



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS ALIMENTARIAS ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

TESIS

Influencia de harina de gandul (*Cajanus cajan*), arroz (*Oryza sativa*) y almidón de papa (*Solanum tuberosum*) sobre las propiedades físicas del pan molde y sus mezclas

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERA DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

Autor:

Bach. Chicana Rosas Alva Fiorela Nadeshda

<https://orcid.org/0009-0004-6125-5143>

Asesor:

Mtro. Ing. Campos Salazar Carmen Annabella

<https://orcid.org/0000-0002-4238-2858>

Lambayeque, Perú

2025



**UNIVERSIDAD NACIONAL
PEDRO RUIZ GALLO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
E INDUSTRIAS ALIMENTARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE INDUSTRIAS
ALIMENTARIAS**

TESIS

Influencia de harina de gandul (*Cajanus cajan*), arroz (*Oryza sativa*) y almidón de papa (*Solanum tuberosum*) sobre las propiedades físicas del pan molde y sus mezclas

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERA DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

APROBADO POR EL SIGUIENTE JURADO:

Dr. Jaime Lucho Cieza Sánchez

Presidente

M. Sc. Juan Francisco Robles Ruiz

Secretario

M. Sc. Manuel Antonio Díaz Paredes

Vocal

Mtro. Carmen Annabella Campos Salazar

Asesora



269



ACTA DE SUSTENTACIÓN - 2026

Siendo las 9:30 am del lunes 25 de mayo del 2026, se reunieron en la sala de sustentación de la Facultad de Ingeniería Química e Industrias Alimentarias los miembros del jurado evaluador de la Tesis Titulada: **Influencia de harina de gandul (*Cajanus cajan*), arroz (*Oryza sativa*) y almidón de papa (*Solanum tuberosum*) sobre las propiedades físicas del pan molde y sus mezclas;** designados con Res. N°231-2024-D-FIQIA de fecha 17 de mayo del 2024 y aprobada con Res. N°127-2025-D-FIQIA de fecha 23 de abril del 2025, con la finalidad de Evaluar y Calificar la sustentación de la tesis antes mencionada, conformados por los siguientes docentes:

- **Presidente:** Dr. Jaime Lucho Cieza Sánchez
- **Secretario:** M.Sc Juan Francisco Robles Ruiz
- **Vocal:** M.Sc. Manuel Antonio Diaz Paredes

La tesis fue asesorada por el Mtro. Carmen Annabella Campos Salazar, nombrada con Res. N°176-2024-D-FIQIA de fecha 19 de abril del 2024. El acto de sustentación es autorizado con Res. N°163-2026-D-FIQIA de fecha 19 de mayo del 2026.

La Tesis fue presentada y sustentada por la Bachiller: **ALVA FIORELA NADESHDA CHICANA ROSAS; de la Escuela Profesional de Ingeniería de Industrias Alimentarias** y tuvo una duración de 60 minutos.

Después de la sustentación, y absueltas las preguntas y observaciones de los miembros del jurado; se procedió a la calificación respectiva, otorgándole el calificativo de 17 (diecisiete) en la escala vigesimal, mención BUENO.

Por lo que queda APTA para obtener el Título Profesional de **INGENIERA DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS** de acuerdo con la Ley Universitaria 30220 y la normatividad vigente de la Facultad de Ingeniería Química e Industrias Alimentarias y la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Siendo las 10:30 se dio por concluido el presente acto académico, dándose conformidad al presente acto, con la firma de los miembros del jurado.

Firmas

.....
Presidente
Dr. Jaime Lucho Cieza Sánchez

.....
Vocal
M.Sc. Manuel Antonio Diaz Paredes

.....
Secretario
M.Sc Juan Francisco Robles Ruiz

.....
Asesor
Mtro. Carmen Annabella Campos Salazar

CONSTANCIA DE VERIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD

Yo Carmen Annabella Campos Salazar, usuaria revisora de la Tesis titulada: Influencia de harina de gandul (*Cajanus cajan*), arroz (*Oryza sativa*) y almidón de papa (*Solanum tuberosum*) sobre las propiedades físicas del pan molde y sus mezclas

Cuya autora es:

Bach. Chicana Rosas Alva Fiorela Nadeshda

Identificada con documento de identidad 72660094, declaro que la evaluación realizada por el programa informático, arrojó un porcentaje de similitud de 12 (doce) %, verificable en el resumen del reporte automatizado de similitudes que se acompaña.

La suscrita analizó el reporte y concluye, que cada una de las coincidencias detectadas dentro del porcentaje de similitud permitido, no constituyen plagio y que el documento cumple con la integridad científica, y con las normas para el uso de citas y referencias establecidas en los protocolos respectivos,

Se cumple con adjuntar el Recibo Digital a efectos de la trazabilidad respectiva del proceso.

Lambayeque, 25 de setiembre del 2025

.....

Asesora

Carmen Annabella Campos Salazar

06753227

Se Adjunta:

Resumen de Reporte automatizado de similitudes

Recibo digital

Informe Final

INFORME DE ORIGINALIDAD

12%

INDICE DE SIMILITUD

12%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

3%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	purl.org Fuente de Internet	2%
2	repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	1%
3	repositorio.unsa.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
5	repositorio.unaj.edu.pe Fuente de Internet	1%
6	Submitted to Universidad Politécnica de Madrid Trabajo del estudiante	1%
7	sedici.unlp.edu.ar Fuente de Internet	<1%
8	repositorio.uns.edu.pe Fuente de Internet	<1%
9	repositorio.unprg.edu.pe Fuente de Internet	<1%
10	uvadoc.uva.es Fuente de Internet	<1%
11	dgsa.uaeh.edu.mx:8080 Fuente de Internet	<1%
12	repositorio.uss.edu.pe Fuente de Internet	<1%
13	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet	<1%
14	es.scribd.com Fuente de Internet	<1%
15	zagan.unizar.es	


 Mtro. Ing. Carmen Annabella Campos Salazar
 ASESOR
 DNI: 06753227

	Fuente de Internet	<1 %
16	revistas.unitru.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
17	doi.org Fuente de Internet	<1 %
18	alicia.concytec.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
19	Mónica Hernández-Rodríguez, L. Fernando Bückle-Ramirez. "Preference, tolerance and resistance responses of <i>Poecilia sphenops</i> Valenciennes, 1846 (Pisces: Poeciliidae) to thermal fluctuations", Latin American Journal of Aquatic Research, 2011 Publicación	<1 %
20	repositorio.uncp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
21	repositorio.unprg.edu.pe:8080 Fuente de Internet	<1 %
22	revistabiociencias.uan.edu.mx Fuente de Internet	<1 %
23	bdigital.uncu.edu.ar Fuente de Internet	<1 %
24	repositorio.unesum.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
25	repositorio.utm.edu.ec:3000 Fuente de Internet	<1 %
26	Hongwei Cao, Xiaoxue Wang, Weibin Wu, Nabil Grimi, Jun Lu, Xiao Guan. "Modulation of Textural Properties in Microwave Treated Gluten-Free Quinoa Sponge Cake by Alkaline Amino Acids", Food Hydrocolloids, 2024 Publicación	<1 %
27	Submitted to Universidad Nacional Agraria La Molina Trabajo del estudiante	<1 %
28	hl.ageditor.ar Fuente de Internet	<1 %

Mtro. Ing. Carmen Annabella Campos Salazar
ASESOR
DNI: 06753227

29	Eva Orizano-Ponce, Gisela Santillan, Ruth Esther Chamorro-Gómez, Juan Edson Villanueva-Tiburcio et al. "Effect of Ultrasound on the Physical, Morphological, and Mechanical Properties of Bioplastic Obtained from Lucuma Seed Starch (Pouteria lucuma)", Applied Food Research, 2025 Publicación	<1 %
30	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	<1 %
31	repositorio.upec.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
32	orcid.org Fuente de Internet	<1 %
33	tesis.usat.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
34	www.recetasdepan.net Fuente de Internet	<1 %
35	bibliotecadigital.exactas.uba.ar Fuente de Internet	<1 %
36	pdffox.com Fuente de Internet	<1 %
37	Zuñiga Sanchez, Higinio Alberto. "Bioadsorción de iones Cromo (VI) y Cadmio (II) de soluciones acuosas con gel tanico de corteza de queñua (Polylepis spp)", Universidad Nacional del Altiplano de Puno (Peru) Publicación	<1 %
38	Rui Tang, Ting Yu, Zi Li, Junru Wu, Xiaoming Zheng, Leiqing Pan, Yang Chen, Kun Duan, Hui Dong, Weijie Lan. "Infrared spectroscopy combined with deep learning to describe the textural properties of cooked rice from raw materials: revealing spectral variations and internal correlations during processing", Food Control, 2026 Publicación	<1 %

Mtro. Ing. Carmen Annabella Campos Salazar
ASESOR
DNI: 06753227

39	Soto Jover, Sonia. "Optimizaci3n de la formulaci3n y elaboraci3n de masas para la producci3n industrial de pastas y croquetas sin gluten.", Proquest, 2016. Publicaci3n	<1 %
40	dspace.espoche.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
41	dspace.unitru.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
42	worldwidescience.org Fuente de Internet	<1 %
43	Luciana C. Gonz3lez, Cristina I. 3lvarez Barreto, Marcela P. Tolaba. "Effect of different hydrocolloids on the quality and aging of gluten-free bread based on pre-hydrated rice grains", Food Bioscience, 2025 Publicaci3n	<1 %
44	Submitted to Universidad Aut3noma Metropolitana-Xochimilco Trabajo del estudiante	<1 %
45	Yiming Wang, Ning Tang, Dong-Hui Geng, Ebenezer Asiamah, Yongqiang Cheng. "Exploring the influence of rice proteins on the gel and digestive properties of rice noodles: based on the interaction with starch", International Journal of Biological Macromolecules, 2025 Publicaci3n	<1 %
46	revistas.unal.edu.co Fuente de Internet	<1 %
47	root.cern Fuente de Internet	<1 %
48	Submitted to ucb Trabajo del estudiante	<1 %

Mtro. Ing. Carmen Annabella Campos Salazar
ASESOR
DNI: 06753227



Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Fiorela Nadeshda Chicana Rosas Alva
Título del ejercicio: Quick Submit
Título de la entrega: Informe Final
Nombre del archivo: Informe_Final_de_tesis_Fiorela_Chicana_Rosas_Alva.docx
Tamaño del archivo: 11.62M
Total páginas: 99
Total de palabras: 26,255
Total de caracteres: 137,934
Fecha de entrega: 25-sept-2025 08:35a. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 2761669263


