Figura 2: Ficha de cata utilizada en la prueba sensorial.....	31
Figura 3: Evaluación sensorial de la apariencia en las formulaciones elaboradas	39
Figura 4: Evaluación sensorial del aroma en las formulaciones elaboradas.....	40
Figura 5: Evaluación sensorial de la textura en las formulaciones elaboradas	41
Figura 6: Evaluación del sabor en las formulaciones elaboradas	42
Figura 7: Evaluación de la calidad global en las formulaciones elaboradas	43
Figura 8. Preferencia del consumidor en las formulaciones elaboradas	44
Figura 9. Determinación de color en pan de caja (80% harina de trigo y 20 % harina de centeno)	55

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Porcentaje de humedad del pan de caja elaborado	45
Tabla 2. Porcentaje de cenizas del pan de caja elaborado	46
Tabla 3. Porcentaje de grasa del pan de caja elaborado	47

1. Introducción

En los últimos años, el desarrollo de productos de panificación ha evolucionado hacia la incorporación de materias primas con mayor valor nutricional, así como hacia la implementación de procesos tecnológicos que mejoren tanto la calidad sensorial como las propiedades funcionales de los alimentos.

En este sentido, el uso de harinas como el centeno ha cobrado interés debido a su alto contenido de fibra dietética, compuestos bioactivos y potenciales beneficios para la salud. No obstante, su aplicación en panificación presenta limitaciones tecnológicas, principalmente relacionadas con su baja capacidad para formar gluten, lo que puede afectar la estructura, el volumen y la textura del producto final. Ante ello, la fermentación mixta, que combina levadura comercial (*Saccharomyces cerevisiae*) y masa madre, surge como una estrategia viable para mejorar las propiedades tecnológicas y sensoriales del pan, al integrar la producción eficiente de dióxido de carbono con la generación de ácidos orgánicos y compuestos aromáticos.

Por lo tanto, el presente estudio tuvo como objetivo determinar la composición fisicoquímica y la aceptación sensorial de un producto de panificación elaborado con una mezcla de harina de trigo y centeno, mediante un sistema de fermentación mixta.

2.1 Producto de panificación

Los productos de panificación se definen como alimentos obtenidos a partir del horneado de una masa elaborada con harina de cereales (principalmente trigo), agua y sal. Durante su preparación, la masa experimenta un proceso de fermentación en el que intervienen levaduras, cuya actividad metabólica permite la producción de dióxido de carbono, favoreciendo el incremento de volumen y el desarrollo de una estructura esponjosa (Mesa & Alegre, 2002; Coronel & Valdéz, 2018).

Entre las especies más utilizadas destaca *Saccharomyces cerevisiae*, microorganismo con alta capacidad para metabolizar azúcares fermentables y generar compuestos que influyen tanto en la textura como en las características sensoriales del producto final. Este proceso biotecnológico constituye un elemento clave en la obtención de panes con adecuada calidad tecnológica y aceptabilidad sensorial (Maicas, 2020)

2.2 Clasificación del pan

La clasificación de los productos de panificación puede abordarse desde distintos criterios tecnológicos, entre los que destacan el tipo de harina, el método de fermentación y las características físicas del producto final.

En función del tipo de harina, se distinguen el pan de trigo, elaborado a partir de *Triticum aestivum* y ampliamente utilizado en panificación debido a su contenido de gluten (Gisslen, 2016); el pan de centeno (*Secale cereale*), caracterizado por una miga más densa y un perfil sensorial más intenso (Calvel, 2001); el pan multicereal, que integra diversas harinas como avena, cebada o maíz, incrementando su valor nutricional (Cauvain, 2021); y el pan sin gluten, formulado con harinas alternativas para poblaciones con enfermedad celíaca (Gallagher, 2009).

Por otro lado, de acuerdo con el tipo de fermentación, el pan puede clasificarse en pan con levadura comercial, el cual presenta fermentaciones rápidas y estructuras ligeras; pan de masa madre, basado en fermentaciones mixtas con bacterias ácido-lácticas y levaduras silvestres que aportan mayor complejidad sensorial y vida útil; y pan ácimo, que carece de proceso fermentativo (Gobbetti & Gänzle, 2013; De Vuyst, 2017).

Finalmente, el pan también puede clasificarse en función de su forma, tamaño y formulación, criterios que responden tanto a aspectos tecnológicos como culturales dentro de la panificación. Desde el punto de vista morfológico, se distinguen productos como baguettes, panes de molde, panecillos y panes planos, cuyas diferencias estructurales están asociadas al proceso de formado, la hidratación de la masa y las condiciones de fermentación y horneado (Cauvain, 2015)

Asimismo, el tamaño y la geometría del pan influyen en la transferencia de calor durante el horneado, lo que repercute directamente en la formación de la corteza, la distribución de la humedad y la textura de la miga, aspectos fundamentales para la calidad final del producto (RIBOTTA, 2009) .

Por otro lado, la clasificación basada en la formulación permite identificar panes enriquecidos o especiales, en los cuales se incorporan ingredientes adicionales como grasas, azúcares, semillas, leche, huevos o fibras dietéticas. Estos componentes modifican significativamente las propiedades reológicas de la masa, así como las características sensoriales, nutricionales y de conservación del pan, dando lugar a una amplia diversidad de productos con perfiles tecnológicos diferenciados (Mesas & Alegre, 2002) .

En este contexto, la diversificación de formas y formulaciones no solo responde a preferencias del consumidor, sino también a innovaciones tecnológicas orientadas a mejorar la calidad nutricional, la funcionalidad y la vida útil de los productos panarios, consolidando al pan como un alimento altamente versátil dentro de la industria alimentaria (Cauvain, 2015).

2.3 Proceso de elaboración de productos de panificación

El proceso de elaboración consiste en una serie de etapas que deben ser controladas ya que cada una influye directamente en las propiedades fisicoquímicas, microbiológicas y sensoriales del producto final. En la figura 1 se presenta el proceso general para la elaboración de un producto de panificación.

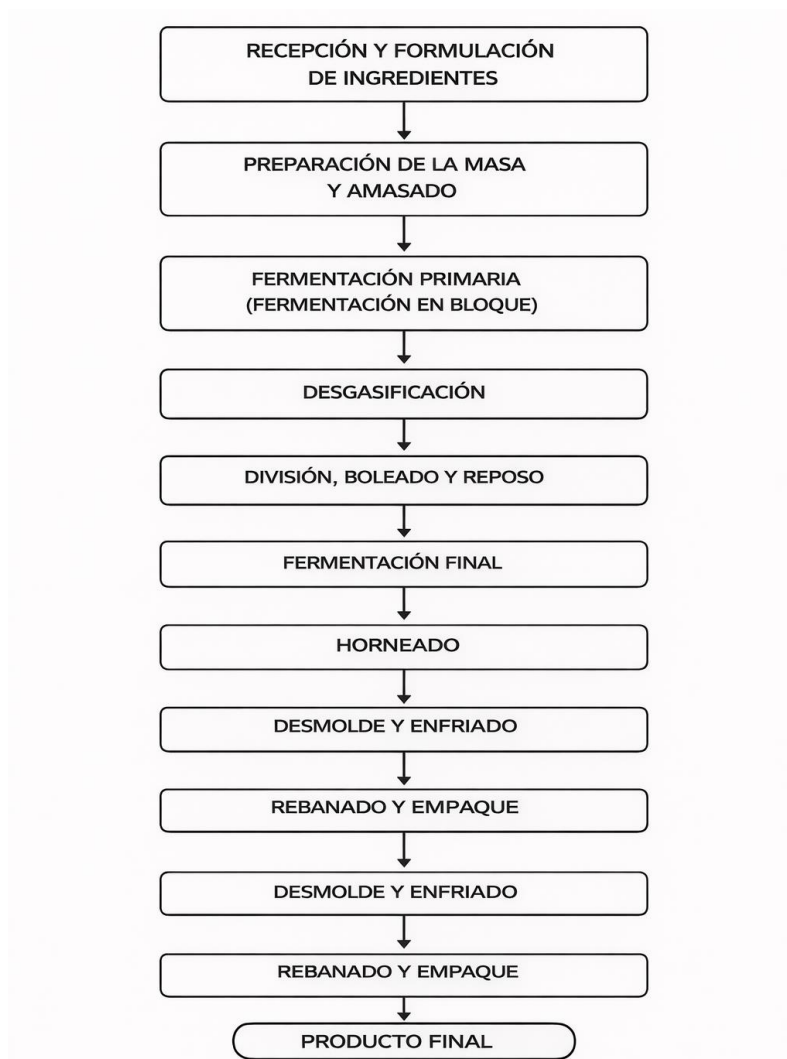


Figura 1: Proceso de elaboración de pan

Este proceso inicia con la selección y formulación de ingredientes y culmina con el enfriado y empaque del producto. De acuerdo con Mesta-Corral *et al.* (2024), el proceso puede agruparse en tres fases principales: amasado, fermentación y horneado.

El amasado constituye una etapa fundamental en la panificación, cuyo objetivo principal es el desarrollo de la red de gluten, responsable de conferir a la masa propiedades viscoelásticas como elasticidad, extensibilidad y capacidad de retención de gases. Durante este proceso, la energía mecánica aplicada promueve la hidratación, desnaturalización parcial y reorganización de las proteínas del trigo, principalmente gliadinas y gluteninas, facilitando la formación de enlaces intermoleculares (como enlaces disulfuro y puentes de hidrógeno) que dan lugar a una estructura tridimensional continua (Veraverbeke & Delcour, 2002).

Asimismo, el amasado favorece la incorporación de aire, generando sitios que permitirán la expansión del dióxido de carbono durante la fermentación, contribuyendo al volumen final del pan (Cauvain, 2015; Muñoz *et al.*, 2021).

Este proceso depende de variables críticas como el tiempo, la intensidad y la temperatura. En particular, la temperatura de la masa influye directamente en la actividad enzimática y fermentativa, afectando tanto la cinética de producción de gas como la calidad estructural de la masa (Delcour & Hoskeney, 2010).

La fermentación constituye una etapa clave en la que los microorganismos, principalmente *Saccharomyces cerevisiae*, metabolizan azúcares fermentables produciendo dióxido de carbono, etanol y una amplia gama de compuestos aromáticos. El CO₂ generado queda atrapado en la red de gluten, provocando la expansión de la masa y el desarrollo de una estructura alveolar característica (Calvel, 2001; Cauvain & Young, 2007).

Durante la fermentación se producen ácidos orgánicos y compuestos volátiles que contribuyen significativamente a las características organolépticas del pan, mejorando atributos como sabor, aroma y textura. Además, se generan cambios

bioquímicos que incrementan la biodisponibilidad de nutrientes y modifican la reología de la masa, favoreciendo su manejabilidad (Gobbetti et al., 2014).

Finalmente, el horneado implica una serie de transformaciones físicoquímicas complejas inducidas por el calor. Entre ellas destacan la gelatinización del almidón (60–70 °C), la desnaturalización de proteínas (70–80 °C) y la expansión final de los gases, procesos que consolidan la estructura interna del pan. Asimismo, en la superficie se desarrollan reacciones de Maillard y caramelización, responsables de la formación de la corteza, el color y los compuestos aromáticos característicos (Zanoni et al., 1994; Mondal & Datta, 2008).

En conjunto, estas etapas determinan la calidad tecnológica y sensorial del pan, ya que la interacción entre fenómenos mecánicos, microbiológicos y térmicos define la estructura, textura, volumen y aceptabilidad del producto final.

2.4 Ingredientes en la panificación y su función tecnológica

Los ingredientes empleados en la panificación desempeñan funciones específicas que determinan la estructura, textura, sabor y estabilidad del producto final. La interacción entre estos componentes constituye la base del comportamiento reológico de la masa y de las transformaciones físicoquímicas durante el horneado.

2.4.1 Harina de trigo

La harina de trigo constituye el ingrediente estructural más importante en la panificación, debido a su capacidad para formar una red viscoelástica que permite la producción de productos con volumen y buena textura. Desde el punto de vista composicional, está constituida principalmente por carbohidratos (74–76%), proteínas (9–11%), lípidos (1–2%), agua y minerales, siendo el almidón y las proteínas los componentes más relevantes desde una perspectiva funcional (Delcour & Hoskeney, 2010).