Mtro. Ing. Carmen Annabella
Campos Salazar
ASESOR
DNI: 06753227

	UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS ALIMENTARIAS ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS	
TESIS Influencia de harina de gandul (<i>Cajanus cajan</i>), arroz (<i>Oryza sativa</i>) y almidón de papa (<i>Solanum tuberosum</i>) sobre las propiedades físicas del pan molde y sus mezclas		
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERA DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS		
Autor: Bach. Chicana Rosas Alva Fiorela Nadeshda https://orcid.org/0009-0004-6125-5143		
Asesor: Mtro. Ing. Campos Salazar Carmen Annabella https://orcid.org/0000-0002-4238-2858		
Lambayeque, Perú 2025		

DEDICATORIA

*A mi mamá Anita Rosas Alva Trigos, por ser mi motor y recordarme siempre
que los sueños se alcanzan con perseverancia.*

*A mi papá Luis Enrique Chicana Vélez, por ser mi respaldo incondicional,
incluso en los momentos más inciertos.*

*A mis hermanas Edith Chicana Rosas Alva y Judith Smildzinia Chicana Rosas
Alva, por su cariño y compañía que llenaron de luz este camino.*

*A mi enamorado Emerson Franklin Villalobos Vigil, por su paciencia infinita y
por recordarme, una y otra vez, que todo esfuerzo vale la pena.*

*Este trabajo es también de ustedes, porque en cada paso sentí el respaldo y amor
que me dieron para llegar hasta aquí.*

AGRADECIMIENTO

A mi asesora, Mtro. Ing. Carmen Annabella Campos Salazar, quien durante todo este proceso fue mucho más que una guía académica; su compromiso inquebrantable y apoyo constante fueron mi mayor inspiración; su interés genuino y dedicación me brindaron la fortaleza necesaria para avanzar y por ello le estaré siempre agradecida.

Al Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva (INDES-CES), por facilitar el acceso a sus laboratorios y equipos, los cuales fueron fundamentales para la ejecución de esta investigación, así como también a los encargados de laboratorio, quienes con su experiencia y paciencia me brindaron su sabiduría y apoyo.

A mis seres queridos, quienes me brindaron apoyo constante y ánimo durante todo este proceso, acompañándome en cada paso y ofreciéndome respaldo y ayuda cuando más lo necesité.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO	v
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
I. INTRODUCCIÓN.....	16
II. DISEÑO TEÓRICO	20
2.1. Antecedentes.....	20
2.2. Bases teóricas.....	21
2.2.1. Pan de molde.....	21
2.2.1.1. Formulaciones pan de molde libre de gluten	21
2.2.2. Pan sin gluten.....	23
2.2.2.1. Limitaciones en la elaboración de pan sin gluten	23
2.2.2.2. Estrategias para mejorar el pan sin gluten	23
2.2.3. Harina de gandul (<i>Cajanus cajan</i>)	24
2.2.3.1. Funcionalidad de la harina de gandul	25
2.2.4. Harina de arroz (<i>Oryza sativa L.</i>)	25
2.2.4.1. Funcionalidad de la harina de arroz	26
2.2.5. Almidón de papa (<i>Solanum tuberosum</i>)	26
2.2.5.1. Funcionalidad del almidón de papa	27
2.2.6. Reología de mezclas sin gluten.....	27
2.2.6.1. Parámetros de viscosidad de empaste	27
2.2.6.2. Equipos que determinan la viscosidad de empaste	28
2.2.7. Textura instrumental del pan sin gluten.....	28
2.2.7.1. Parámetros de textura instrumental.....	29

2.2.8. Color instrumental en el pan sin gluten	30
2.2.8.1. Parámetros del color instrumental	30
2.2.9. Diseño de mezclas.....	30
2.2.9.1. Tipos de modelos en el diseño de mezclas	30
2.2.9.2. Diseño de mezcla con vértices extremos	31
2.3. Operacionalización o categorización de variables	31
2.3.1. Definición conceptual	31
2.3.2. Definición operativa.....	32
III. DISEÑO METODOLOGICO	34
3.1. Tipo de investigación	34
3.2. Diseño de contrastación de hipótesis	34
3.3. Población y muestra.....	35
3.3.1. Población.....	35
3.3.2. Muestra	36
3.4. Técnicas, instrumentos de recolección de datos	36
3.4.1. Técnicas e instrumentos	36
3.4.2. Materia prima.....	36
3.4.3. Insumos	36
3.7.4. Equipos, materiales	37
3.7.4.1. Equipos	37
3.7.4.2. Materiales.....	37
3.7.5. Métodos de análisis.....	38
3.7.5.1. Metodología reológica de evaluación de la viscosidad de empaste de las mezclas.....	38
3.7.5.2. Metodología de propiedades texturales del pan molde.....	38

3.7.5.3. Metodología de color instrumental del pan molde corteza y miga	39
3.7.6. Procesamiento y análisis de datos.....	39
3.7.7. Metodología experimental	40
3.5. Aspectos éticos de la investigación.....	43
IV. RESULTADOS	44
4.1. Resultados de la propiedad reológica de viscosidad de empaste de las mezclas ...	44
4.2. Resultados de la textura instrumental del pan molde	48
4.3. Resultados de color instrumental del pan molde	51
4.3.1. Resultados del color instrumental de la corteza del pan molde	51
4.3.2. Resultados del color instrumental de la miga del pan molde.....	54
V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	57
5.1. Discusión de la propiedad reológica de viscosidad de empaste de las mezclas	57
5.2. Discusión de la textura instrumental del pan molde.....	61
5.3. Discusión de color instrumental del pan molde	65
5.3.1. Discusión del color instrumental de la corteza del pan molde.....	65
5.3.2. Discusión del color instrumental de la miga del pan molde	69
VI. CONCLUSIONES.....	74
VII. RECOMENDACIONES	75
VIII. REFERENCIAS.....	76
IX. ANEXOS.....	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Diversas formulaciones para elaboración de pan molde libre de gluten	22
Tabla 2	Composición fisicoquímica y funcional de la harina de gandul	25
Tabla 3	Composición de harina de arroz / 100 g de sustancia	26
Tabla 4	Composición y estructura del almidón de papa y otros almidones.....	27
Tabla 5	Color según los parámetros CIELAB	30
Tabla 6	Operacionalización de variables independientes y dependientes	32
Tabla 7	Proporciones de harina de gandul, arroz y almidón de papa empleadas en cada tratamiento	34
Tabla 8	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	36
Tabla 9	Ingredientes en la elaboración del pan molde sin gluten	40
Tabla 10	Resultados de las propiedades reológicas de viscosidad de empaste de las mezclas	44
Tabla 11	Análisis de varianza de las viscosidades de mezclas de harina de gandul, arroz y almidón de papa	45
Tabla 12	Ecuaciones obtenidas de las viscosidades de mezclas de harina de gandul, arroz y almidón de papa	45
Tabla 13	Resultado de las propiedades de textura instrumental del pan de molde.....	48
Tabla 14	Análisis de varianza de la textura instrumental para pan de molde sin gluten de harina de gandul, arroz y almidón de papa	48
Tabla 15	Ecuaciones obtenidas de la textura instrumental para pan de molde sin gluten de harina de gandul, arroz y almidón de papa	49
Tabla 16	Resultados de color visual e instrumental de la corteza del pan de molde	51
Tabla 17	Análisis de varianza del color de la corteza del pan de molde sin gluten de harina de gandul, arroz y almidón de papa	52
Tabla 18	Ecuaciones obtenidas del color de la corteza del pan de molde sin gluten de harina de gandul, arroz y almidón de papa	52
Tabla 19	Resultados de color visual e instrumental de la miga del pan de molde sin gluten de harina de gandul, arroz y almidón de papa	54
Tabla 20	Análisis de varianza del color de la miga para pan de molde sin gluten de harina de gandul, arroz y almidón de papa	55

Tabla 21 Ecuaciones obtenidas del color de la miga del pan de molde sin gluten de harina de gandul, arroz y almidón de papa	55
---	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ilustración de la metodología de la viscosidad de empaste en mezclas de harinas y almidón.....	39
Figura 2 Diagrama de bloques para obtener pan molde sin gluten de harina de gandul, arroz y almidón de papa	42
Figura 3 Curvas de viscosidad de los tratamientos T1–T14 y perfil temperatura en función del tiempo durante el ensayo reológico asociadas a la viscosidad de empaste.....	46
Figura 4 Gráfico de contorno de superficie de respuesta estimada para las viscosidades pico, final y mínima en función de las mezclas de harina de gandul, arroz y almidón de papa	47
Figura 5 Gráfico de contorno de superficie de respuesta estimada para la dureza, masticabilidad y elasticidad del pan de molde según los tratamientos	50
Figura 6 Gráficos de contorno de superficie de respuesta estimada para la corteza L^* , a^* y b^* del pan de molde según los tratamientos	53
Figura 7 Gráficos de contorno de superficie de respuesta estimada para la miga L^* , a^* y b^* del pan de molde según los tratamientos.....	56
Figura 8 Pesado de materia prima.....	86
Figura 9 Mezclado 1 de insumos secos	86
Figura 10 Mezclado 2 de insumos líquidos	86
Figura 11 Mezclado 3 de insumos secos y líquidos.....	86
Figura 12 Fermentado de la masa de pan molde	86
Figura 13 Horneado del pan de molde.....	86
Figura 14 Panes de molde de los 14 tratamientos.....	86
Figura 15 Medición de color en la corteza del pan molde.....	87
Figura 16 Medición de color en la miga del pan molde	87
Figura 17 Muestras para TPA de la miga del pan molde.....	87
Figura 18 Carga de la muestra en el texturómetro	87
Figura 19 Medición de TPA de la miga del pan molde	87
Figura 20 Muestras para analizar la viscosidad de empaste de las mezclas	87
Figura 21 Carga de la muestra en el equipo de reología.....	87

Figura 22	Medición de viscosidad de empaste de las mezclas	87
------------------	--	----

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Insumos empleados en la formulación del pan molde sin gluten	85
Anexo 2 Registro fotográfico del proceso de la elaboración del pan molde sin gluten	86
Anexo 3 Registro fotográfico de las metodologías experimentales	87
Anexo 4 Resultados de las repeticiones de cada tratamiento de la propiedad reológica de viscosidad de empaste de las mezclas	88
Anexo 5 Resultados de las repeticiones de cada tratamiento de las propiedades de textura instrumental del pan molde.....	89
Anexo 6 Resultados de las repeticiones de cada tratamiento del color instrumental de la corteza del pan molde.....	91
Anexo 7 Resultados de las repeticiones de cada tratamiento del color instrumental de la miga del pan molde	92
Anexo 8 Gráficas de las repeticiones de cada tratamiento para la viscosidad de empaste de las mezclas	96
Anexo 9 Gráficas de las repeticiones de cada tratamiento para el análisis de perfil de textura de los panes de molde	97
Anexo 10 Resultados completos del modelo de las variables respuesta	98
Anexo 11 Matriz de consistencia.....	99