El almidón representa aproximadamente el 70–75% de la harina y está conformado por dos polisacáridos: amilosa y amilopectina. Durante el horneado, el almidón sufre un proceso de gelatinización en presencia de agua y temperatura, lo que contribuye a la formación de la estructura de la miga y a la estabilidad del producto final (Tester et al., 2004). Asimismo, la retrogradación del almidón durante el almacenamiento está asociada con el fenómeno de endurecimiento del pan (Gray & Bemiller, 2003).

Por otro lado, las proteínas del trigo, particularmente las fracciones de gliadinas y gluteninas, son responsables de la formación del gluten. Las gliadinas aportan extensibilidad, mientras que las gluteninas confieren elasticidad, y la interacción entre ambas permite la formación de una red tridimensional capaz de retener los gases producidos durante la fermentación (Veraverbeke & Delcour, 2002; Jekle *et al.*, 2015). Esta red proteica se desarrolla mediante la formación de enlaces disulfuro, interacciones hidrofóbicas y puentes de hidrógeno, los cuales son promovidos durante el amasado.

Además de su función estructural, la harina de trigo contiene enzimas endógenas, como amilasas y proteasas, que desempeñan un papel clave en la transformación de macromoléculas durante la fermentación. Las amilasas hidrolizan el almidón para generar azúcares fermentables, mientras que las proteasas modifican la red de gluten, influyendo en la reología de la masa y en la calidad final del pan (Cauvain, 2015).

Otro componente relevante es la fracción lipídica, aunque presente en baja proporción, la cual interactúa con proteínas y almidón, contribuyendo a la estabilidad de las burbujas de gas y a la textura del pan. Asimismo, los minerales y compuestos fenólicos pueden influir en el color, sabor y valor nutricional del producto (Shewry & Hey, 2015).

La calidad panadera de la harina de trigo depende de factores como el contenido y calidad de proteína, la capacidad de absorción de agua, la fuerza de la harina (W), y la actividad enzimática. Estas propiedades determinan el comportamiento

reológico de la masa y su aptitud para diferentes productos panarios (Cappelli et al., 2020).

En conjunto, la harina de trigo no solo actúa como un ingrediente base, sino como un sistema complejo en el que interactúan componentes estructurales, enzimáticos y funcionales que determinan la calidad tecnológica y sensorial del pan.

2.4.2 Masa madre

La masa madre es un sistema fermentativo complejo constituido por una comunidad microbiana estable integrada principalmente por levaduras y bacterias ácido-lácticas (BAL), las cuales establecen interacciones simbióticas que permiten la fermentación de la masa. Se desarrolla de manera espontánea o controlada a partir de la mezcla de harina y agua, y está influenciado por factores como la temperatura, pH, hidratación y tipo de sustrato (De Vuyst & Neysens, 2005).

Las bacterias ácido-lácticas, pertenecientes principalmente a los géneros *Lactobacillus*, *Leuconostoc* y *Pediococcus*, son responsables de la producción de ácido láctico y ácido acético, compuestos que contribuyen a la acidificación de la masa. Por su parte, las levaduras, como *Saccharomyces cerevisiae* y especies del género *Candida*, participan en la producción de dióxido de carbono y etanol, facilitando el crecimiento de la masa y la formación de la estructura alveolar del pan (Gobbetti et al., 2016).

La masa madre mejora la calidad del pan; ya que la producción de ácidos orgánicos favorece la estabilidad microbiológica, inhibiendo el crecimiento de microorganismos indeseables y prolongando la vida útil del producto. Asimismo, estos compuestos influyen en la reología de la masa al modificar la estructura del gluten y la interacción con el almidón, lo que afecta la textura y volumen del pan (Arendt et al., 2007).

La fermentación con masa madre genera una amplia variedad de compuestos volátiles, como alcoholes, aldehídos, cetonas y ésteres, que contribuyen al desarrollo de un perfil sensorial más complejo en comparación con la fermentación

convencional con levadura comercial (Pico *et al.*, 2015). Esto se traduce en mejoras en atributos como sabor, aroma y aceptabilidad del producto final.

Desde el punto de vista nutricional, la masa madre presenta beneficios relevantes, ya que la actividad enzimática de las BAL favorece la degradación de compuestos antinutricionales como el ácido fítico, incrementando la biodisponibilidad de minerales como hierro, zinc y calcio. Asimismo, puede contribuir a la reducción del índice glucémico del pan y mejorar la digestibilidad de las proteínas (Gobbetti *et al.*, 2014).

En conjunto, la masa madre representa una herramienta biotecnológica clave en la panificación moderna, ya que no solo mejora las características sensoriales y tecnológicas del pan, sino que también aporta beneficios nutricionales y funcionales que responden a las tendencias actuales de consumo hacia productos más naturales y saludables.

2.4.3 Agua

El agua es un componente esencial en la panificación, ya que actúa como medio de hidratación y facilita la interacción entre los diferentes componentes de la harina. Su función principal es permitir la hidratación de las proteínas formadoras de gluten (gliadinas y gluteninas), promoviendo su reorganización estructural durante el amasado y la formación de una red viscoelástica continua (Cauvain & Young, 2007).

El agua solubiliza azúcares, sales y compuestos hidrosolubles, lo que favorece la actividad enzimática y fermentativa. También participa directamente en la gelatinización del almidón durante el horneado, proceso fundamental para la formación de la estructura de la miga (Delcour & Hoskeney, 2010).

La cantidad de agua utilizada, expresada como porcentaje de hidratación, influye de manera determinante en las propiedades reológicas de la masa, tales como la consistencia, la extensibilidad y la viscosidad. Un mayor contenido de agua favorece masas más extensibles y panes con mayor volumen y alveolado,

mientras que una hidratación insuficiente limita el desarrollo del gluten y reduce la calidad del producto final (Cauvain, 2015).

Asimismo, la calidad del agua (pH, dureza y contenido mineral) puede afectar la fermentación y la estabilidad de la masa, ya que ciertos iones pueden modificar la actividad enzimática y la interacción proteína y almidón.

2.4.4 Sal

El cloruro de sodio es un ingrediente fundamental en la panificación debido a sus múltiples funciones tecnológicas y sensoriales. Desde el punto de vista estructural, la sal fortalece la red de gluten al favorecer interacciones electrostáticas entre las proteínas, lo que mejora la elasticidad y la capacidad de retención de gases de la masa (Belz *et al.*, 2012).

Además, la sal actúa como regulador de la fermentación, ya que reduce la actividad de las levaduras al generar un efecto osmótico, permitiendo un control más uniforme de la producción de dióxido de carbono y evitando fermentaciones excesivamente rápidas (Cauvain & Young, 2007).

En términos sensoriales, la sal contribuye significativamente al sabor del pan, equilibrando notas dulces y ácidas, y potenciando la percepción global del producto. Asimismo, influye en la coloración de la corteza al afectar indirectamente las reacciones de Maillard durante el horneado (Belz *et al.*, 2012).

Por otro lado, la reducción de sal en productos de panificación es una tendencia actual por motivos de salud pública, aunque esto puede comprometer la textura, el volumen y la estabilidad del producto, lo que representa un reto tecnológico en la formulación (Silow *et al.*, 2016).

2.4.5 Grasas

Las grasas desempeñan un papel importante en la mejora de la calidad tecnológica y sensorial del pan. Su principal función es actuar como agentes

lubricantes que reducen la fricción entre las moléculas de gluten, facilitando la extensibilidad de la masa y favoreciendo la expansión durante la fermentación y el horneado (Stauffer, 2005).

Desde el punto de vista estructural, las grasas contribuyen a la estabilización de las burbujas de gas al interactuar con las proteínas y los almidones, lo que permite obtener una miga más uniforme y suave. Asimismo, interfieren en la retrogradación del almidón, retrasando el endurecimiento del pan y prolongando su vida útil (Gray & Bemiller, 2003).

Además, las grasas influyen en atributos sensoriales como la suavidad, la humedad y la palatabilidad del producto final. Dependiendo del tipo de grasa utilizada (mantequilla, aceites vegetales o grasas emulsificadas), se pueden modificar características como el sabor, el aroma y la textura del pan (Cauvain, 2015).

En conjunto, la incorporación de grasas permite mejorar la calidad global del producto, aunque su uso debe ser controlado para evitar efectos negativos en la estructura o en el perfil nutricional.

2.5 Factores que afectan la calidad del pan

La calidad del pan está determinada por múltiples variables relacionadas con el proceso de elaboración, siendo el amasado, la fermentación y el horneado las etapas críticas.

El amasado influye en el desarrollo del gluten, el cual determina la capacidad de retención de gas y la estructura de la miga. Factores como el tiempo, la velocidad y la temperatura son determinantes en esta etapa (Lomonaco *et al.*, 2025).

La fermentación impacta directamente en el volumen, la textura y el perfil sensorial. La producción de dióxido de carbono permite la expansión de la masa, mientras que los metabolitos generados, como ácidos orgánicos, contribuyen al sabor y a la conservación del pan. Asimismo, este proceso mejora la

biodisponibilidad de nutrientes al reducir compuestos antinutricionales (Jekle *et al.*, 2015; Chochkov *et al.*, 2022).

El horneado induce transformaciones como la gelatinización del almidón y la desnaturalización de proteínas, lo que define la estructura final del pan, su textura y la formación de la corteza (Mondal, 2007).

2.6 Materias primas y composición de harinas

Las harinas constituyen la base estructural de los productos de panificación, y su composición química y funcional determina el comportamiento reológico de la masa y la calidad final del pan. Los principales componentes son el almidón, las proteínas, la fibra dietética y los compuestos bioactivos, cuya proporción varía según el cereal de origen (Delcour & Hoskeney, 2010).

2.6.1 Harina de trigo

La harina de trigo se caracteriza por su alto contenido de almidón y proteínas formadoras de gluten, lo que la convierte en el principal insumo en panificación. La presencia de gliadinas y gluteninas permite la formación de una red viscoelástica capaz de retener gases durante la fermentación, favoreciendo el desarrollo de volumen y una estructura alveolar homogénea (Jekle *et al.*, 2015).

Asimismo, su composición influye en parámetros tecnológicos como la absorción de agua, la estabilidad de la masa y la tolerancia al amasado. Harinas con mayor contenido proteico y adecuada calidad de gluten presentan mayor fuerza panadera, lo que se traduce en productos con mejor textura, volumen y calidad sensorial (Cauvain, 2015).

2.6.2 Harina de centeno

La harina de centeno (*Secale cereale*) presenta una composición rica en fibra dietética, minerales y compuestos bioactivos, lo que le confiere un alto valor nutricional. Sin embargo, a diferencia del trigo, su capacidad para formar gluten es

limitada, lo que condiciona significativamente su comportamiento tecnológico (Dziki, 2022).

En el centeno, la estructura del pan depende principalmente de la gelatinización del almidón y de la acción de polisacáridos no amiláceos, especialmente los arabinoxilanos, los cuales poseen una elevada capacidad de retención de agua y contribuyen a la viscosidad de la masa. Esto da lugar a productos con miga más densa y húmeda en comparación con el pan de trigo (Buxa *et al.*, 2016).

Además, el centeno presenta una mayor actividad enzimática, particularmente de amilasas, lo que puede afectar la estabilidad de la estructura del pan si no se controla adecuadamente el proceso. En este sentido, la acidificación de la masa juega un papel clave en la estabilización del sistema (Arendt *et al.*, 2007).

2.6.3 Mezclas de harinas y compatibilidad tecnológica

La combinación de harinas de trigo y centeno constituye una estrategia común para mejorar el perfil nutricional del pan, incrementando el contenido de fibra y compuestos bioactivos, sin comprometer completamente la estructura del producto.

No obstante, la sustitución parcial de harina de trigo por centeno implica una reducción en la formación de gluten, lo que afecta la capacidad de retención de gases y, por ende, el volumen del pan. En estos sistemas, la estructura depende en mayor medida de la interacción entre almidón y polisacáridos, lo que resulta en masas más viscosas y panes con miga más compacta (Oest *et al.*, 2020).

La compatibilidad tecnológica de estas harinas depende de factores como la proporción de sustitución, la hidratación, el desarrollo del gluten residual, el proceso de amasado y las condiciones de fermentación. Un manejo adecuado de estos parámetros es fundamental para optimizar la calidad del producto final.

2.7 Efecto de la fermentación mixta (levadura + masa madre)

La fermentación mixta, que combina levadura comercial (*Saccharomyces cerevisiae*) y masa madre, representa una estrategia tecnológica eficaz para mejorar la calidad de panes elaborados con mezclas de trigo y centeno.

La levadura comercial proporciona una rápida producción de dióxido de carbono, favoreciendo el desarrollo de volumen, mientras que la masa madre contribuye a la acidificación del sistema mediante la producción de ácido láctico y acético. Esta acidificación es particularmente importante en sistemas con centeno, ya que permite controlar la actividad enzimática, especialmente de las amilasas, evitando la degradación excesiva del almidón y mejorando la estabilidad de la miga (Gobbetti *et al.*, 2016).

Además, los ácidos orgánicos producidos durante la fermentación favorecen la interacción entre proteínas y polisacáridos, mejorando la textura, la retención de agua y la calidad estructural del pan. Desde el punto de vista sensorial, la fermentación mixta contribuye al desarrollo de un perfil aromático más complejo, incrementando la aceptabilidad del producto final (Gobbetti *et al.*, 2014).

En conjunto, esta estrategia permite compensar las limitaciones tecnológicas del centeno, optimizando tanto las propiedades físicas como sensoriales del pan.

3. Justificación

La panificación constituye una de las áreas más relevantes dentro de la industria alimentaria, no solo por su importancia cultural y económica, sino también por su papel en la alimentación cotidiana de la población. En este contexto, el desarrollo de productos de panificación con características tecnológicas, sensoriales y nutricionales mejoradas representa una línea de investigación de gran interés en el ámbito de la ciencia de los alimentos.

En la actualidad, existe una tendencia creciente hacia el consumo de alimentos más saludables y funcionales, lo que ha impulsado la incorporación de materias primas alternativas, como el centeno, debido a su mayor contenido de fibra dietética, compuestos bioactivos y beneficios potenciales para la salud. Sin embargo, el uso de esta harina presenta limitaciones tecnológicas importantes, principalmente relacionadas con su baja capacidad para formar gluten, lo que afecta negativamente la estructura, el volumen y la textura del pan.

Ante esta problemática, la fermentación mixta, que combina el uso de levadura comercial (*Saccharomyces cerevisiae*) y masa madre, surge como una estrategia biotecnológica prometedora para mejorar la calidad de productos elaborados con mezclas de harinas. Este tipo de fermentación permite aprovechar las ventajas de ambos sistemas: por un lado, la rápida producción de dióxido de carbono por parte de la levadura, y por otro, la generación de ácidos orgánicos y compuestos aromáticos por las bacterias ácido-lácticas, lo que contribuye a mejorar la estructura, la vida útil y las características sensoriales del pan.

En este sentido, la caracterización fisicoquímica y la evaluación sensorial de productos de panificación elaborados mediante fermentación mixta permiten generar conocimiento científico aplicado que contribuye a optimizar procesos tecnológicos y a desarrollar productos con mayor valor agregado.

4. Objetivos

4.1 General

Determinar la composición fisicoquímica y aceptabilidad sensorial de un producto de panificación (pan de caja) a base de harina de trigo y centeno mediante fermentación mixta

4.2 Específicos

- Desarrollar formulaciones de producto de panificación (pan de caja) a base de harina de trigo y centeno utilizando fermentación mixta
- Determinar la aceptabilidad sensorial de un producto de panificación a base de harina de trigo y centeno mediante una prueba de ordenamiento por preferencia
- Determinar la composición fisicoquímica de un producto de panificación (pan de caja) a base de harina de trigo y centeno mediante técnicas oficiales de análisis

5. Metodología

La presente investigación se llevó a cabo mediante una serie de etapas secuenciales orientadas a la elaboración de un producto de panificación tipo pan de caja a base de harina de trigo y centeno, empleando un sistema de fermentación mixta que integra levadura comercial y masa madre . Este enfoque permitió evaluar la interacción entre ambos sistemas fermentativos y su influencia en la calidad del producto final.

5.1 Obtención de masa madre

Como etapa preliminar, se realizó la esterilización de frascos de vidrio mediante calor húmedo. Este procedimiento se fundamenta en la aplicación de ebullición en agua, la cual permite la inactivación de microorganismos. Para ello, los frascos y sus tapas fueron lavados previamente con agua y detergente, enjuagados con abundante agua potable y colocados en una olla con suficiente capacidad en posición invertida. Posteriormente, se añadió agua hasta cubrir completamente los recipientes, los cuales fueron sometidos a ebullición durante un periodo de 10 a 15 minutos. Finalmente, el material se retiró con pinzas limpias y se dejó secar al aire sobre una superficie limpia, evitando su manipulación directa.

Posteriormente, se llevó a cabo la elaboración de la masa madre. En un frasco de vidrio previamente esterilizado, se incorporaron 50 mL de agua purificada, 50 g de harina de trigo de fuerza media y 50 g de iniciador de masa madre. La mezcla se homogenizó hasta obtener una consistencia semilíquida y uniforme. El recipiente se mantuvo cerrado y se dejó reposar a temperatura ambiente (24–26 °C) durante un periodo de 6 a 8 horas, hasta observar un incremento significativo en su volumen, caracterizado por duplicarse o triplicarse, así como por la presencia de burbujas y una textura esponjosa.

Previo a su utilización, se verificó la actividad de la masa madre mediante la prueba de flotación, la cual consiste en colocar una pequeña porción del fermento

en un recipiente con agua. La flotación de la muestra indicó una adecuada producción de gases y, por ende, un estado óptimo de fermentación.

Una vez obtenida la masa madre activa, se procedió a la elaboración del pan de caja mediante fermentación mixta.

5.2 Elaboración de pan de caja a base de harina de trigo y centeno

Se realizó la mezcla de ingredientes secos, incorporando harina de trigo, harina de centeno, sal, azúcar y avena, con el objetivo de asegurar una distribución homogénea de los componentes. Paralelamente, en un recipiente independiente, se integraron los ingredientes líquidos, incluyendo leche, agua y miel, a los cuales se añadió la masa madre activa.

Posteriormente, los ingredientes líquidos se incorporaron a la mezcla seca, iniciando el proceso de amasado hasta obtener una masa homogénea. Posteriormente, se añadió la levadura comercial y se continuó el amasado durante 8 a 12 minutos. La mantequilla se incorporó de forma gradual, continuando el amasado hasta lograr una masa elástica, suave y con adecuado desarrollo de gluten, evidenciado mediante la prueba de ventana.

La masa obtenida se colocó en un recipiente ligeramente engrasado y se dejó fermentar a temperatura ambiente (24–26 °C) durante aproximadamente 90 minutos, correspondiente a la fermentación en bloque. Una vez finalizada esta etapa, la masa fue desgasificada suavemente, boleada y sometida a un periodo de reposo de 15 minutos para permitir la relajación del gluten.

Posteriormente, se procedió al formado de la masa en forma cilíndrica, adaptándola a las dimensiones del molde previamente engrasado. La superficie de la masa fue ligeramente humedecida para favorecer la adhesión de los copos de avena utilizados como decoración. A continuación, se llevó a cabo la fermentación final en molde durante un periodo de 60 a 90 minutos, hasta que la masa alcanzó aproximadamente tres cuartas partes del volumen del molde.

El proceso de horneado se realizó en un horno previamente precalentado a 200 °C, ajustando la temperatura de cocción entre 190 y 200 °C durante un tiempo de 45 a 50 minutos. La cocción se consideró adecuada cuando el pan alcanzó una temperatura interna de 90 a 94 °C y presentó un sonido hueco al golpear su base.

Finalmente, el pan fue desmoldado inmediatamente después de su cocción y se dejó enfriar sobre una rejilla durante un mínimo de 2 horas, con el propósito de estabilizar la estructura de la miga y evitar una textura húmeda o gomosa.

5.3 Diseño experimental de elaboración de producto de panificación

Con el propósito de evaluar el efecto de la proporción de harinas sobre las características del producto final, se desarrollaron diferentes formulaciones experimentales de pan de caja, variando la relación de harina de trigo y harina de centeno.

Las formulaciones evaluadas fueron las siguientes: 100% harina de trigo; 80% harina de trigo y 20% harina de centeno; 60% harina de trigo y 40% harina de centeno; 20% harina de trigo y 80% harina de centeno; y 100% harina de centeno. Cada una de estas formulaciones fue elaborada bajo las mismas condiciones de proceso, empleando fermentación mixta (levadura comercial y masa madre), con el fin de garantizar la comparabilidad de los resultados.

Posteriormente, las muestras obtenidas fueron sometidas a una evaluación sensorial mediante una prueba de ordenamiento por preferencia, en la cual los jueces valoraron atributos como aspecto, aroma, textura, sabor y calidad global.

5.4 Evaluación sensorial

El análisis sensorial es una disciplina científica que permite evaluar las características de un producto mediante los sentidos humanos, como la vista, el olfato, el gusto y el tacto. Su objetivo es obtener información objetiva sobre atributos como apariencia, aroma, textura y sabor (Pérez, 2019).

Las pruebas sensoriales en consumidores se utilizan para medir la preferencia y aceptación de un producto, estas evaluaciones deben realizarse con personas que representen a los consumidores del producto (González Regueiro *et al.*, 2014).

Se realizó mediante una prueba de ordenamiento por preferencia, con la participación de 30 estudiantes de la Licenciatura en Gastronomía del Instituto de Ciencias Económico Administrativas (ICEA) de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, quienes participaron como jueces no entrenados.

La prueba se llevó a cabo en el laboratorio de Enología, el cual contaba con condiciones adecuadas de iluminación, temperatura y ausencia de ruido. A cada participante se le proporcionaron 30 g de cada muestra, presentadas en recipientes de plástico codificados con letras de la A a la E, con el fin de evitar sesgos durante la evaluación. Las muestras correspondieron a diferentes formulaciones de pan de caja elaboradas con distintas proporciones de harina de trigo y centeno. La muestra A correspondió al pan con 100% harina de trigo y la muestra E al pan con 100% harina de centeno.

Los participantes evaluaron cada muestra utilizando una escala hedónica de cinco puntos, de acuerdo con su grado de agrado. Además, se les pidió ordenar las muestras del 1 al 5, donde 5 correspondió a la muestra más preferida y 1 a la menos preferida. En la Figura 2 se presenta la ficha de cata utilizada en la investigación.

FICHA DE CATA – ORDENAMIENTO POR PREFERENCIA

NOMBRE: _____

Objetivo: Evaluar la preferencia de los catadores entre diferentes tipos de panes de caja, basados en las proporciones de trigo y centeno.

Instrucciones de cata:

- Cata en orden de preferencia: Degustar los siguientes panes de caja y ordenarlos según tu preferencia personal, del más favorito al menos favorito.

- Aspecto: Califica visualmente cada pan en una escala del 1 al 5.
- Aroma: Evalúa el aroma del pan en una escala del 1 al 5.
- Textura: Evalúa la textura del pan en una escala del 1 al 5.
- Sabor: Califica el sabor del pan en una escala del 1 al 5.
- Evalúa la impresión global del pan en una escala del 1 al 5.

Muestras de Pan de Caja:

1. 100% Harina de Trigo
2. 80% Harina de Trigo / 20% Harina de Centeno
3. 60% Harina de Trigo/ 40% Harina de Centeno
4. 20% Harina de Trigo/ 80% Harina de Centeno
5. 100% Harina de Centeno

Muestra	Aspecto (1-5)	Aroma (1-5)	Textura (1-5)	Sabor (1-5)	Calidad global (1-5)	Posición de Preferencia (1-5)
100% Harina de Trigo						
80% Harina de Trigo / 20% Harina de Centeno						
60% Harina de Trigo/ 40% Harina de Centeno						
20% Harina de Trigo/ 80% Harina de Centeno						
100% Harina de Centeno						

Figura 2: Ficha de cata utilizada en la prueba sensorial

5.5. Caracterización fisicoquímica

5.5.1 Humedad

Fundamento. La humedad es el material que se volatiliza de las muestras bajo condiciones de temperatura de $105^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

Procedimiento. En charolas de aluminio a peso constante se colocaron de 2 a 3 g de muestra y posteriormente se llevaron a peso constante en una estufa (Felisa®) a $105 \pm 1^{\circ}\text{C}$, considerándose esto cuando la muestra al ser pesada en la balanza analítica (Ohaus®) sólo presentó variación en la cuarta cifra decimal.