RESUMEN

En esta investigación se determinó la influencia de la harina de gandul, arroz y almidón de papa sobre las propiedades físicas del pan molde y sus mezclas; en el cual se empleó un diseño de mezclas con vértices extremos y restricciones de 15 – 35% en harina de gandul, 20 – 30% en harina de arroz y 45 – 55% en almidón de papa, generando 14 tratamientos en el software Statgraphics Centurion XIX. En las mezclas se evaluaron las propiedades reológicas de empaste utilizando un reómetro compacto modular, registrando valores de la viscosidad pico (63,84 - 98,65 cP), viscosidad mínima (1,43 - 6,64 cP) y viscosidad final (11,50 - 71,26 cP); por otro lado, la textura instrumental del pan molde se evaluó en el analizador de textura Brookfield, registrando valores de dureza (3,13 - 6,76 N), masticabilidad (1,08 - 3,72 N), y elasticidad (0,53 - 0,78); y en relación al color instrumental se utilizó el medidor de croma CR-410, registrando valores en el color de la corteza, luminosidad (L^*) (55,00 - 65,73), componente a^* (4,32 - 11,85) y componente b^* (27,71 - 37,28); y por último, en la miga se registró luminosidad (L^*) (59,77 - 64,30), componente a^* de (-0,01 - 2,66) y componente b^* (19,62 - 24,08); concluyendo que existe influencia significativa debido a que la harina de gandul redujo las viscosidades y la luminosidad, pero aumentó la dureza, masticabilidad y elasticidad; la harina de arroz disminuyó la dureza y aumentó la luminosidad y los valores a^* (tonalidades rojizas) y b^* (tonalidades amarillas); y el almidón de papa incrementó la viscosidad y la luminosidad, mientras que su reducción disminuyó el componente b^* (tonalidad menos amarilla).

Palabras claves: *Cajanus cajan*, *Oryza sativa*, *Solanum tuberosum*, propiedad de empaste, textura instrumental, color instrumental

ABSTRACT

In this research, the influence of pigeon pea flour, rice flour, and potato starch on the physical properties of sliced bread and their mixtures was determined; in which an extreme vertices mixture design was employed with restrictions of 15–35% pigeon pea flour, 20–30% rice flour, and 45–55% potato starch, generating 14 treatments using Statgraphics Centurion XIX software. In the mixtures, the pasting rheological properties were evaluated using a modular compact rheometer, recording values of peak viscosity (63,84–98,65 cP), minimum viscosity (1,43–6,64 cP), and final viscosity (11,50–71,26 cP); on the other hand, the instrumental texture of the sliced bread was evaluated using a Brookfield texture analyzer, recording values of hardness (3,13–6,76 N), chewiness (1,08–3,72 N), and springiness (0,53–0,78). In relation to instrumental color, a CR-410 chroma meter was used, recording in the crust values of lightness (L^*) (55,00–65,73), a^* component (4,32–11,85), and b^* component (27,71–37,28); and finally, in the crumb, values of lightness (L^*) (59,77–64,30), a^* component (–0,01–2,66), and b^* component (19,62–24,08) were recorded. It was concluded that there is a significant influence, since pigeon pea flour reduced viscosities and lightness but increased hardness, chewiness, and springiness; rice flour decreased hardness and increased lightness and the a^* (reddish tones) and b^* (yellowish tones) values; and potato starch increased viscosity and lightness, while its reduction decreased the b^* component (less yellowish tone).

Keywords: *Cajanus cajan*, *Oryza sativa*, *Solanum tuberosum*, pasting property, instrumental texture, instrumental color

I. INTRODUCCIÓN

El pan es uno de los alimentos más consumidos a nivel mundial, en 2025 el consumo anual per cápita alcanzó aproximadamente 55 kg y se estima que el mercado de la panadería sin gluten alcanzara un valor de 34 mil millones de dólares para el 2027 y presente una tasa de crecimiento anual compuesta del 9% hasta el 2028 (Eser, 2025); mientras que, en el Perú, el consumo promedio anual de pan fue de 15,1 kg por persona en el 2025 (*El Juguero*, 2025) y se presentó un crecimiento significativo en el mercado de productos sin gluten, reflejado en el incremento de las importaciones y una tasa de crecimiento anual compuesta del 23,87 % entre 2020 y 2024 (Bhandari, 2025).

Tradicionalmente el pan se elabora con harina de trigo, rico en gluten que es clave durante el amasado y horneado, ya que permite la expansión de la masa y contribuye a una textura suave, elástica y aireada; sin embargo, el consumo de gluten representa un riesgo para las personas con enfermedad celíaca, quienes deben seguir una dieta estrictamente libre de esta proteína durante toda su vida (Ferreira et al., 2024); el único tratamiento eficaz y de por vida es el consumo de una alimentación sin gluten, por lo que se debe excluir variedades de cereales como trigo común, espelta, trigo duro, trigo khorasan, emmer, einkorn, triticale, centeno, cebada y en muchos casos avena (Scherf, 2019).

La enfermedad celíaca afecta aproximadamente entre el 0,7 y el 1,4% de la población mundial (Zhang et al., 2025) y en el Perú la prevalencia se estima en el 1,2% de la población (Baldera et al., 2020). Esta condición crónica se desencadena por la intolerancia al gluten y se manifiesta inicialmente con diarrea como el síntoma más común; además, provoca pérdida de peso, anemia, fatiga, flatulencia, atrofia de las vellosidades intestinales, osteoporosis, hinchazón abdominal, alteraciones digestivas y pérdida de folato (Hård af Segerstad et al., 2023; Airaksinen et al., 2021; Narciso et al., 2024; Zhang et al., 2025).

En respuesta a esta necesidad, el mercado de productos sin gluten ha crecido significativamente en los últimos años, destacando el pan sin gluten como uno de los productos más demandados; sin embargo, se enfrentan a una desventaja importante, tales como, una textura menos atractiva en comparación con el pan convencional, lo que limita su aceptación (Ferreira et al., 2024); por ello, uno de los principales desafíos actuales en la industria panadera es desarrollar panes sin gluten que logren mejorar su textura, sin sacrificar las propiedades físicas del producto final (Zhang et al., 2025).

En estudios recientes, han explorado el uso de ingredientes alternativos, como Vidaurre, (2020) quien evaluó la harina de quinua, kiwicha y tarwi, con almidón de maíz y papa, goma tara y xantana en un pan molde sin gluten, en el cual lograron imitar las propiedades texturales y su volumen específico; por otro lado, Mejía & Rodrigo, (2022) desarrollaron un pan molde sin gluten de harina de soja, maíz, con almidón de papa y goma xantana, en el cual observaron buen comportamiento de retención de gas, textura; asimismo, Yan et al., (2024) evaluó el uso de harina de arroz integral, almidón de arroz extruido pregelatinizado en un pan molde sin gluten, el cual, mejoró la elasticidad de la masa, aumentó el volumen específico del pan y redujo la dureza del pan e igualmente, Papagianni et al., (2024) desarrollo un pan molde sin gluten con harina de arroz, almidón de maíz, pure de linaza y torta de sésamo donde reportó mejor dureza, cohesión y elasticidad y menor retrogradación del almidón.

En el mercado existen diversos tipos de panes sin gluten elaborados a partir de harinas de pseudocereales, legumbres, mijo, nueces, semillas e ingredientes a base de frutas y verduras, entre estas, la harina de arroz es una de las más utilizadas debido a sus cualidades hipoalergénicas y su elevado contenido de carbohidratos de fácil digestión de un 80,1%; pero, presenta limitaciones como su bajo contenido proteico de 5,95%, ausencia de fibra dietética de 2,4%, micronutrientes y prolaminas afectando tanto la calidad nutricional como las propiedades tecnológicas del pan sin gluten (Vinod et al., 2023); por ello, se hace necesario combinarla con otros ingredientes que compensen sus carencias y mejoren las características del producto final.

Una alternativa prometedora en este contexto es la incorporación de leguminosas para proporcionar cualidades viscoelásticas deseadas a la masa (Vinod et al., 2023), como el gandul (*Cajanus cajan*) debido a su alto contenido de proteínas que varía de 18 a 25% pudiendo llegar hasta 32%, lo que mejora significativamente el perfil nutricional del pan (Ferrin & Endara, 2022); por lo tanto, la combinación de harina de arroz y de gandul permite la elaboración de un pan sin gluten con mejores características nutricionales, debido al incremento en el contenido proteico, así como una mejora en la textura y el volumen del producto, manteniendo las propiedades hipoalergénicas y de fácil digestión.

Además, para abordar los desafíos en la textura y aceptabilidad general en los panes sin gluten, se emplea el almidón de papa por su propiedad gelificante, espesante, adherente, retenedor de humedad, estabilizante, formador de película, texturizante y por prevenir el envejecimiento del pan (Djeukeu et al., 2024); si bien es cierto que el almidón de papa aporta ciertas características útiles, es necesario añadir un hidrocoloide, ya que por sí solo, no es capaz de reproducir las

funciones del gluten en la masa; uno de estos hidrocoloides es la goma xantana, ya que presenta un comportamiento de fluido no newtoniano, posee alta pseudoplasticidad y no forma geles, lo que le permite mejorar la suspensión de los ingredientes y facilitar la mezcla, el vertido y la aplicación de la masa; además, tiene la capacidad para regular la retención de agua, aumentar la viscosidad de la masa, desarrolla y estabiliza una red sin gluten, mejorando así la textura y la manejabilidad del producto final (Raungrusmee et al., 2020).

Por lo cual, el problema presentado en la investigación pretende responder a la siguiente pregunta: ¿Cómo influye la combinación de harina de gandul, harina de arroz y almidón de papa en diferentes proporciones sobre las propiedades físicas del pan de molde y sus mezclas? En este contexto, se plantea la hipótesis: La combinación de harina de gandul, harina de arroz y almidón de papa en diferentes proporciones influirá positivamente en las propiedades físicas del pan de molde, mejorando la textura, el color de la miga y corteza y la viscosidad de las mezclas, lo que resultará en una mejor calidad del producto final.