Cálculos. El porcentaje de humedad se calculó con la ecuación 1:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{P_i - P_f}{m} * 100 \quad (1)$$

Dónde:

P_i = Peso de la charola con muestra antes del secado (g)

P_f = Peso de la charola con muestra después del secado (g)

m = Peso de la muestra fresca (g)

5.5.2 Cenizas

Fundamento. Las cenizas son el residuo que se obtiene después de la incineración de una muestra, comprendiendo el material inorgánico de la misma.

Procedimiento. En crisoles a peso constante se colocaron de 2 a 3 g de muestra y se incineraron en parrilla de calentamiento hasta que la muestra ya no desprendió más humo. Posteriormente se colocaron en una mufla (Fisher

Scientific) a 550 °C hasta obtener un color homogéneo de las cenizas y un peso constante del crisol.

Cálculos. El porcentaje de cenizas se calculó mediante la ecuación 2:

$$\% \text{ Cenizas} = \frac{Pf - Po}{m} * 100 \quad (2)$$

Dónde:

P_f = Peso del crisol con la muestra después de incinerada (g)

P_o = Peso del crisol a peso constante (g)

m = Peso de la muestra fresca (g)

5.5.3 Grasa total

Fundamento. La cantidad de grasa cruda de una muestra se determina al someter una muestra a reflujo con éter. La fracción extraída, llamada también extracto etéreo, puede tener uno o varios de los siguientes grupos funcionales: ácidos grasos, ésteres, vitaminas liposolubles, aceites esenciales y carotenoides.

Procedimiento. Se colocaron de 3 a 5 g de muestra en un cartucho de celulosa, se taparon con algodón y se introdujeron en el compartimiento de extracción de un equipo Soxhlet.

Por otro lado, se colocó un matraz balón (previamente puesto a peso constante) en una parrilla de calentamiento, se le adicionó 150 mL de éter etílico. A continuación, se procedió a un calentamiento moderado, hasta la extracción total de la grasa (aproximadamente 8 horas), regulando que el reflujo fuera gota a gota y constante. Una vez completa la extracción, la mayor parte del solvente se recuperó con un rotavapor y el resto se eliminó colocando el matraz en una estufa (Felisa®) a 65 °C hasta peso constante.

Cálculos. El porcentaje de grasa cruda se calculó con la ecuación 3:

$$\% \text{ Grasa Cruda: } \frac{P_f - P_o}{m} * 100 \quad (3)$$

Dónde:

P_f = Peso constante del matraz con el extracto etéreo (g)

P_o = Peso constante del matraz antes de la determinación (g)

m = Peso de la muestra fresca referido al peso original (g)

5.5.4 Proteína por Método Kjeldahl

Fundamento. En el método Kjeldahl, la materia orgánica es oxidada produciendo dióxido de carbono, agua y nitrógeno, el cual forma una sal de amonio con los iones sulfato. La destilación de este amonio en forma de amoniaco se consigue en un medio fuertemente alcalino con sosa (NaOH) y el amonio es titulado con ácido clorhídrico. Con los datos de la reacción se puede calcular el porcentaje de nitrógeno contenido en la muestra, que multiplicado por un factor conocido permite determinar el porcentaje de proteína correspondiente.

Reactivos

- Mezcla digestiva. Se preparó con 3 g de sulfato de cobre pentahidratado (el cobre actúa como catalizador) en 20 mL de agua destilada, 50 mL de ácido fosfórico y 430 mL de ácido sulfúrico concentrado.
- Solución indicadora. Fue preparada con 5 g de ácido bórico disueltos en agua destilada, 35 mL del indicador A (100 mg de fenolftaleína aforados a 100 mL con alcohol etílico) y 10 mL del indicador B (33 mg de verde de bromocresol + 66 mg de rojo de metilo aforados a 100 mL con alcohol etílico). La mezcla se ajustó a un color café rojizo con ácido o álcali según se requirió y se aforó a 1 L con agua destilada.

Procedimiento

Digestión: en un tubo de digestión Kjeldahl se colocaron 70 mg de muestra, 0.5 g de sulfato de potasio (para aumentar la ebullición) y 3 mL de

mezcla digestiva. El tubo se colocó en el digestor (Modelo Din 08 Marca Ven) durante 15 min a 370°C. Posteriormente se enfrió y se le adicionó 1.5 mL de H₂O₂ al 30%, se volvió a colocar en el digestor a 370 °C, manteniéndose así hasta el final de la digestión (cuando su contenido se observó completamente translúcido, sin partículas negras en suspensión, que indican materia orgánica no digerida). A la par, se corrieron blancos preparados de la misma forma pero sustituyendo la muestra por sacarosa (J.T. Baker®)

Destilación. La muestra digerida se sometió a destilación. El destilador automático (Gerhardt® Modelo Vapodest 20) se programó para que adicionara al contenido del tubo 60 mL de NaOH al 50%, con un tiempo de destilación de 6 minutos al 60% de potencia de vapor. El destilado se recolectó en un matraz Erlenmeyer conteniendo 50 mL de solución indicadora.

Titulación. El contenido del matraz de recolección se tituló con HCl 0.01 N hasta el vire de verde esmeralda a café rojizo.

Cálculos. El porcentaje de proteína se calculó mediante las ecuaciones 4 y 5:

$$\% \text{ Nitrógeno} = \frac{(P - B) * N * meq * 100}{m} \quad (4)$$

$$\% \text{ Proteína} = \% N * F \quad (5)$$

Donde:

P = Volumen gastado en la titulación de la muestra (mL)

B = Volumen gastado en la titulación del blanco (mL)

N = Normalidad del HCl

meq = Miliequivalentes de nitrógeno (0.014)

m = Peso de la muestra (g)

F = Factor de conversión (6.23)

5.5.5 Fibra cruda

Fundamento. La fibra cruda equivale a la pérdida por ignición, del residuo seco remanente después de la digestión de la muestra con ácido sulfúrico al 1.25% e hidróxido de sodio al 1.25%, bajo condiciones específicas.

Procedimiento. Se pesaron de 2 a 3 g de muestra desengrasada (si presenta un porcentaje mayor al 5%) y se colocaron en el vaso de Berzelius junto con 0.5 g de asbesto preparado, unas perlas de vidrio y unas gotas de antiespumante; se adicionaron cuidadosamente 200 mL de H₂SO₄ 1.25% en ebullición y el vaso se colocó en el digestor (previamente caliente). Al cabo de 30 min de ebullición, el vaso se retiró para filtrar su contenido al vacío, a través de la tela de lino y lavando con agua destilada caliente hasta eliminar el ácido por completo (hasta que el lavado presentó pH neutro, aproximadamente después de la adición de 600 mL de agua).

El residuo, junto con las perlas, se transfirió al vaso de Berzelius y se le adicionaron 200 mL de NaOH al 1.25% en ebullición, además de unas gotas de antiespumante; se colocó en el digestor y se dejó en ebullición por 30 min. Posteriormente, el contenido del vaso se filtró al vacío como en el paso anterior, se lavó con agua caliente y se le adicionaron al residuo 25 mL de alcohol etílico para eliminar una mayor cantidad de humedad. Este residuo se trasladó a una cápsula de porcelana a peso constante y se introdujo en la estufa para su secado (100°C). Una vez a peso constante, la cápsula con el residuo se colocó en la mufla para su calcinación a 550°C, hasta que ésta se completó.

Cálculos. La cantidad de fibra cruda en la muestra se calculó mediante la ecuación 6:

$$\% \text{ Fibra cruda} = \frac{P_s - P_c}{m} * 100 \quad (6)$$

Donde:

P_s = Peso constante del crisol con el residuo seco (g)

Pc = Peso constante del crisol después de la calcinación
(g) m = Peso de la muestra (referido a la muestra original) (g)

5.5.6 Carbohidratos

El contenido de carbohidratos se determinó por diferencia, considerando los valores previamente obtenidos de humedad, proteína, grasa, cenizas y fibra. Este método es ampliamente utilizado en el análisis proximal de alimentos, ya que los carbohidratos constituyen la fracción restante de la composición total. Los resultados se expresaron en porcentaje y representan principalmente el contenido de almidón, junto con pequeñas cantidades de azúcares simples presentes en el producto.

5.5.7 Determinación de pH y actividad de agua (aw)

El pH y la actividad de agua (aw) del pan elaborado con 80 % harina de trigo y 20 % harina de centeno se determinaron con el fin de evaluar sus propiedades fisicoquímicas.

El pH se midió utilizando un potenciómetro digital previamente calibrado con soluciones buffer de pH 4.0 y 7.0. Para ello, se tomó una muestra de miga de pan (10 g), la cual se homogeneizó con 90 mL de agua destilada. Posteriormente, se introdujo el electrodo en la suspensión y se registró el valor una vez estabilizada la lectura. Las mediciones se realizaron por triplicado a temperatura ambiente.

La actividad de agua (aw) se determinó utilizando un equipo medidor de aw previamente calibrado. Se colocó una porción de miga de pan (2–3 g) en la cámara del equipo y se registró el valor una vez alcanzado el equilibrio. Las determinaciones también se realizaron por triplicado a temperatura ambiente. Los resultados se expresaron como promedio $\pm$ desviación estándar.

5.6.8 Determinación de color

El color del pan elaborado con 80 % harina de trigo y 20 % harina de centeno se determinó mediante el sistema *CIELAB* (L , a , b^*)**, utilizando un colorímetro previamente calibrado. Las mediciones se realizaron directamente en la miga y la corteza, tomando tres lecturas en diferentes puntos de cada muestra. Los parámetros evaluados fueron L^* (luminosidad), a^* (rojo-verde) y b^* (amarillo-azul).

6. Resultados y discusión

6.1 Evaluación sensorial

6.1.1 Apariencia

La apariencia presentó una mayor aceptación en las formulaciones con predominio de harina de trigo, lo que puede explicarse por la obtención de una coloración más uniforme, una corteza mejor desarrollada y una estructura visualmente atractiva. La apariencia constituye el primer estímulo sensorial que condiciona la expectativa del consumidor, influyendo en la percepción de calidad y frescura del producto (Spence, 2015); tal como se muestra en la figura 3.

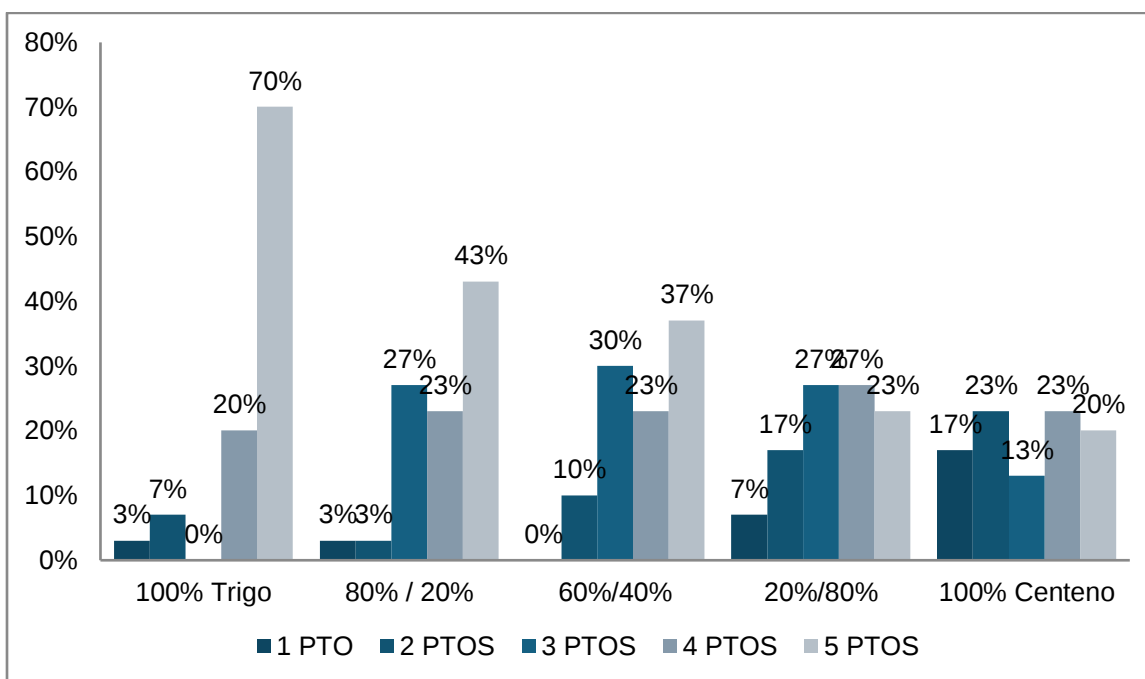


Figura 3: Evaluación sensorial de la apariencia en las formulaciones elaboradas

Desde el punto de vista fisicoquímico, este comportamiento está estrechamente relacionado con la reacción de Maillard, proceso de pardeamiento no enzimático que ocurre durante el horneado y que da lugar a la formación de melanoidinas responsables de tonalidades doradas características (Wang *et al.*, 2022). La intensidad de esta reacción depende de la disponibilidad de aminoácidos y

azúcares reductores, los cuales se encuentran en mayor proporción en la harina de trigo en comparación con el centeno (Hussein *et al.*, 2024).

6.1.2. Aroma

En cuanto al atributo aroma, las formulaciones con mayor contenido de trigo presentaron perfiles aromáticos más intensos y agradables (figura 4). Este resultado se atribuye a la generación de compuestos volátiles durante la fermentación y el horneado, incluyendo alcoholes, aldehídos, cetonas y ésteres (Poinot *et al.*, 2008; Birch *et al.*, 2014).

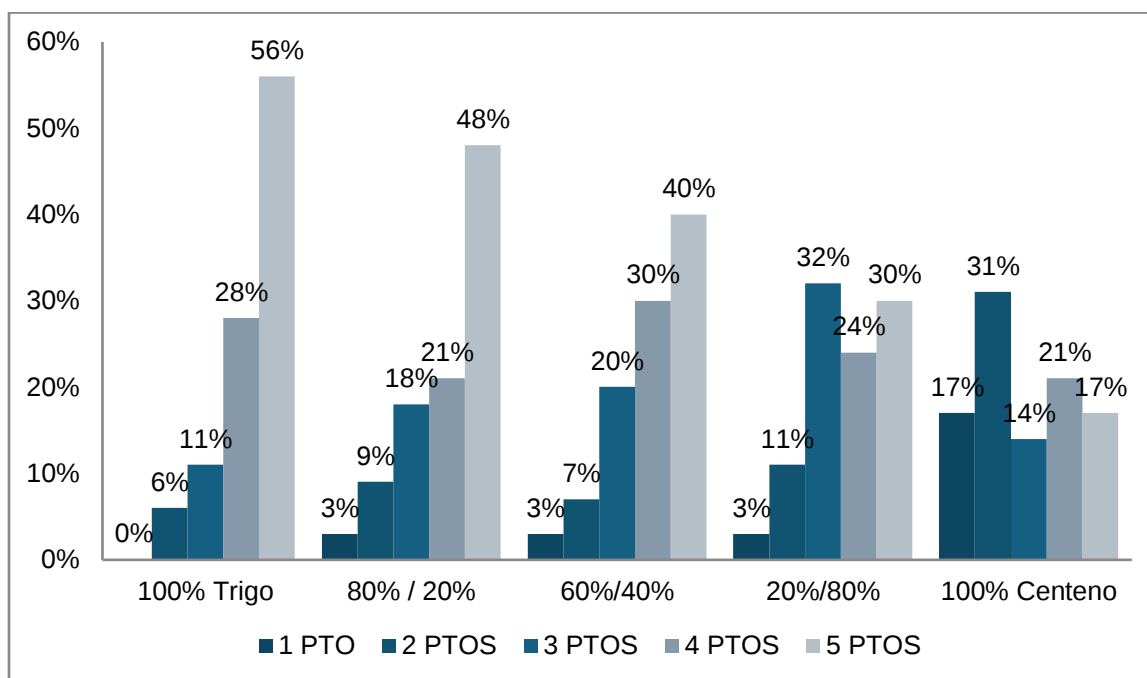


Figura 4: Evaluación sensorial del aroma en las formulaciones elaboradas

La reacción de Maillard también juega un papel fundamental en el desarrollo del aroma, generando compuestos como pirazinas, furanos y compuestos azufrados, responsables de notas tostadas y complejas (Ren *et al.*, 2024). También, el aroma tiene una influencia en la percepción global del alimento debido a su interacción con el sabor a través de mecanismos retronasales (Lawless & Heymann, 2010).

6.1.3 Textura

La textura mostró diferencias entre las formulaciones, siendo mejor evaluadas aquellas con mayor proporción de harina de trigo. Este comportamiento puede atribuirse a la formación de la red de gluten, la cual permite la retención de gases durante la fermentación, favoreciendo la formación de una miga suave, esponjosa y elástica (Cauvain, 2012; Onyango *et al.*, 2011); tal como se muestra en la figura 5.

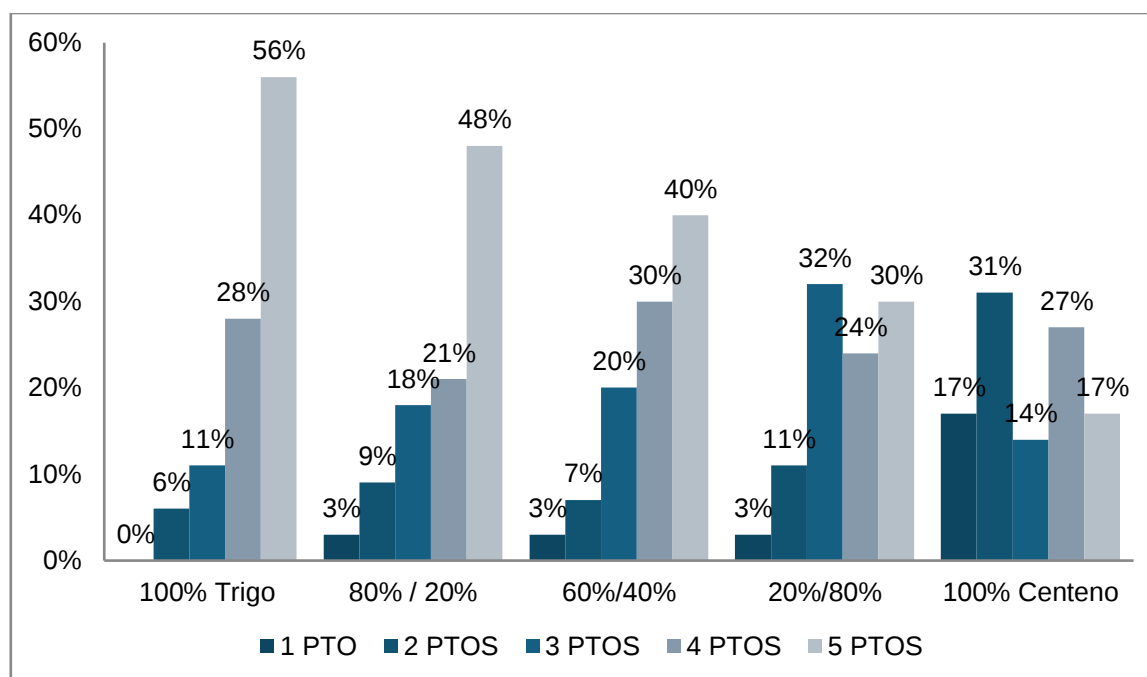


Figura 5: Evaluación sensorial de la textura en las formulaciones elaboradas

Durante el horneado, ocurren procesos como la gelatinización del almidón y la desnaturalización de proteínas, los cuales contribuyen a la formación de la estructura interna del pan (Mondal & Datta, 2008). Asimismo, propiedades texturales como la dureza, cohesión, elasticidad y masticabilidad son determinantes en la percepción de calidad y frescura (Guiné, 2022).

6.1.4. Sabor

El sabor presentó una mayor aceptación en las formulaciones con mayor contenido de trigo. El sabor es un atributo complejo que integra percepciones gustativas básicas y estímulos aromáticos percibidos retronasalmente (Lawless & Heymann, 2010); tal como una figura 6.

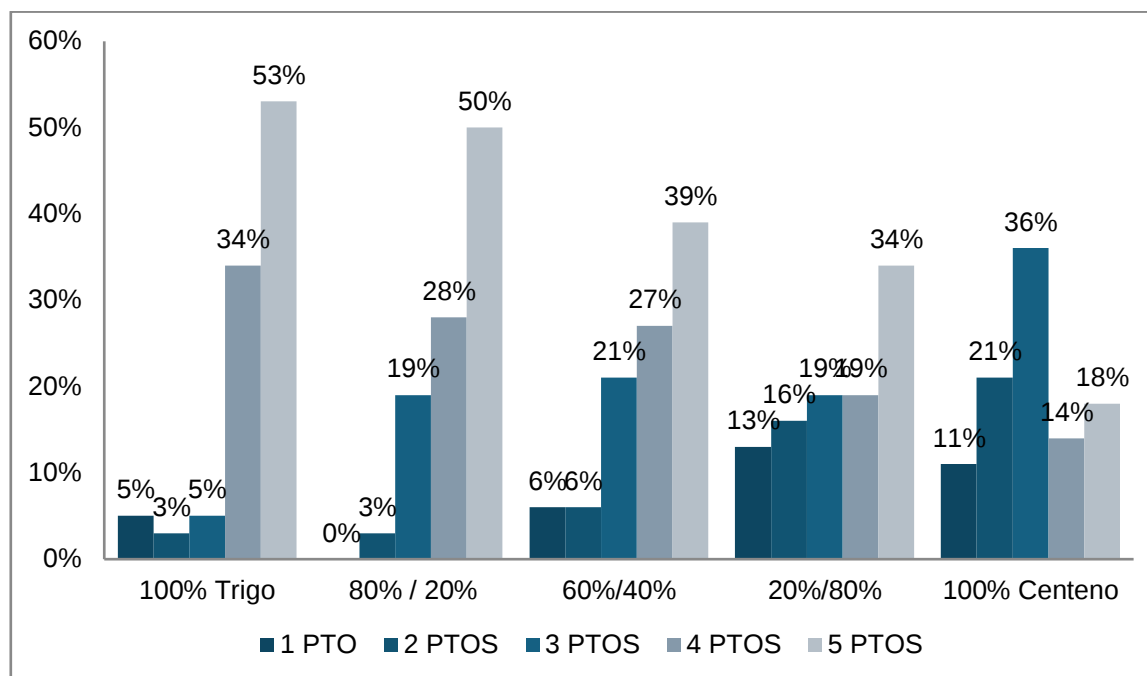


Figura 6: Evaluación del sabor en las formulaciones elaboradas

En productos panificados, el sabor se desarrolla a partir de compuestos generados durante la fermentación (ácidos orgánicos, alcoholes) y el horneado (productos de Maillard), los cuales aportan complejidad y persistencia sensorial (Birch *et al.*, 2014; Mondal & Datta, 2008). La mayor aceptación observada sugiere un adecuado balance entre estos compuestos.

6.1.5. Calidad global

La calidad global mostró una mayor aceptación en las formulaciones con predominio de harina de trigo. Este resultado confirma que la percepción global del producto depende de la interacción sinérgica entre apariencia, aroma, textura y sabor (Meilgaard *et al.*, 2016) (figura 7).

Estudios recientes han señalado que la calidad global es un predictor robusto del éxito comercial de productos alimentarios, ya que refleja la experiencia sensorial completa del consumidor (Olmo *et al.*, 2023; Daneshniya *et al.*, 2025).