Frente a lo expuesto, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo general determinar la influencia de harina de gandul (*Cajanus cajan*), arroz (*Oryza sativa*) y almidón de papa (*Solanum tuberosum*) sobre las propiedades físicas del pan molde y sus mezclas; para ello, se formularon mezclas en diferentes proporciones, siguiendo un diseño de mezclas con vértices extremos, aplicado mediante el software Statgraphics Centurion XIX – versión de evaluación (30 días); además, establecieron restricciones en los componentes principales como la harina de gandul (15–35%), harina de arroz (20–30%) y almidón de papa (45–55%), obteniendo un total de 14 tratamientos.

Posteriormente, los tratamientos obtenidos fueron evaluados de acuerdo con los objetivos específicos planteados; primero determinar la propiedad reológica de empaste de las mezclas de harina de gandul (*Cajanus cajan*), arroz (*Oryza sativa*) y almidón de papa (*Solanum tuberosum*), mediante el análisis de la viscosidad pico, mínima y final, segundo evaluar la textura instrumental del pan molde de harina de gandul (*Cajanus cajan*), arroz (*Oryza sativa*) y almidón de papa (*Solanum tuberosum*), enfocándose en parámetros como elasticidad, dureza y masticabilidad y tercero cuantificar el color instrumental de la corteza y la miga del pan molde de harina de gandul (*Cajanus cajan*), arroz (*Oryza sativa*) y almidón de papa (*Solanum tuberosum*).

Los resultados de este estudio pretenderán contribuir al desarrollo de productos sin gluten con mejores propiedades físicas, mediante el uso de ingredientes no convencionales como la harina de gandul; asimismo, se espera que los hallazgos sirvan de base, para optimizar formulaciones aplicables en la industria panadera, dirigidas especialmente a consumidores con enfermedad celíaca; y desde un enfoque científico, el trabajo también resalta el potencial del diseño de mezclas como herramienta eficaz para la formulación de alimentos funcionales, aportando al avance del conocimiento en ingeniería y tecnología de alimentos.

II. DISEÑO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Vidaurre (2020), en un trabajo de investigación, elaboró pan molde sin gluten a base de harina de tarwi, kiwicha y quinua, almidón de maíz y papa, con 0,5% de goma xantana. Sus resultados arrojaron en las propiedades reológicas de las mezclas, una viscosidad pico desde 52,50 a 365,00 cP; viscosidad mínima desde 52,00 a 352,00 cP; viscosidad final desde 79,50 a 483,00 cP; en cuanto al perfil de textura obtuvieron del pan optimo de quinua y tarwi, una elasticidad de 0,89; dureza de la miga de 2,33 N y masticabilidad de 0,80 N y del pan optimo de kiwicha y tarwi, una elasticidad de 0,96; dureza de la miga de 2,82 N y masticabilidad de 1,63 N.

Alberco (2023), en un trabajo de investigación con harina de arroz, cañihua y almidón de maíz para la obtención de un pan de molde libre de gluten, realizaron 10 tratamientos, con restricciones de 20-30 % de harina de arroz, 30-50% harina de cañihua, 30-40% de almidón de maíz y goma xantana al 1%, en el cual obtuvieron como resultado de las mezclas de las harinas una viscosidad pico desde 677,5 a 1138,5 cP; viscosidad mínima o de caída desde 656,5 a 1029 cP y viscosidad final desde 1129 a 1703,5 cP; también determinaron las propiedades texturales del pan sin gluten con una dureza desde 8,45 a 15,68 N; masticabilidad desde 4,42 a 7,37 N y elasticidad 0,88 a 0,90 mm, en cuanto al análisis de colorimetría de la miga del pan obtuvieron en valor de L* de 49,27 hasta 55,59; en valor obtenido de a* desde 7,19 hasta 8,70 y en valor obtenido de b* desde 15,59 hasta 17,72, seguido de la colorimetría en la corteza del pan en valor de L* desde 34,61 hasta 45,84; en valor obtenido de a* desde 13,95 hasta 18,08 y finalmente en valor obtenido de b* desde 19,07 hasta 27,16.

Huamaní et al. (2025), en un trabajo de investigación realizaron panes de molde a base de 50% de harina de arroz, 50% de almidón de papa con 3-5% de harina de tarwi okara nativo, 3-5% de harina de tarwi okara nativo modificado mediante ultrasonido de alta intensidad y 0,5% de goma xantana, en el cual obtuvieron como resultado de viscosidad pico desde 4000 cP hasta 4160 cP, en viscosidad mínima desde 2440 cP hasta 2640 cP y en viscosidad final desde 3670 hasta 3990 cP; en textura instrumental obtuvieron desde 1,8 hasta 9 N, masticabilidad de 0,9 hasta 1,5N y elasticidad de 0,8 a 1; en cuanto al color de la corteza 53,5 hasta 59,3 en L*, 11,4 hasta 13,2 en a*, 33,9 hasta 34,7 en b* y en el color de la miga en 59,6 hasta 62,6 en L*, 1,24 hasta 1,47 en a* y 8,3 hasta 11,5 en b*.

Mognaschi (2024), en un trabajo de investigación realizaron dos tipos de pan molde, el primero de harina de garbanzo germinados (15%) y el segundo de harina de garbanzo sin germinar (15%), en ambos panes con la incorporación de harina de arroz (29%), harina de sorgo (15%), almidón de maíz (15%), harina de lino dorado (9%), proteína de alverja (6%), semilla de chía (3%), *phyllium* (2,48%) y goma xantana 1,29%, obtuvieron en color en la miga pan de harina garbanzo sin germinar 55,57 en L*, -0,07 en a*, 13,55 en b*; en el pan de garbanzo germinado 53,12 en L*, 0,21 en a* y 13,39 en b* y en cuanto a la corteza en el pan de garbanzo sin germinar 39,52 en L*, 8,91 en a*, 16,08 en b* y en el pan de garbanzo germinado 36,86 en L*, 10,43 en a* y 14,76 en b*.

Guzmán et al. (2023) en un trabajo de investigación realizaron un pan molde con diferentes proporciones de microalga *C. vulgaris* (2 a 6%), harina de trigo sarraceno (11,71%), arroz integral (11,71%), almidón de maíz (11,71%), fécula de papa (3,75%), *Plantago Syllium* (1,41%) y 0,94 % de goma xantana, en sus resultados obtuvieron el color de la miga de 31,00 hasta 35,97 en L*; 2,17 hasta 3,00 en a* y 16,90 hasta 18,43 en b*.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Pan de molde

La Norma Técnica Peruana, *Panadería, pastelería y galletería. Pan de molde. Requisitos. 2ª Edición*. (2021), define al pan de molde como el resultado de hornear una masa fermentada compuesta principalmente por harina de trigo, sal, agua, grasa y/o manteca, pudiendo incluir otros ingredientes y aditivos permitidos según las normativas del Codex Alimentarius, además, se divide en categorías como pan de molde blanco, integral y otras variedades que incorporan ingredientes adicionales como arándanos, frutos secos, kiwicha y diferentes tipos de harina.

2.2.1.1. Formulaciones pan de molde libre de gluten

En la Tabla 1 se presentan ocho formulaciones detalladas para la elaboración de pan molde sin gluten, la primera trata de un pan de harina de algarroba y kiwicha, la segunda combina harina de quinua y tarwi, la tercera emplea harina de kiwicha y tarwi, la cuarta y quinta de harina de arroz y cañihua, la sexta de harina de maíz, la séptima de harina de arroz y trigo sarraceno y finalmente la octava de harina de arroz, garbanzo, sorgo y lino dorado.

Tabla 1*Diversas formulaciones para elaboración de pan molde libre de gluten*

Agua de mesa	Almidón	Harina	Ingredientes para pan molde (%)					Otros	Fuente
			Azúcar rubia/blanca	Aceite de soja/vegetal	Levadura seca instantánea	Sal yodada	Goma xantana		
80	Papa: 45 – 55	Kiwicha: 35 – 45 Algarroba: 5 – 10	17	6	4	2	0,65	Lecitina de soya: 0,5	(García & Mechán, 2022)
101,65	Papa: 50 - 70	Quinoa: 46,3 Tarwi: 11,95	3	6	3	2	0,5	-	(Vidaurre, 2020)
97,02	Papa: 50 - 70	Kiwicha: 40,6 Tarwi: 10	3	6	3	2	0,5	-	(Vidaurre, 2020)
110	Maíz: 30 - 40	Arroz: 20 – 30 Cañihua: 30 – 50	3	6	3	1	1	CMC: 3 Albúmina: 8	(Alberco, 2023)
52,9 - 79	Maíz/yuca: 40 - 80	Arroz: 20 - 60 Cañihua: 20 - 50	10	10	2	1	-	Polvo de hornear: 3 Huevo: 30 Leche: 10 Psyllium: 3	(Cáceres, 2024)
90	Maíz: 75 – 90	Maíz: 10 – 25	12,8	-	-	1,5	0,5 -1	Goma guar: 3 Aislado de proteína de soja: 1 - 4 Grasa: 30	(Quina & Pamo, 2023)
35,13	Maíz: 11,71 Papa: 3,75	Arroz integral: 11,71 Trigo sarraceno: 11,71	-	5,62	-	0,7	0,94	<i>Plantago Syllium</i> 1,41 <i>Pre-Fermento</i> 16,4 <i>Microalga C.vulgaris</i> : 2 - 6	(Guzmán et al., 2023)
49,7	Maíz: 6,24	Arroz: 12,6 Garbanzo: 6,24 Sorgo: 6,24 Lino dorado: 3,74	0,54	6,7	0,41	0,27	0,54	Proteína de arveja: 2,5 Semillas de chía: 1,25 Phyllium: 1,03 Polvo de hornear: 0,54	(Mognaschi, 2024)

Nota. Elaborado a partir de García & Mechán, (2022); Vidaurre, (2020); Alberco, (2023); Cáceres, (2024); Quina & Pamo, (2023); Guzmán et al. (2023); Mognaschi, (2024)

2.2.2. Pan sin gluten

El pan sin gluten se elabora utilizando una variedad de ingredientes, cada uno con propiedades que afectan la textura del producto; los componentes más comunes incluyen polisacáridos, hidrocoloides, acidulantes, emulsionantes, agentes leudantes, conservantes, saborizantes, proteínas y azúcares (Proetto et al., 2024); entre los ingredientes esenciales destacan la harina de arroz (*Oryza sativa*), por su color blanco y propiedades hipoalergénicas (Vinod et al., 2023)

2.2.2.1. Limitaciones en la elaboración de pan sin gluten

El pan sin gluten enfrenta importantes limitaciones tecnológicas debido a la ausencia de gluten, el cual conlleva masas líquidas, que al hornear producen panes con textura desmenuzable, color deficiente, baja altura, textura densa, miga poco aireada y defectos de calidad (Moura et al., 2025; García, 2021); por otro lado, uno de las harinas más utilizadas es la harina de arroz, pero provoca panes con textura débil y un comportamiento viscoelástico poco favorable (Villanueva et al., 2024), por lo que es conveniente adicionar otros compuestos.