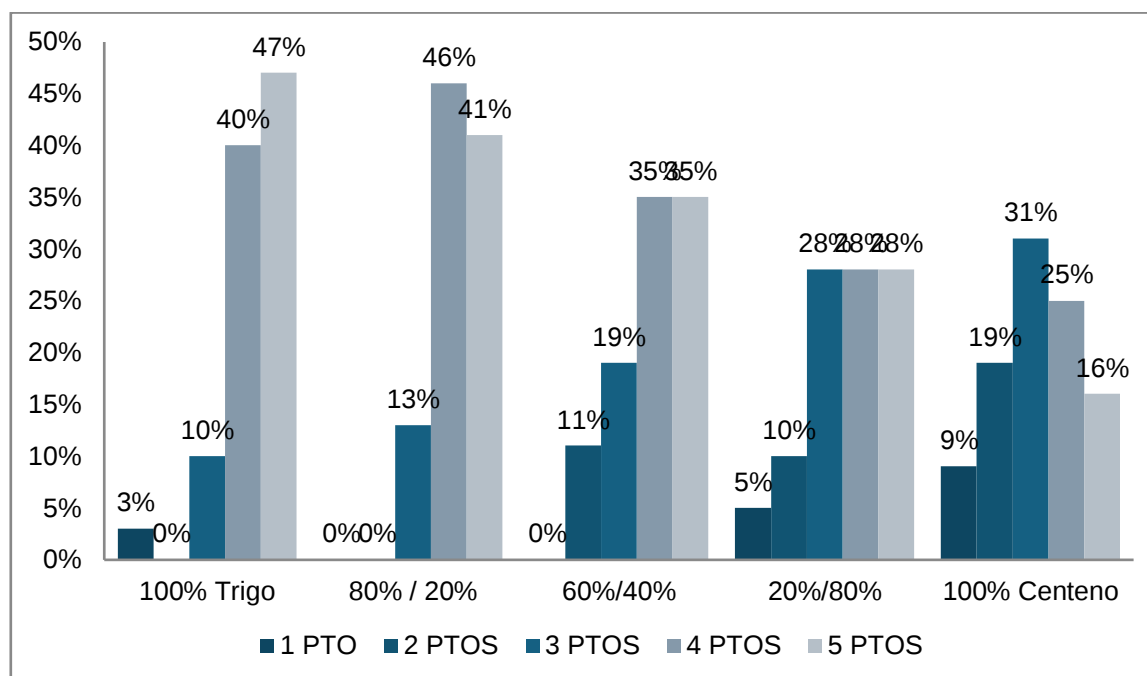


Figura 7: Evaluación de la calidad global en las formulaciones elaboradas

6.1.6 Preferencia del consumidor

Las pruebas de ordenamiento por preferencia permitieron establecer una jerarquización clara entre las formulaciones, evidenciando una mayor preferencia hacia aquellas con mayor contenido de harina de trigo. Este tipo de pruebas

proporciona información directa sobre la elección del consumidor, siendo ampliamente utilizadas en estudios de aceptación (Meilgaard *et al.*, 2016).

Los resultados confirman que la preferencia del consumidor está determinada por la interacción de múltiples atributos sensoriales, en concordancia con modelos teóricos de comportamiento del consumidor en alimentos (Spence, 2015); como se muestra en la figura 8.

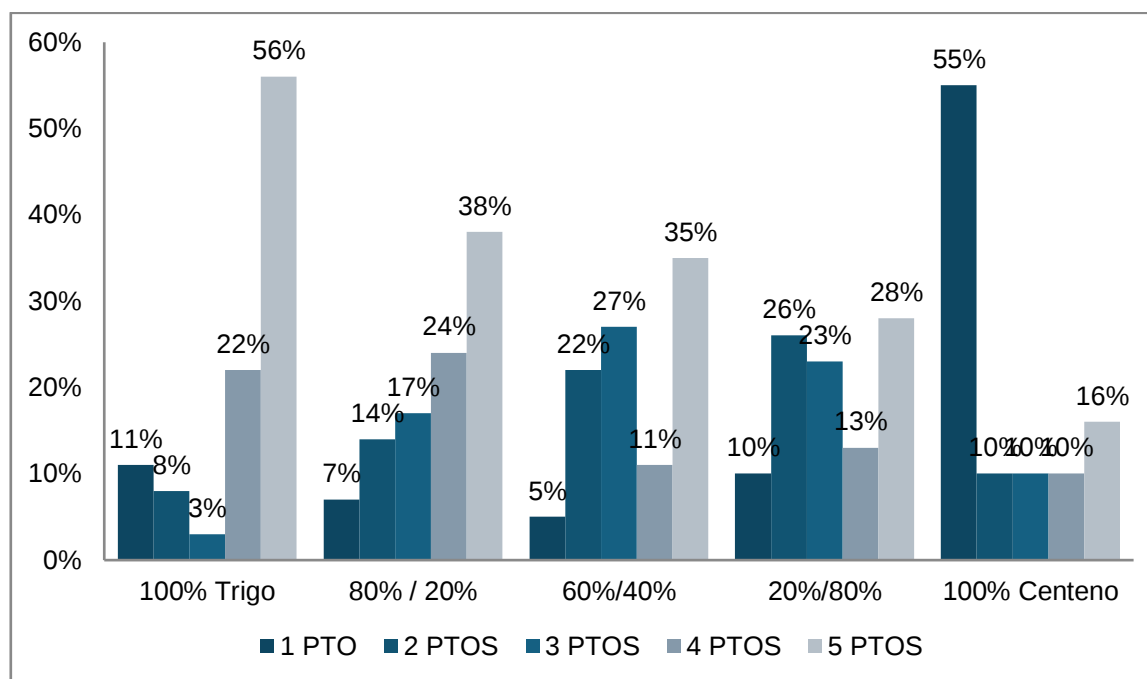


Figura 8. Preferencia del consumidor en las formulaciones elaboradas

6.2 Caracterización fisicoquímica

Los resultados del contenido nutrimental del pan mostraron variaciones significativas en la composición proximal.

6.2.1 Humedad

El contenido de humedad determinado para el pan elaborado con 80 % harina de trigo y 20 % harina de centeno, mediante un sistema de fermentación mixta (levadura comercial y masa madre), fue de 29.30 % (± 0.12). Este valor se

encuentra dentro del rango establecido por la normativa mexicana para productos de panificación (15–35 %) (DGN, 1992), lo cual indica que el producto cumple con los parámetros tecnológicos esperados para panes de miga suave (tabla 1).

Tabla 1. Porcentaje de humedad del pan de caja elaborado

% Humedad	Promedio	Desviación estándar
29.31	29.30	0.12
29.17		
29.41		

Desde el punto de vista fisicoquímico, este resultado refleja una adecuada capacidad de retención de agua, la cual está influenciada tanto por la composición de la formulación como por el proceso de fermentación empleado. En particular, la inclusión de harina de centeno desempeña un papel relevante debido a su contenido de pentosanos (arabinosanos), polisacáridos con alta afinidad por el agua que incrementan la absorción hídrica y la viscosidad de la masa (Rosell *et al.*, 2001; Cárdenas, 2025). Como consecuencia, los productos que incorporan centeno tienden a presentar una estructura más densa, pero con mayor capacidad de retención de humedad, lo cual favorece la suavidad de la miga y puede contribuir a una mayor vida útil.

El uso de fermentación mixta influye de manera significativa en este parámetro. La levadura (*Saccharomyces cerevisiae*) contribuye principalmente a la formación de dióxido de carbono, favoreciendo la expansión de la masa y la generación de una estructura porosa que facilita la distribución del agua. Por su parte, la masa madre, a través de la actividad de bacterias ácido lácticas, induce modificaciones en la matriz de polisacáridos y proteínas, incrementando la capacidad de retención de agua y reduciendo la pérdida de humedad durante el horneado (Arendt *et al.*, 2007; De Vuyst & Neysens, 2005).

6.2.2. Cenizas

El contenido de cenizas determinado en el pan elaborado con 80 % harina de trigo y 20 % harina de centeno, mediante un sistema de fermentación mixta (levadura comercial y masa madre), fue de 2.39 % (± 0.05). Este valor representa el residuo inorgánico total tras la incineración de la materia orgánica (tabla 2), el cual está constituido principalmente por minerales como calcio, potasio, sodio y magnesio.

Tabla 2. Porcentaje de cenizas del pan de caja elaborado

% Cenizas	Promedio	Desviación estándar
2.35	2.39	0.05
2.45		
2.37		

Desde el punto de vista composicional, el contenido de cenizas se encuentra directamente relacionado con la proporción de fracciones externas del grano presentes en la harina, donde se concentra la mayor cantidad de minerales. En harinas de trigo refinadas, este valor suele oscilar entre 0.45 % y 1.40 %, mientras que en harinas integrales o en cereales como el centeno, los valores son significativamente mayores debido a su menor grado de refinación y mayor contenido mineral (Castro, 2022; Shewry & Hey, 2015).

El valor obtenido en este estudio (2.39 %) puede atribuirse principalmente a la incorporación de harina de centeno, la cual presenta una mayor concentración de minerales en comparación con la harina de trigo refinada. Este resultado es consistente con investigaciones que señalan que la adición de cereales ricos en fibra y componentes estructurales incrementa el contenido de cenizas en productos de panificación, mejorando su perfil nutricional.

Adicionalmente, el sistema de fermentación mixta influye indirectamente en la funcionalidad de estos minerales. La actividad de bacterias ácido-lácticas presentes en la masa madre favorece la hidrólisis de compuestos antinutricionales como los fitatos, los cuales normalmente limitan la biodisponibilidad de minerales. Como resultado, se incrementa la fracción de minerales potencialmente

absorbibles en el organismo, lo cual representa una ventaja nutricional significativa frente a productos elaborados únicamente con levadura (Poutanen et al., 2009; De Vuyst & Neysens, 2005).

Desde el punto de vista tecnológico, un mayor contenido de cenizas también puede influir en la coloración del pan, generando tonalidades más oscuras tanto en la miga como en la corteza, lo cual es característico de productos con inclusión de cereales no refinados. Asimismo, este parámetro puede relacionarse con modificaciones en la estructura de la masa, ya que los minerales pueden interactuar con proteínas y polisacáridos, afectando la reología del sistema (Cauvain, 2012).

6.2.3. Grasa total

El contenido de grasa determinado en el pan elaborado con 80 % harina de trigo y 20 % harina de centeno, mediante un sistema de fermentación mixta (levadura comercial y masa madre), fue de 11.42 % (± 0.06). Este valor refleja la contribución tanto de las materias primas como de los ingredientes añadidos durante la formulación, tales como aceites o grasas, los cuales desempeñan un papel fundamental en la calidad final del producto; la cual se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Porcentaje de grasa del pan de caja elaborado

% Grasa Total	Promedio	Desviación estándar
11.37	11.42	0.06
11.49		
11.39		

Se ha reportado que las harinas de trigo y centeno presentan contenidos inferiores al 1 %, por lo que la mayor parte de los lípidos presentes en los productos de panificación proviene de ingredientes incorporados durante el proceso de elaboración (Cardoso *et al.*, 2019). En este sentido, el valor obtenido sugiere que

la formulación utilizada incluye una cantidad significativa de grasa añadida, lo cual tiene implicaciones tecnológicas y sensoriales relevantes.

Las grasas cumplen diversas funciones en la panificación, ya que contribuyen a mejorar la textura de la miga al interferir con la retrogradación del almidón, favorecen la retención de gases al estabilizar las burbujas formadas durante la fermentación y ayudan a prolongar la vida útil del producto al reducir la pérdida de humedad. Asimismo, actúan como agentes emulsificantes, facilitando la interacción entre los diferentes componentes de la masa (Cauvain & Young, 2001; Quiroz, 2018).

Por otra parte, el uso de fermentación mixta influye en la funcionalidad de los lípidos dentro de la matriz alimentaria. Durante este proceso, la levadura comercial participa principalmente en la producción de dióxido de carbono, favoreciendo el desarrollo de volumen, mientras que la microbiota presente en la masa madre induce cambios bioquímicos más complejos. El contenido de grasa también se relaciona con la formación de complejos entre lípidos y almidón, específicamente complejos amilosa-lípido, los cuales retrasan la retrogradación del almidón y contribuyen a mantener la suavidad del pan durante su almacenamiento (Hoseney, 2010). Este fenómeno resulta particularmente relevante en productos de panificación, donde la pérdida de frescura es uno de los principales factores que limitan su vida útil.

6.2.4. Proteína

El contenido de proteína determinado en el pan elaborado con 80 % harina de trigo y 20 % harina de centeno, mediante un sistema de fermentación mixta (levadura comercial y masa madre), fue de 5.97 % (± 0.12). Este parámetro es fundamental en la calidad de los productos de panificación, ya que influye directamente en la formación de la estructura de la masa, la retención de gases y las características finales.

Las proteínas del trigo, principalmente las gliadinas y gluteninas, son responsables de la formación del gluten, una red tridimensional que confiere elasticidad y extensibilidad a la masa, permitiendo la retención de dióxido de carbono durante la fermentación (Shewry & Hey, 2015). En términos generales, se ha reportado que un contenido de proteína entre 12 % y 13 % es óptimo para la elaboración de pan con buen volumen, estructura y textura (Velázquez, 2017). Sin embargo, el valor obtenido en este estudio es considerablemente menor, lo cual puede explicarse por la formulación empleada y por los efectos del proceso de fermentación.

La incorporación de harina de centeno influye en el comportamiento proteico del sistema; ya que limita la formación de una estructura viscoelástica fuerte. No obstante, las proteínas del centeno poseen una mayor proporción de fracciones solubles, lo que incrementa su valor biológico y su participación en procesos bioquímicos durante la fermentación (Stępniewska *et al.*, 2026).

El uso de fermentación mixta induce procesos de proteólisis, en los cuales las proteínas son parcialmente degradadas en péptidos y aminoácidos. Este fenómeno, si bien puede reducir el contenido de proteína cuantificable, mejora la digestibilidad del producto y contribuye al desarrollo de compuestos precursores de sabor (De Vuyst & Neysens, 2005; Gobbetti *et al.*, 2014). Por su parte, la levadura comercial favorece la producción de dióxido de carbono, contribuyendo a la expansión de la masa, aunque sin modificar de manera significativa la estructura proteica.

6.2.5 Fibra soluble

El contenido de fibra dietética determinado en el pan elaborado con 80 % harina de trigo y 20 % harina de centeno, mediante un sistema de fermentación mixta (levadura comercial y masa madre), fue de 1.66 % (± 0.12). Este valor puede atribuirse principalmente a la incorporación de harina de centeno en la formulación, ya que este cereal se caracteriza por presentar un mayor contenido de fibra en comparación con el trigo.

El centeno presenta un alto contenido de fibra, el cual puede alcanzar aproximadamente el 20 % de su materia seca, superando a otros cereales como el trigo, cuyos contenidos oscilan entre 10 % y 15 %, dependiendo de factores como la variedad y las condiciones de cultivo (Moya, 2025). En particular, la fibra del centeno está compuesta principalmente por arabinoxilanos (pentosanos), los cuales poseen una elevada capacidad de retención de agua y contribuyen significativamente a la viscosidad de la masa.

La fibra influye en la estructura del producto, ya que puede interferir con la formación de la red de gluten, generando masas más densas y con menor volumen. Sin embargo, también favorece la retención de humedad y la estabilidad de la miga, lo cual puede resultar en una textura más suave y en una mayor vida útil del pan. En este sentido, el valor obtenido en este estudio refleja un equilibrio entre la incorporación de centeno y la funcionalidad tecnológica del sistema.

Por otra parte, el uso de fermentación mixta también incide en el comportamiento de la fibra ya que puede inducir la modificación parcial de los polisacáridos de la pared celular, incrementando su solubilidad y mejorando su funcionalidad dentro de la matriz alimentaria (Poutanen *et al.*, 2009). Diversos estudios han demostrado que el consumo de productos ricos en fibra provenientes de centeno se asocia con un incremento en la sensación de saciedad y con efectos positivos en el control del peso corporal y la reducción de la grasa corporal, en comparación con productos elaborados exclusivamente con trigo refinado (Forsberg *et al.*, 2014). El contenido de fibra obtenido no solo refleja la composición de las harinas utilizadas, sino también la interacción entre los componentes estructurales del centeno y el sistema de fermentación mixto.

6.2.6. Carbohidratos

El contenido de carbohidratos determinado en el pan elaborado con 80 % harina de trigo y 20 % harina de centeno, mediante un sistema de fermentación mixta (levadura comercial y masa madre), fue de 49.27 %, valor calculado por diferencia. Este resultado es consistente con la naturaleza de los productos de panificación,

en los cuales los carbohidratos representan el componente mayoritario debido a la elevada concentración de almidón presente en las harinas de cereales.

Desde el punto de vista estructural, el almidón constituye la principal reserva energética de los granos de cereales, representando aproximadamente entre el 65 % y 70 % del peso de la harina de trigo, dependiendo del grado de extracción y del contenido de humedad (Edel León & Rosell, 2007). Durante el proceso de panificación, este componente desempeña un papel fundamental en la formación de la estructura del producto final.

La levadura (*Saccharomyces cerevisiae*) utiliza azúcares fermentables derivados de la hidrólisis del almidón para producir dióxido de carbono y etanol, lo cual favorece el crecimiento de la masa. Paralelamente, las bacterias ácido lácticas presentes en la masa madre metabolizan estos carbohidratos, generando ácidos orgánicos que contribuyen a la acidificación del sistema y al desarrollo de compuestos aromáticos.

Este proceso tiene implicaciones importantes en la calidad del producto, ya que la fermentación con masa madre puede inducir una modificación en la digestibilidad del almidón, así como una posible reducción del índice glucémico del pan, debido a la interacción entre los ácidos orgánicos y la matriz del almidón. Asimismo, la actividad enzimática (principalmente amilasas) durante la fermentación contribuye a la degradación parcial del almidón en dextrinas y azúcares simples, lo que influye tanto en la textura como en el desarrollo del sabor.

En conjunto, el valor de carbohidratos obtenido no solo refleja la composición de las harinas utilizadas, sino también la interacción entre los procesos fisicoquímicos y bioquímicos que ocurren durante la fermentación y el horneado. La combinación de trigo, centeno y fermentación mixta favorece la formación de una matriz estructural estable y contribuye al desarrollo de características tecnológicas y nutricionales específicas en el producto final.

6.2.7. Actividad de agua y pH

La actividad de agua (a_w) y el pH son parámetros fisicoquímicos fundamentales en la caracterización de productos de panificación, ya que influyen directamente en la estabilidad microbiológica, las reacciones químicas y las propiedades sensoriales del producto final. La actividad de agua (a_w) se define como la fracción de agua libre disponible en el alimento para participar en procesos fisicoquímicos, enzimáticos y microbiológicos, expresándose como un valor adimensional que oscila entre 0 (ausencia total de agua libre) y 1 (agua pura) (Tapia, Alzamora & Chirife, 2020).

En el presente estudio, el pan elaborado con 80 % harina de trigo y 20 % harina de centeno, mediante un sistema de fermentación mixta (levadura comercial y masa madre), presentó un valor promedio de a_w de 0.768, lo cual indica una disponibilidad moderada de agua libre dentro de la matriz alimentaria. Este valor es inferior al reportado comúnmente para panes frescos (0.94–0.97), lo que sugiere una mayor estabilidad microbiológica y una posible extensión de la vida útil del producto.

Este comportamiento puede explicarse por la interacción entre la formulación y el proceso de fermentación. Por un lado, la presencia de harina de centeno, rica en polisacáridos como los arabinosilanos, favorece la retención de agua dentro de la estructura del pan, reduciendo la fracción de agua libre disponible. Por otro lado, la fermentación con masa madre contribuye a la modificación de la matriz del alimento mediante la producción de ácidos orgánicos, lo que puede influir en la distribución del agua y en la actividad de los componentes macromoleculares (Poutanen *et al.*, 2009).

En cuanto al pH, el valor obtenido fue de 5.1, lo cual indica un medio ligeramente ácido, característico de sistemas fermentativos combinados. En procesos de panificación que emplean exclusivamente levadura (*Saccharomyces cerevisiae*), el pH suele mantenerse en valores cercanos a 5.0–5.5, mientras que en sistemas con masa madre puede descender hasta rangos de 3.5–4.5 debido a la

producción de ácido láctico y ácido acético por parte de bacterias ácido-lácticas (De Vuyst & Neysens, 2005).

En conjunto, los valores obtenidos de actividad de agua y pH no solo reflejan las características fisicoquímicas del pan, sino también la interacción entre la formulación (trigo–centeno) y el sistema de fermentación mixta. Esta combinación favorece la obtención de un producto con mayor estabilidad, adecuada calidad sensorial y potencialmente mayor vida útil, evidenciando la importancia de estos parámetros en la caracterización integral de productos de panificación.

6.3 Determinación de color en pan

Entre las distintas formulaciones de pan de caja desarrolladas en el presente estudio, se seleccionó para el análisis la muestra correspondiente a la formulación 80 % harina de trigo – 20 % harina de centeno, por considerarse representativa dentro de las variaciones evaluadas. Con el objetivo de caracterizar el color del producto, se determinaron los parámetros cromáticos mediante el sistema CIELAB (L, a, b*)**, ampliamente utilizado en la industria alimentaria para la medición instrumental del color.

Los resultados obtenidos evidenciaron diferencias marcadas entre ambas fracciones del producto. La miga presentó un valor elevado de luminosidad ($L = 82.593^*$), lo que indica una coloración clara característica de productos panificados con predominio de harina refinada. En contraste, la corteza mostró un valor significativamente menor ($L = 41.616^*$), reflejando una superficie más oscura. En el eje a^* , la corteza presentó un valor positivo elevado ($a = 13.447^*$), indicando una tendencia hacia tonalidades rojizas, mientras que la miga registró un valor ligeramente negativo ($a = -2.458^*$), asociado a tonalidades más neutras o ligeramente verdosas. En cuanto al eje b^* , tanto la miga ($b = 29.219^*$) como la corteza ($b = 32.806^*$) mostraron valores positivos, lo que indica una predominancia de tonalidades amarillentas en ambas fracciones.

La disminución del parámetro L^* en la corteza puede atribuirse principalmente al desarrollo de reacciones de pardeamiento no enzimático durante el horneado, destacando la reacción de Maillard y la caramelización de azúcares. Estos procesos ocurren como resultado de la interacción entre azúcares reductores y aminoácidos a temperaturas elevadas, generando compuestos de alto peso molecular conocidos como melanoidinas, responsables de la coloración marrón característica de la corteza (Purlis, 2010). Asimismo, factores como la oxidación de lípidos y la degradación de compuestos como el ácido ascórbico pueden contribuir al oscurecimiento del producto, particularmente en condiciones de baja actividad de agua.

El incremento del parámetro a^* en la corteza confirma la formación de estos compuestos melanoidínicos, los cuales generan tonalidades rojizo-marrones intensos. Este comportamiento instrumental se encuentra en concordancia con la evidencia visual observada, donde la superficie del pan presenta una coloración heterogénea con zonas de mayor oscurecimiento, especialmente en áreas con presencia de ingredientes adicionales como hojuelas de avena, lo que sugiere variaciones locales en la transferencia de calor y en la concentración de reactivos.

Por su parte, los valores elevados de L^* en la miga indican una menor intensidad de reacciones de pardeamiento, lo cual se explica por las condiciones internas del pan durante el horneado. La temperatura en el interior del producto generalmente no supera los 100 °C debido a la presencia de agua, lo que favorece procesos como la gelatinización del almidón y la desnaturalización de proteínas, en lugar de reacciones extensivas de pardeamiento (Purlis & Salvadori, 2007). Esto da lugar a una miga con tonalidad crema clara y una estructura alveolar homogénea.

En conjunto, la diferencia cromática entre la miga y la corteza evidencia un contraste visual claramente perceptible, el cual es altamente deseable en productos de panificación. Este contraste es comúnmente asociado por los consumidores con una adecuada calidad de horneado, donde una corteza dorada y una miga clara indican un equilibrio adecuado entre los procesos térmicos y las propiedades de la masa. Asimismo, el desarrollo del color en la corteza no solo

tiene implicaciones sensoriales, sino también nutricionales, ya que las reacciones de Maillard pueden generar tanto compuestos con actividad antioxidante como sustancias potencialmente indeseables, como la acrilamida o el hidroximetilfurfural, dependiendo de las condiciones del proceso.