Aunque el gluten es la principal causa de los problemas físicos en el pan tradicional, también afecta el tipo y proporción del almidón presente en las harinas, ya que se ha demostrado que la amilopectina presente en el almidón, tiene un papel clave en la reafirmación de la miga durante el almacenamiento, mientras que, la amilosa se relaciona con la dureza inicial del pan (Zhao et al., 2022); por ende, si contiene menos amilopectina y alta amilosa se obtiene panes con una textura dura y miga menos suave y esponjosa.

2.2.2.2. Estrategias para mejorar el pan sin gluten

Una estrategia común para elaborar pan sin gluten es combinar harinas y almidones con propiedades funcionales distintas, buscando que la masa imite, en textura y volumen, a la de un pan con gluten; de este modo, los almidones refinados de papa son utilizados por su capacidad para formar estructuras que imitan las propiedades viscoelásticas del gluten, lo cual mejora la aceptación del pan sin gluten (Nudel et al., 2023).

Además, se emplean hidrocoloides como la goma xantana que reemplaza las funciones del gluten debido a su capacidad para absorber agua, su viscoelasticidad y su termocoagulación (García & Mechán, 2022); asimismo la goma xantana influye en las propiedades de las mezclas y la calidad física de los panes sin gluten, esto se refleja en estudios recientes como el autor

Vidaurre, (2020) que al incorporar 0,5% de goma xantana y almidón de papa exhibieron el mayor volumen específico y una estructura interna de miga favorable, por otro lado García & Mechán. (2022) incorporaron 0,65% de goma xantana a un pan sin gluten con harina de algarroba, kiwicha y almidón de papa, el cual resultó ser la alternativa más efectiva, debido a que esta proporción aumentó el volumen del producto y le otorgó una textura más delicada.

2.2.3. Harina de gandul (*Cajanus cajan*)

La harina de gandul se obtiene mediante la molienda de sus semillas (*Cajanus cajan*), las cuales, antes de ser molidas, se someten a un proceso que incluye su introducción en agua hirviendo durante aproximadamente 20 minutos para destruir las antienzimas presentes, seguido de un secado al sol (Bastidas, 2023), o un tratamiento equivalente; por otro lado, dependiendo del tamaño de las partículas obtenida durante la molienda, la harina puede presentarse como sémola o harina (Ocaña, 2022).

La harina de gandul presenta un notable valor nutricional al ser rica en proteínas, lo que la convierte en una fuente esencial de aminoácidos para una dieta equilibrada; asimismo, contiene fibras que pueden favorecer la salud digestiva, y su bajo contenido de grasas cruda la hace adecuada para incluirse en alimentarios saludables; debido a estas características, esta harina es una alternativa nutritiva y versátil en la cocina que puede enriquecer diversas preparaciones con su perfil nutricional diversificado (Parra, 2023).

La Tabla 2 muestra la composición fisicoquímica y funcional de la harina de gandul (*Cajanus cajan*), destacando su elevado contenido de proteína con una predominancia de ácido glutámico, seguido de fenilalanina, ácido aspártico y lisina, así como un contenido considerable de carbohidratos y fibra total; además, se observa una baja proporción de grasa cruda y cenizas. En cuanto a las propiedades funcionales, presenta una buena capacidad de absorción de agua y aceite, así como una notable capacidad de formación de espuma, características que pueden favorecer su aplicación en diversas formulaciones alimentarias García et al., (2020).

Tabla 2*Composición fisicoquímica y funcional de la harina de gandul*

Composición Fisicoquímica y Funcional	Harina de gandul (g/100g)
pH	6,57
Proteína	17,9
Grasa cruda	1,02
Fibra total	6,9
Carbohidratos	58,76
Humedad	12,1
Cenizas	3,32
Capacidad de absorción de aceite (g/g)	1,81 – 2,04
Capacidad de absorción de agua (g/g)	2,70 – 3,85
Capacidad hinchamiento (%)	5,57 – 8,63
Capacidad emulsificante (%)	37,08 – 44,92
Capacidad espumante (%)	7,33 – 24,67

Nota. Elaborado a partir de García et al. (2020) y García et al. (2012).

2.2.3.1. Funcionalidad de la harina de gandul

La harina de gandul es un ingrediente alternativo capaz de aumentar la digestibilidad de proteínas, reducir la digestibilidad del almidón y la liberación de glucosa ayudando a reducir los niveles de azúcar en la sangre (Sachanarula et al., 2022); además la harina de gandul procesada por remojo, cocción y remojado, posee mayor capacidad de hinchamiento (7,5 – 8,63%) relacionada con el comportamiento de las proteínas, fundamental para la preparación de productos horneados donde se requiere una buena interacción proteína-agua, asimismo, gracias a su capacidad de absorción de aceite (2,04%) adquiere una excelente capacidad de retención de los sabores, suavidad en el producto, aumenta la estabilidad en el almacenamiento y disminuye el desarrollo de la rancidez oxidativa (García et al., 2012).

2.2.4. Harina de arroz (*Oryza sativa* L.)

La Norma Técnica Peruana. *Arroz. Harina extruida de arroz. Requisitos. 1ª Edición, (2019)* define a la harina de arroz como un producto que se obtiene a partir de los granos que proceden de cualquier cultivo de la especie gramínea *Oryza sativa* L. Además, en la Norma Técnica Peruana. *Arroz. Arroz elaborado. Requisitos. 4ª Edición, (2023)* el arroz debe encontrarse en buen estado, sin germinar y exentos de moho, impurezas y otros cereales, se realiza el proceso de molienda en donde se tritura el grano y se obtiene un determinado tamaño de partícula.

La Tabla 3 proporciona detalles sobre la composición de la harina de arroz, incluyendo la cantidad de grasa, grasas saturadas, hidratos de carbono, proteínas, fibra y sodio; además, se

muestra el contenido de amilosa y amilopectina de dos variedades de harina de arroz (Sánchez et al., 2023; Luangsakul & Van, 2025).

Tabla 3

Composición de harina de arroz / 100 g de sustancia

Composición de harina de arroz / 100 g de sustancia	
Grasas	1,4 g
Grasas saturadas	0,4 g
Carbohidratos	80 g
Proteínas	5,95 g
Fibra	2,5 g
Sodio	0,001 g
Amilosa (%)	
*Arroz rojo Manpo	26,8
*Arroz rojo Hommali	29,3
Amilopectina (%)	
*Arroz rojo Manpo	73,2
*Arroz rojo Hommali	70,7

Nota. Elaborado a partir de Sánchez et al. (2023); Luangsakul & Van, (2025)

2.2.4.1. Funcionalidad de la harina de arroz

La harina de arroz es reconocida como una de las harinas de cereales más adecuadas para elaborar productos sin gluten, ya que se debe a sus características distintivas, como su origen natural, propiedades hipoalergénicas, apariencia incolora y su alto contenido de carbohidratos de fácil digestión, junto con niveles muy bajos de proteínas, sodio, grasas y fibra; no obstante, debido a su bajo contenido de prolaminas (2,5 - 3,5%), es necesario combinar la harina de arroz con otros ingredientes funcionales para lograr una textura y comportamiento viscoelástico deseado en productos horneados, especialmente en panificación sin gluten (Villanueva et al., 2024).

2.2.5. Almidón de papa (*Solanum tuberosum*)

El almidón de papa posee una composición y estructura que le confiere propiedades fisicoquímicas únicas, como una elevada viscosidad, baja temperaturas de gelatinización y rápida gelatinización con respecto a otros almidones, por lo que lo hacen atractivo para aplicaciones alimentarias e industriales (Ahmad et al., 2024). En la Tabla 4 se resumen las principales propiedades fisicoquímicas y estructurales del almidón de papa en comparación con otros almidones

Tabla 4*Composición y estructura del almidón de papa y otros almidones*

Propiedad	Valor en almidón de papa	Comparación con otros almidones
Viscosidad pico	Hasta 10 048 cP	1818–9672 cP
Viscosidad de ruptura	Hasta 8360 cP	165–4706 cP
Temperatura de inicio de gelatinización	52,2° - 67,6°C	50,6 °C – 77,7 °C (almidón de yuca, arroz, yuca)
Temperatura de conclusión	67,7 °C – 79,7 °C	75,0 °C – 95,3 °C
Cambio de entalpía	6,5 – 22,2 J/g	4,6 – 13,2 J/g

Nota. Elaborado a partir de Ahmad et al. (2024)**2.2.5.1. Funcionalidad del almidón de papa**

El almidón es el componente principal de la masa sin gluten, ya que desempeña un papel importante en la retención de gases e influyendo en el comportamiento de horneado del pan sin gluten; por lo que el almidón de papa al interactuar con las proteínas para formar complejos influye en las propiedades funcionales y reológicas de la masa, como el empaste y la gelatinización, la digestibilidad de los productos alimenticios y la textura (Waziirroh et al., 2025).

2.2.6. Reología de mezclas sin gluten

La propiedad de empaste es fundamental en la evaluación reológica de harinas y almidones, ya que permite anticipar el comportamiento de la mezcla durante procesos como el batido, horneado y enfriamiento, facilitando la selección de ingredientes en función de la textura, volumen o estabilidad deseada; por ejemplo, una viscosidad pico elevada puede favorecer la retención de aire en la masa, mientras que una baja viscosidad de ruptura indica una mayor resistencia frente a procesos térmicos y mecánicos, y además, la temperatura de empaste tiene implicancias prácticas al afectar directamente los tiempos y costos de procesamiento, información especialmente valiosa en productos sin gluten, donde el almidón y otras harinas deben compensar la ausencia de gluten para construir una estructura estable (Kumari et al., 2024).