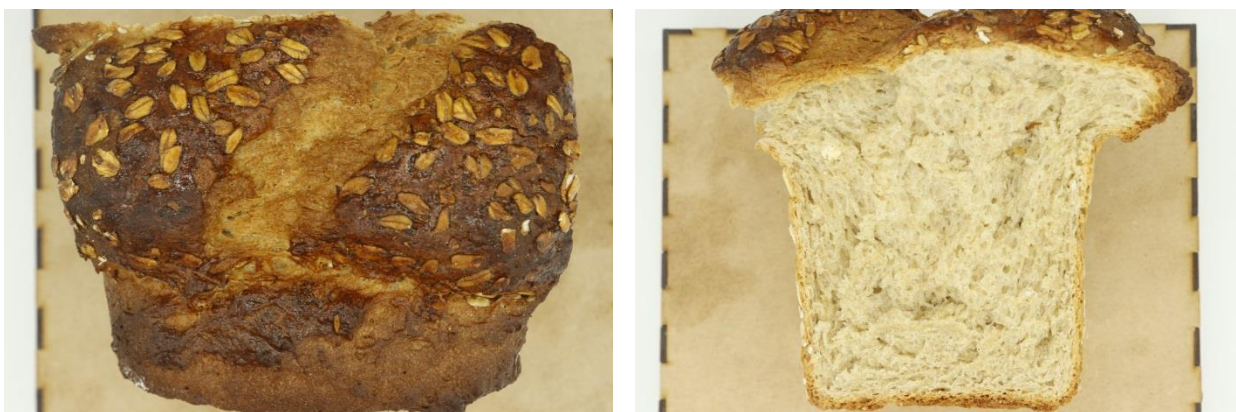


Figura 9. Determinación de color en pan de caja (80% harina de trigo y 20 % harina de centeno)

Finalmente, los resultados obtenidos confirman que el color del pan es el resultado de la interacción entre la formulación (trigo–centeno), las condiciones de horneado y los fenómenos fisicoquímicos asociados, constituyendo un atributo clave en la evaluación integral de la calidad del producto.

7. Conclusiones

La formulación con mayor proporción de harina de trigo presentaron una mayor aceptación en atributos como apariencia, aroma, textura y sabor, así como en la calidad global y preferencia del consumidor.

El producto mostró un contenido de humedad dentro de los rangos establecidos, lo que indica una adecuada retención de agua y una miga suave. El contenido de cenizas evidenció un incremento en la concentración de minerales, que se debe a la incorporación de harina de centeno. Por su parte, el contenido de grasa mostró la influencia de los ingredientes, contribuyendo a la textura y vida útil del producto. El contenido de proteína, aunque menor al reportado para harinas de trigo panificables, mostró que la calidad estructural del pan se mantuvo debido a la interacción con otros componentes de la matriz.

El contenido de fibra dietética se vio favorecido por la adición de harina de centeno, mientras que los carbohidratos, constituyeron el principal componente estructural del producto. Asimismo, los valores de actividad de agua y pH indicaron una adecuada estabilidad microbiológica, influenciada por la fermentación mixta y la presencia de compuestos ácidos generados durante el proceso.

En cuanto a la determinación de color, se observaron diferencias significativas entre la miga y la corteza, asociadas a los fenómenos de pardeamiento no enzimático durante el horneado, lo cual contribuye a la aceptación visual del producto.

La fermentación mixta es una estrategia para mejorar las propiedades de panes elaborados con mezclas de harinas, permitiendo equilibrar la calidad sensorial y nutricional.

8. Referencias

- J. A., D., & Hosney, R. (2010). Principles of Cereal Science and Technology: Third Edition. *AACC International*.
- M. S. Hussein, A., Abd El-Aal, H., M. Morsy, N., & M. Hassona, M. (2024). Chemical, rheological, and sensorial properties of Baladi bread supplemented with buckwheat flour produced in Egypt. *Sci Rep*, 14.
- N. Birch, A., Petersen, M., & Solvej Hansen, Å. (2014). The aroma profile of wheat bread crumb influenced by yeast concentration and fermentation temperature. *LWT - Food Sci Technol.*, 397-402.
- Ramos da Mota, S., Tannus Rebouças, L., de Jesus Pinto, E., Mendes da Silva, I., & Vidal Júnior, P. (2025). Sensory analysis of breads with different fermentation methods. *Res Soc Dev.*, 14.
- VC Cardoso , R., Fernandes, Â., A. Heleno, S., Rodrigues, P., M. González-Paramás, A., Barros , L., y otros. (2019). Caracterización fisicoquímica y microbiología de harinas de trigo y centeno. *Food Chemistry*, 123-129.
- (DGN)., D. G. (1992). *NMX-F-516-1992. Alimentos. Productos de panificación. Clasificaciones y definiciones*. Mexico: Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.
- Aksoy , A., & Suleymanzade , C. (2025). Sensory evaluation of sourdough breads produced with the addition of several flours. *Turk J Agric Food Sci Technol.*, 1187–1195.
- Cárdenas, D. C. (2025). *EVALUACIÓN DE LA ACEPTABILIDAD Y CONTENIDO PROTEICO DEL PAN DE CENTENO (Secale cereale) COMPLEMENTADO CON HARINA DE ANCHOVETA (Engraulis ringens)*. Universidad Nacional Federico Villareal.

- Castro, A. C. (2022). *Cereales de invierno*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP).
- Cauvain, S. P. (2012). Breadmaking. *Cambridge: Woodhead Publishing*.
- Cauvain, S., & Young, L. (2001). *Cereals processing technology*. England: Woodhead Publishing Limited.
- Chen, L., & Opara, U. L. (2013). Métodos para la medición de la textura en alimentos frescos y procesados. *Food Research International*, 823-835.
- Daneshniya, M., Hossein Maleki, M., Abdolmaleki, F., & Latifi, Z. (2025). Nutritional, Rheological, and Sensory Assessment of Functional Toast Bread Fortified With Rye Flour and Basil Seed Gum Powder. *Int J Food Sci*.
- Daneshniya, M., Maleki, M., Abdolmaleki, F., & Latifi, Z. (2025). Nutritional, Rheological, and Sensory Assessment of Functional Toast Bread Fortified With Rye Flour and Basil Seed Gum Powder. *International Journal of Food Science*.
- Edel León, A., & Rosell, C. (2007). *DE TALES HARINAS, TALES PANES: granos, harinas y productos de panificación en Iberoamérica*. Argentina.
- El Hosry, L., Elias, V., Chamoun, V., Halawi, M., Cayot, P., Nehme, A., y otros. (2025). Maillard Reaction: Mechanism, Influencing Parameters, Advantages, Disadvantages, and Food Industrial Applications. *FOODS*, 14.
- Fernando, C. S. (2020). *Alteraciones no microbianas en alimentos: El pardeamiento y el enranciamiento*. España: RUINET.
- Forsberg, T., Åman, P., & Landberg, R. (2014). , donde se ha demostrado que los alimentos a base de centeno integral y ricos en fibra aumentan la sensación de saciedad y pueden contribuir a la pérdida de peso y reducción de la grasa corporal en comparación con el consumo de trigo refinado. *Nutr J*.
- Guiné, R. P. (2022). Textural Properties of Bakery Products: A Review of Instrumental and Sensory Evaluation Studies. *Appl Sci*, 8628.

- Meilgaard, M., Civille, G., & Carr, B. (2016). *Sensory evaluation techniques*. Boca Raton: CRC Press.
- Molina, A. L. (2004). *DETERMINACIÓN DE PROTEÍNAS, CENIZAS, SÓLIDOS TOTALES, HUMEDAD, GRADO DE IMBIBICIÓN, PH Y CLORURO DE SODIO DE DIFERENTES MARCAS DE PAN BLANCO TIPO SANDWICH DE CONSUMO MASIVO EN GUATEMALA*. Guatemala: UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA.
- Mondal, A., & Datta, A. (2008). Bread baking. *Journal of Food Engineering*, 465-474.
- Moya, C. B. (2025). “EFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE MORINGA OLEIFERA SOBRE LA CALIDAD DE PAN INTEGRAL DE TRIGO Y CENTENO”. RediUMH.
- Muñoz-Bernal, Ó., Coria Oliveros, A., & Alvarez Parrilla, E. (2024). Functional and sensory evaluation of bread made from wheat flour fortified with wine byproducts. *Food Prod Process and Nutr*, 94.
- Muñoz-Bernal, Ó., Coria-Oliveros, A., Subiria-Cueto, C., De La Rosa, L., Reyes-Vega, M., García, J., y otros. (2024). Functional and sensory evaluation of bread made from wheat flour fortified with wine by products. *Food Prod Process and Nutr*, 94.
- Olmo, M., Krishnan, P., Araña, M., Oneca, M., Díaz, J., Barajas, M., y otros. (2023). Development, Analysis, and Sensory Evaluation of Improved Bread Fortified with a Plant-Based Fermented Food Product. *Foods*, 15.
- Önce, B., & Özer, M. (2025). Elucidation of technological, functional, sensory properties and aromaprofiles of gluten-free breads enriched with lentil flour. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 1969-1980.
- Öncel, B. (2025). Elucidation of technological, functional, sensory properties and aroma profiles of gluten-free breads enriched with lentil flour. *Food Measure*, 19.

- Öncel, B., & Özer, M. (2025). Elucidation of technological, functional, sensory properties and aroma profiles of gluten-free breads enriched with lentil flour. *Journal of Food Measurement and Characterization*.
- Onyango, C., Mutungi, C., Unbehend, G., & G. Lindhauer, M. (2011). Modification of gluten-free sorghum batter and bread using maize, potato, cassava or rice starch. *LWT - Food Science and Technology*, 681-686.
- Pankaj, B., Umezuruike, L., & Fahad, A.-J.-S. (2013). *Colour Measurement and Analysis in Fresh and Processed Foods*. Food Bioprocess Technology.
- Poinot, P., Arvisenet, G., Grua, J., & Colas, D. (2008). Influence of formulation and process on the aromatic profile and physical characteristics of bread. *Journal of Cereal Science*, 686-697.
- Purlis, E. (2010). Browning development in bakery products. *Journal of Food Engineering*, 239-249.
- Purlis, E., & Salvadori, V. (2007). Bread browning kinetics during baking. *Journal of Food Engineering*, 1107-1115.
- Qi, Y., Wang, W., Yang, T., Ding, W., & Xu, B. (2025). Reacción de Maillard en el procesamiento de productos de harina: mecanismo, impacto en la calidad y estrategias de mitigación de productos nocivos. *Foods*, 14.
- Quinteiro Rodrigues, S., G. Dias, L., & Costa Teixeira, A. (2024). Emerging methods for the evaluation of sensory quality of food: Technology at service. *Curr Food Sci Technol Rep.*, 77-90.
- Quiroz, I. (2018). *Pan Artesanal en casa*. Mexico: Larousse.
- R. Shewry, P., & J. Hey, S. (2015). *La contribución del trigo a la dieta y la salud humana*. Food and Energy Security.
- Ren, A., Zhang, Y., Bian, Y., Liu, Y.-j., Zhang, Y.-x., Ren, C.-j., y otros. (2024). Pirazinas en muestras de alimentos: Actualización reciente sobre su

presencia, formación, muestreo, pretratamiento y métodos de análisis. *Food Chemistry*.

S. Tapia, M., M. Alzamora, S., & Chirife, J. (2020). Efectos de la actividad del agua (a_w) sobre la estabilidad microbiana como obstáculo en la conservación de alimentos. *Actividad del agua en los alimentos: fundamentos y aplicaciones, segunda edición*.

Stępniewska, S., Cacak-Pietrzak, G., Fraś, A., Wiśniewska, M., Sujka, K., Grabarczyk, J., y otros. (2026). Composición química y calidad de panificación de la harina de centeno de grano de producción orgánica. *Alimentos*, 15.

T. Lawless, H., & Heymann, H. (2010). *Sensory evaluation of food: Principles and practices*. New York: Springer.

Torres, D. I. (2014). MANUAL DE ASEGURAMIENTO DE CALIDAD DE UN PAN BLANCO DE CAJA A TRAVÉS DEL CUMPLIMIENTO A CONDICIONES DE OPERACIÓN. *UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO*.

VELÁZQUEZ, M. J. (2017). *ELABORACIÓN DE PAN DE CAJA A PARTIR DE MEZCLAS DE*. Mexico: UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO.

Venturi, F., Sanmartin, C., Taglieri, I., & Nari, A. (2016). Effect of the baking process on artisanal sourdough bread-making: A technological and sensory evaluation. *AGROCHIMICA*, 222-234.

Wang, H.-Y., Qian, H., & Yao, W.-R. (2022). Melanoidinas producidas por la reacción de Maillard: Estructura y actividad biológica. *Food Chemistry*, 573-584.