2.2.6.1. Parámetros de viscosidad de empaste

Las propiedades de empaste reflejan los cambios en la viscosidad de las suspensiones del almidón durante un ciclo de calentamiento y enfriamiento, estos cambios son fundamentales para comprender el comportamiento de gelatinización y retrogradación, especialmente en

formulaciones sin gluten donde el almidón es el principal responsable de la estructura de la miga; en este tipo de análisis, se reconocen distintas etapas: la inicial (absorción de agua por parte de los gránulos), hinchamiento (aumento lento de la viscosidad), inicio de la gelatinización (ruptura de la estructura cristalina con incremento notable de la viscosidad), viscosidad máxima (PV), viscosidad mínima tras el cizallamiento (TV), y finalmente la viscosidad final (FV), la cual se alcanza tras el enfriamiento y estabilización de la mezcla (Hu et al., 2025).

2.2.6.2. Equipos que determinan la viscosidad de empaste

Las propiedades de empaste del almidón se evalúan comúnmente mediante equipos como el reómetro rotacional, viscoamilógrafo Brabender, analizador rápido de viscosidad (RVA), viscosímetro de almidón Ottawa y viscosímetro Haake, los cuales permiten registrar continuamente los cambios de viscosidad frente a variaciones de temperatura durante un ciclo de calentamiento y enfriamiento (Coaquira, 2023; Jannasch & Wang, 2025).

Recientemente, han desarrollado un método de prueba que acopla una celda de empastado al reómetro, el cual permite obtener de forma secuencial el perfil de empastado; esta configuración emplea geometrías como placas paralelas que permiten evaluar muestras muy pequeñas menor a 1g bajo esfuerzos mínimos, siendo útil cuando se desea preservar la estructura del gel y se dispone de cantidades limitadas de almidón; en cuanto al viscoamilógrafo Brabender es uno de los métodos tradicionales más utilizados, sin embargo, su protocolo estándar requiere un elevado volumen de muestra entre 27–45 g y un tiempo prolongado de análisis de 2 horas aproximadamente y entrega resultados en unidades arbitrarias (UB) (Jannasch & Wang, 2025), asimismo el analizador rápido de viscosidad (RVA), también reconocido como método estándar, proporcionan perfiles de viscosidad similares al Brabender y requieren de 13 minutos, con una cantidad reducida de muestra de 3g lo que lo hace más eficiente (Steele, 2019).

2.2.7. Textura instrumental del pan sin gluten

La textura es uno de los atributos más importantes en la panificación, ya que influye directamente en la aceptación del producto por parte de los consumidores; entre las variables físicas más relevantes se encuentran la dureza, masticabilidad y elasticidad; la dureza está relacionada con la vida útil del pan y la percepción de frescura, ya que los consumidores

generalmente prefieren productos con una textura más suave y menos densa; la masticabilidad, por otro lado, mide la energía necesaria para masticar el pan hasta que esté listo para ser tragado, mientras que la elasticidad refleja la capacidad del pan para recuperar su forma después de una deformación, lo que afecta tanto su textura como su sensación en boca (Qi et al., 2024)

2.2.7.1. Parámetros de textura instrumental

El análisis del perfil de textura (TPA) es una metodología instrumental utilizada en la ciencia y tecnología de los alimentos para evaluar los atributos de textura, y sus parámetros se calculan a través de la curva tiempo-fuerza obtenida durante la aplicación del método TPA este método es respaldado por autores como (Gonçalves et al., 2022).

Además, es una herramienta útil ya que permite evaluar simultáneamente estos parámetros clave, lo que la convierte en una opción eficiente y económica para la evaluación de la calidad de productos alimenticios (Torbica et al., 2022) y se basa en una prueba de doble compresión que simula los dos primeros bocados de un producto alimenticio; a través de esta prueba, se pueden determinar varios parámetros texturales importantes como:

- **Dureza:** Fuerza necesaria para obtener una deformación establecida.
- **Elasticidad:** Relación que mide el grado en que el material deformado vuelve a su condición no deformada después de que se retira la fuerza deformante.
- **Masticabilidad:** Energía necesaria para masticar un producto sólido hasta que esté listo para ser tragado.

Además, el análisis de perfil de textura (TPA) también analiza otros parámetros tales como:

- **Cohesión:** Grado en que la muestra puede deformarse antes de que se rompa.
- **Adhesividad:** Trabajo requerido para separar la sonda de la muestra.
- **Fragilidad/Fracturabilidad:** Valor de fuerza que corresponde a la fractura del producto en la primera compresión.
- **Gomosidad:** Energía necesaria para desintegrar un producto semisólido hasta que esté listo para ser tragado.
- **Resiliencia:** Capacidad de la muestra para recuperar su forma después de la deformación.

2.2.8. Color instrumental en el pan sin gluten

Para determinar el color instrumental de los panes se utilizan los colorímetros, útiles en la evaluación de la apariencia de la miga y la corteza del pan, debido a que, permiten medir de forma objetiva la calidad visual de los productos de panadería, estos valores de color obtenidos mediante los colorímetros pueden influir directamente en la aceptabilidad general del producto (Scanlon & Koksel, 2024).

2.2.8.1. Parámetros del color instrumental

Según Gonçalves et al., (2022), el sistema CIELAB (L^* , a^* , b^*) es el más utilizado en la medición del color de alimentos, ya que proporciona una distribución más uniforme de los colores y una mayor correspondencia con las percepciones visuales humanas; en este sistema, cada parámetro tiene un significado específico, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5

Color según los parámetros CIELAB

Parámetros	Positivo	Negativo
L^*	100 = blanco	0 = negro
a^*	Rojo	Verde
b^*	Amarillo	Azul

Nota. Adaptado de Alberco, (2023)

2.2.9. Diseño de mezclas

El diseño experimental con mezclas se emplea cuando los factores a estudiar corresponden a los ingredientes de una formulación; en este enfoque, las respuestas del sistema dependen de la proporción relativa de cada componente y no de la cantidad total de la mezcla; su finalidad es evaluar cómo influyen las distintas combinaciones de proporciones en las propiedades del producto, permitiendo identificar formulaciones óptimas mediante un análisis estructurado y no mediante métodos empíricos o de ensayo y error (Aedo, 2023).

2.2.9.1. Tipos de modelos en el diseño de mezclas

Aedo, (2023) señala que, en el diseño de mezcla existen 4 tipos como:

- **Vértices extremos:** Se emplea cuando existen restricciones en las proporciones y la región experimental tiene una forma irregular, utilizando los vértices de esta región y puntos entre centroides para el diseño experimental

- **Simplex reticular:** Se basa en una subdivisión sistemática del espacio de mezcla para generar puntos experimentales distribuidos de manera uniforme
- **Simplex con centroide:** Utiliza combinaciones entre los vértices y el centroide de la mezcla, ideal para explorar interacciones
- **Mixto:** Combina factores proporcionales (de mezcla) con factores independientes (de proceso), útil en formulaciones más complejas

2.2.9.2. Diseño de mezcla con vértices extremos

Este tipo de diseño se utiliza cuando se busca definir las proporciones adecuadas de una mezcla compuesta por varios ingredientes; por ejemplo, al preparar panqueques, se desea calcular la cantidad correcta de harina, huevos, aceite, leche y levadura en la mezcla para lograr la mejor textura posible; en este contexto, se puede observar a través de pruebas que una fórmula que no incluya todos los componentes o que tenga una cantidad excesiva de uno solo, como demasiada harina, no alcanzará las características deseadas; por ello, se establecen límites mínimos y máximos para cada ingrediente, permitiendo así obtener un producto final óptimo (Canahuati, 2020).

Estudios recientes como del autor Ordoñez et al. (2024) emplearon el diseño de mezcla con vértices extremos para optimizar un pan sin gluten a base de harina de torta de semilla de cacay y concentrado de fibra dietética de papaya, este diseño les permitió ajustar modelos polinomiales (lineales, cuadráticos o cúbicos), seleccionar el mejor ajuste y predecir propiedades de la masa y del pan; en otro estudio de Montoya & Rodríguez, (2025) también emplearon diseño de mezcla con vértices extremos para optimizar pan y pasteles sin gluten a base de 3 componentes como la harina de quinua germinado, harina de maíz germinado y agua, el diseño les permitió evaluar distintas formulaciones mediante modelos polinomiales ajustado con el software Minitab, en el cual analizaron humedad, volumen específico y análisis del perfil de textura.

2.3. Operacionalización o categorización de variables

2.3.1. Definición conceptual

En la presente investigación, se definió la variable independiente:

Mezcla panadera: es la combinación de insumos base de elaboración del pan, dicha variable

presenta tres dimensiones, con tres niveles cada uno, porcentaje de harina de gandul (15 - 35), porcentaje de harina de arroz (20 - 30) y porcentaje de almidón de papa (45 – 55).

Asimismo, se plantean como variables dependientes:

Propiedades físicas de las mezclas: Comprenderá la determinación de la viscosidad de empaste de las mezclas, una propiedad reológica clave que describe los cambios en la viscosidad durante el calentamiento y enfriamiento, a través de los parámetros de viscosidad pico, mínima y final.

Propiedades físicas del pan molde: Centrada en determinar la textura instrumental cuyas dimensiones son dureza, masticabilidad y elasticidad; y finalmente el color instrumental enfocada en la medición de la colorimetría en corteza y miga.

2.3.2. Definición operativa

En la tabla 6 se presenta la operacionalización de las variables independientes y dependientes consideradas en la investigación, detallando sus dimensiones o características, indicadores y escalas de medición empleadas para el análisis de las propiedades físicas del pan molde y sus mezclas.

Tabla 6

Operacionalización de variables independientes y dependientes

Variable	Dimensiones o características		Indicadores	Escala de medición
Independientes				
Mezcla panadera	% de harina de gandul (HG)		g/100g	15 ≤HG≥ 35
	% de harina de arroz (HA)		g/100g	20 ≤HA≥ 30
	% de almidón de papa (AP)		g/100g	45 ≤AP≥ 55
Dependientes				
Propiedad física de las mezclas	Viscosidad de empaste (reología)	Viscosidad pico	cP	56,98 – 96,16
		Viscosidad mínima	cP	1,51 – 5,55
		Viscosidad final	cP	11,63 – 57,81
	Textura instrumental	Dureza	N	3,25 – 6,76
		Masticabilidad	N	1,19 – 3,72
		Elasticidad	-	0,54 – 0,78
Propiedades físicas del pan molde		Corteza L*		55,93 - 64,81
		Corteza a*		4,77 – 11,85
		Corteza b*		28,31 – 37,28
	Color instrumental	Miga L*		59,54 – 64,28
		Miga a*		-0,01 – 2,37
		Miga b*		19,41 – 23,71

III. DISEÑO METODOLOGICO

3.1. Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo aplicada, ya que se buscó dar solución a un problema real, además, tiene un enfoque cuantitativo, porque se recolectaron datos numéricos de las propiedades físicas del pan molde sin gluten, los cuales fueron analizados con el software Statgraphics Centurion XIX – Versión de Evaluación (30 días)

El método de la investigación es experimental, ya que se combinaron diferentes proporciones de las variables independientes con el fin de observar su influencia sobre propiedades físicas como la viscosidad de empaste de las mezclas, la textura instrumental y el color instrumental del pan molde sin gluten.

3.2. Diseño de contrastación de hipótesis

En el diseño de contrastación se empleó un diseño de mezcla con vértices extremos, el cual permitió analizar como las diferentes combinaciones con restricciones de harina de gandul (15 - 35%), harina de arroz (20 – 30%) y almidón de papa (45 – 55%) influyeron en las propiedades físicas del pan molde y sus mezclas; por lo que se aplicó el modelo de regresión polinomial ajustado a los datos experimentales, los cuales fueron evaluados en el software Statgraphics Centurion XIX – Versión de Evaluación (30 días). En la tabla 7 se presentan los 14 tratamientos generados por el software Statgraphics Centurion XIX – Versión de Evaluación (30 días) junto con los tres componentes principales experimentales.

Cabe señalar que los tratamientos T7 y T8 corresponden a la misma proporción de mezcla (25% de harina de gandul, 25% de harina de arroz y 50% de almidón de papa) y fueron ejecutados en dos corridas experimentales independientes con el propósito de contar con una replicación del diseño, permitiendo estimar el error puro del experimento y evaluar la reproducibilidad de las mediciones. La ecuación matemática del diseño correspondiente se indica en la ecuación (1).

$$Y = \beta_A X_1 + \beta_B X_2 + \beta_C X_3 + \beta_{AB} X_1 X_2 + \beta_{AC} X_1 X_3 + \beta_{BC} X_2 X_3 + \beta_{ABC} X_1 X_2 X_3 \quad (1)$$

Donde:

Y= valor estimado de la variable respuesta

- Propiedades físicas de las mezclas: viscosidad mínima, viscosidad pico o viscosidad final
- Propiedades físicas del pan molde: dureza, masticabilidad, elasticidad, corteza L*, corteza a*, corteza b*, miga L*, miga a* o miga b*

$\beta_A, \beta_B, \beta_C$ = son los coeficientes de regresión asociado a la variable X_1, X_2, X_3

X_1, X_2, X_3 = variable independiente (harina de gandul, harina de arroz y almidón de papa)

$X_1 + X_2 + X_3 = 1$ (o 100% en proporción real), condición impuesta por el diseño de mezclas

Tabla 7

Proporciones de harina de gandul, arroz y almidón de papa empleadas en cada tratamiento

Tratamiento	Harina de Gandul (%)	Harina de Arroz (%)	Almidón de papa (%)
T1	15,00	30,00	55,00
T2	20,00	25,00	55,00
T3	20,00	27,50	52,50
T4	20,00	30,00	50,00
T5	25,00	20,00	55,00
T6	25,00	22,50	52,50
T7	25,00	25,00	50,00
T8	25,00	25,00	50,00
T9	25,00	27,50	47,50
T10	25,00	30,00	45,00
T11	30,00	20,00	50,00
T12	30,00	22,50	47,50
T13	30,00	25,00	45,00
T14	35,00	20,00	45,00

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

La población correspondiente a los insumos estuvo constituida por la producción durante el periodo de enero y febrero del 2025, para el caso de la harina de gandul (*Cajanus cajan*) correspondió a la producción artesanal a granel en el mercado de Lambayeque, para la harina de arroz (*Oryza sativa*) fue un producto comercial de un kilo, marca “costeño” expendido en el Supermercado Plaza Vea de San Juan de Lurigancho, Lima y el almidón de papa (*Solanum tuberosum*) un producto comercial en bolsa de 5 kilos de la empresa Campo Grande Perú, Lima.

3.3.2. Muestra

La muestra estuvo constituida por 5 kg de harina de arroz, 5 kg de harina de gandul y 10 kg de almidón de papa adquiridos en el mes de enero y febrero del año 2025.

3.4. Técnicas, instrumentos de recolección de datos

3.4.1. Técnicas e instrumentos

Para la recolección de datos efectivos, fue necesario elegir las técnicas e instrumentos que mejor se adaptan a los objetivos del estudio, los análisis de viscosidad de empaste se realizaron por duplicado, la de textura instrumental con 6 repeticiones y las de colorimetría con 3 repeticiones en el color de la corteza y 10 repeticiones en el color de la miga. En la Tabla 8, se detallan las técnicas e instrumentos empleados para la recolección de datos en la presente investigación.

3.4.2. Materia prima

- Harina de gandul con pretatamiento, molturado y tamizado a 0,125mm
- Harina de arroz marca Costeño, tamaño de partícula de 0,125mm
- Almidón de papa marca Campo Grande, tamaño de partícula de 0,063mm

Tabla 8

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Técnica	Instrumento
Observación experimental	Hoja de registro de datos correspondientes al perfil de viscosidad de empaste obtenido mediante reómetro (viscosidad pico, mínima y final).
Observación experimental	Hoja de registro de datos de textura (TPA) de las muestras de pan molde sin gluten
Observación experimental	Hoja de registro de datos de color instrumental (L*, a*, b*) de miga y corteza de pan molde sin gluten.
Análisis estadístico	Software Statgraphics Centurion XIX – Versión de Evaluación (30 días) para ajuste de modelos, transformación de variables, análisis de residuos y generación de superficies de respuesta.

3.4.3. Insumos

- Agua de mesa ozonizada y purificada marca Pura Vida
- Azúcar morena marca Endulza mass
- Aceite vegetal de soya marca Campero

- Levadura seca instantánea marca Nicolini
- Lecitina de soya marca Solec
- Sal yodada y fluorada marca Marina
- Goma xantana de grado alimenticio marca Elyasan

3.7.4. Equipos, materiales

3.7.4.1. Equipos

- Incubadora marca Binder (rango de temperatura desde 5 a 100°C)
- Estufa marca Venticell Ecoline (rango de temperatura desde 10 a 300°C)
- Reómetro Compacto Modular: MCR 302e equipado con una placa de medición pulida con chorro de arena (PP50/S; diámetro: 50 mm)
- Balanza de precisión 0,01g
- Balanza analítica 0,0001g
- Analizador de textura marca Brookfield Metek (velocidad 0,01 a 0,1 mm/s, exactitud 0,1 mm)
- Medidor de croma CR-410 marca Konica Minolta (tiempo de medición 1 a 3s, área de medición de 50 a 53 mm)
- Batidora capacidad 3 Kg marca Oster
- Micropipeta marca Eppendorf (100 – 1000µl)
- Agitador orbital (Lauda, Alemania, BS150)

3.7.4.2. Materiales

- Tubos falcon capacidad de 15 ml
- Mesa de acero inoxidable
- Moldes de aluminio de pan molde capacidad 250 g
- Papel de aluminio
- Cuchara de mezcla de silicona
- Cortador de galleta de 2,5 cm
- Cinta masking tape
- Bowl de vidrio capacidad 250g
- Bolsas tipo ziploc
- Marcador indeleble
- Papel toalla

- Guantes de nitrilo
- Mascarilla
- Cofias

3.7.5. Métodos de análisis

3.7.5.1. Metodología reológica de evaluación de la viscosidad de empaste de las mezclas

Se empleó la metodología descrita por Jannasch & Wang (2025), con algunas modificaciones; se pesaron 100 mg de muestra y se sometieron a agitación en un agitador orbital a 300 rpm durante 5 minutos para lograr una adecuada homogeneización; posteriormente, se añadió agua destilada hasta alcanzar una concentración final del 12 % (p/v), cada suspensión se dejó hidratar por 15 minutos a temperatura ambiente antes del análisis.

Posteriormente, la muestra se colocó en el reómetro, ajustando la distancia entre placas a 0,5 mm y se ajustó a una rotación constante de 120 rpm, aplicando un perfil térmico similar al utilizado en el analizador rápido de viscosidad (RVA), en el cual inicio a 50 °C durante 1 minuto, seguido de un calentamiento de 50 °C a 95 °C a razón de 10 °C/min, mantenimiento a 95 °C por 1 minuto, enfriamiento hasta 5 °C a la misma velocidad y estabilización final a 5 °C por 1 minuto.

La lectura del perfil de viscosidad registró los valores correspondientes a viscosidad pico, mínima y final. Todas las evaluaciones se realizaron por duplicado, debido a la durabilidad del experimento y limpieza del equipo para someter la siguiente muestra; asimismo, estudios previos como Vidaurre, (2020); Alberco, (2023); Huamaní et al. (2025) y Jannasch & Wang, (2025) han empleado dos repeticiones, sustentando esta elección en la sensibilidad, versatilidad y fiabilidad del equipo (Balet et al., 2019). La Figura 1 muestra de forma esquemática el procedimiento empleado para determinar la viscosidad de empaste de las mezclas de harinas y almidón mediante análisis reológico.

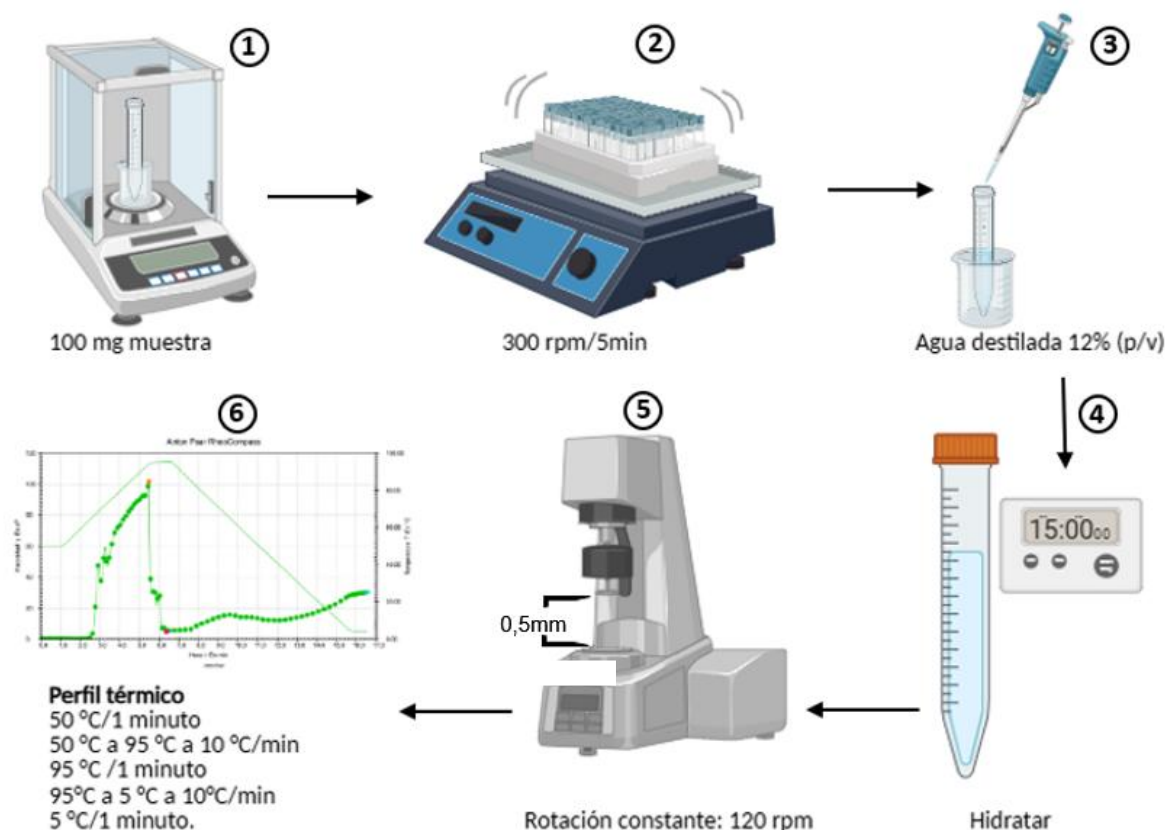
3.7.5.2. Metodología de propiedades texturales del pan molde

La determinación de las propiedades texturales en panes, se realizó en muestras que han reposado 2 horas después de hornearse, utilizando el analizador de textura con una sonda cilíndrica de 25 mm de diámetro, luego se obtuvieron muestras de migas de pan de las partes centrales en forma de cilindro (2,5 cm de diámetro y 2,5 cm de altura); la prueba se realizó a

una velocidad de 1 mm/s para comprimir la miga de pan hasta el 50% de su altura original; la dureza, elasticidad y masticabilidad de la miga se obtuvo automáticamente a partir de la curva de Análisis de Perfil de Textura (TPA) generada por el software del equipo (Vidaurre, 2020); cada muestra fue analizada en 6 repeticiones.

Figura 1

Ilustración de la metodología de la viscosidad de empaste en mezclas de harinas y almidón



3.7.5.3. Metodología de color instrumental del pan molde corteza y miga

Se utilizó el medidor de color CR-410 para evaluar las migas en rodajas centrales y las cortezas de los panes formulados; el procedimiento implicó colocar el dispositivo directamente sobre la muestra, seleccionar el área de interés y realizar la medición; además, se empleó la escala CIE Lab*, registrando los valores promedio de L*, a* y b* para cada una de las muestras.

3.7.6. Procesamiento y análisis de datos

El procesamiento y análisis de datos se realizó con la ayuda del software Statgraphics Centurion XIX – Versión de Evaluación (30 días), mediante el diseño de mezcla con vértices extremos de tipo cúbico especial, con el objetivo de evaluar la influencia de la harina de gandul,

harina de arroz y almidón de papa sobre las propiedades del pan molde y sus mezclas. Para cada variable respuestas se ajustó un modelo polinomial en la mezcla, en donde su significancia estadística se evaluó con ANOVA, considerando un nivel de confianza del 95%, además, se analizó el coeficiente de determinación ajustado error cuadrático medio, R^2 predicho y R^2 ajustado para validar la calidad del ajuste, finalmente se generaron superficies de respuesta para observar la influencia de las mezclas en las variables respuestas.

3.7.7. Metodología experimental

Las proporciones utilizadas en cada formulación para la elaboración del pan molde sin gluten a base de harina de gandul (HG), harina de arroz (HA) y almidón de papa (AP) se presentan en la Tabla 9. En la Figura 2 se muestra el diagrama de bloques con los parámetros de temperatura y tiempo para la elaboración del pan molde mencionado.

Tabla 9

Ingredientes en la elaboración del pan molde sin gluten

Ingredientes	Porcentaje
Harina de gandul (HG)	15-35%
Harina de arroz (HA)	20-30%
Almidón de papa (AP)	45-55%
Agua	90% (HG + HA + AP)
Goma xantana	0,5% (HG + HA + AP)
Lecitina de soya	0,5% (HG + HA + AP)
Sal	1% (HG + HA + AP)
Azúcar	3% (HG + HA + AP)
Levadura	3% (HG + HA + AP)
Aceite de soja	6% (HG + HA + AP)

Formulación de pan molde sin gluten

a) Recepción de la materia prima

Se verificó la condición de almacenamiento, fecha de vencimiento de la harina de arroz y almidón de papa y en el caso harina de gandul se examinó que no presentara impurezas ni contaminantes.

b) Pesado

Cada insumo se midió con la ayuda de una balanza analítica y balanza de precisión conforme a las proporciones establecidas por el diseño de mezclas, fundamental para garantizar la estandarización de las formulaciones.

c) Mezclado 1

Los ingredientes secos (harinas, almidón, sal, azúcar, goma xantana) se incorporaron en el recipiente y se mezcló con la asistencia de la batidora marca Oster a velocidad 2 durante 2 min, para permitir la homogenización de los insumos secos, favoreciendo la distribución uniforme.

d) Mezclado 2

La levadura se activó en una dilución con agua tibia, paralelamente, la lecitina de soya se disolvió en aceite vegetal de soya para favorecer su emulsificación y una adecuada dispersión; ambas suspensiones se agitaron en la batidora a velocidad 3 durante 1 minuto cada una.

e) Mezclado 3

Sobre la mezcla seca se fue integrando las fases líquidas, con un batido a una velocidad 6 durante 3 minutos para lograr una distribución homogénea de todos los ingredientes

a) Fermentado

En esta etapa, la mezcla final se colocó en moldes de 250 gramos de capacidad, seguidamente los moldes se colocaron en una incubadora a 30°C por 30 minutos a una humedad relativa entre 80 y 85%, para facilitar la expansión del volumen y desarrollo de la masa.

b) Horneado

Se realizó el precalentamiento de la estufa a 180 °C durante 10 minutos para asegurar una transferencia de calor uniforme desde el inicio de la cocción, luego se llevó a cabo el horneado a 180 °C durante 60 minutos, cubriendo los moldes con papel film resistente al calor durante los primeros 30 minutos con el objetivo de mantener la humedad superficial y evitar el agrietamiento prematuro de la corteza.

c) Enfriado

Una vez culminada el horneado, los panes fueron retirados cuidadosamente de los moldes para evitar deformaciones mecánicas y se dejaron reposar a temperatura ambiente durante aproximadamente 60 minutos.

d) Empacado

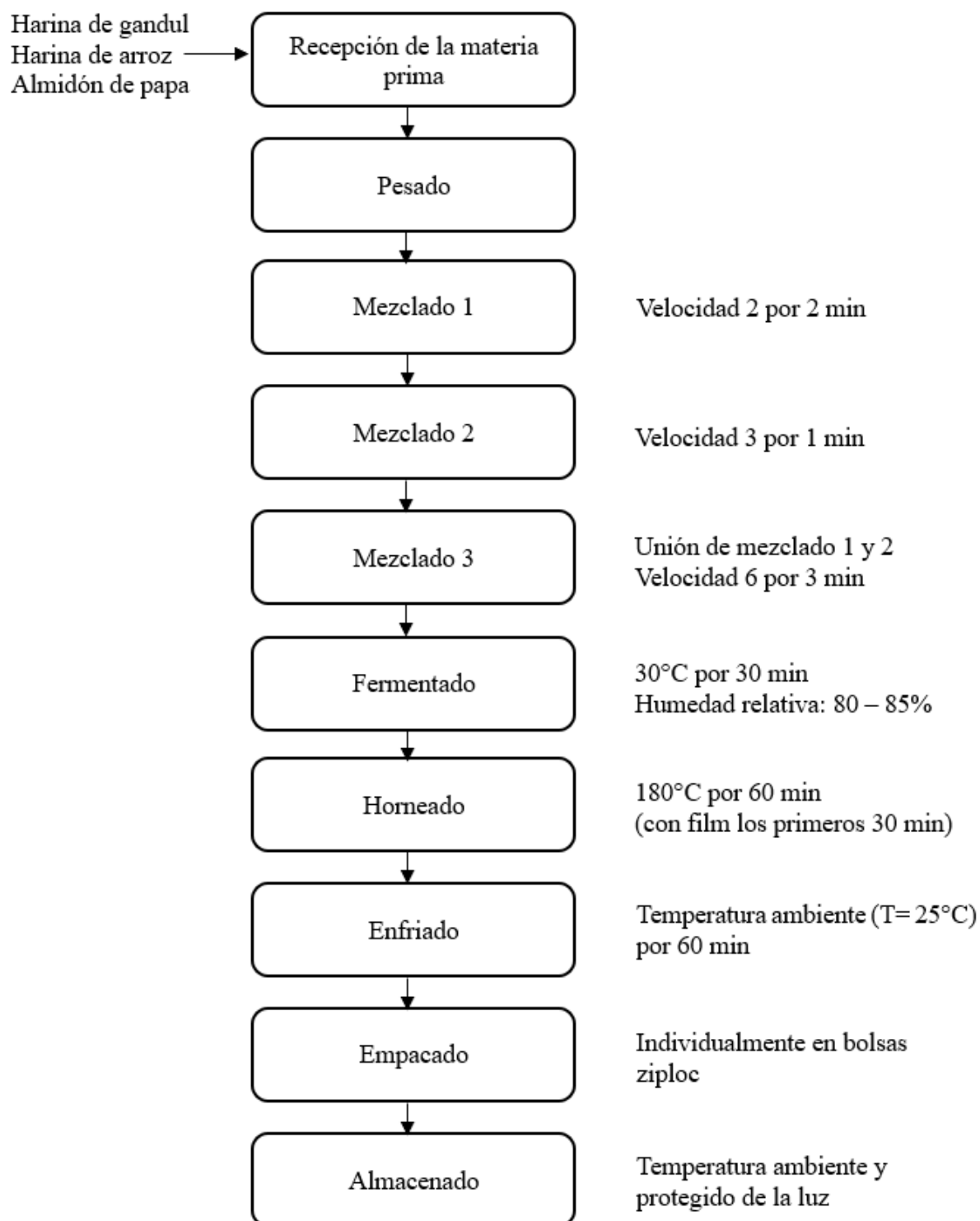
Los panes de molde completamente enfriados se empacaron individualmente en bolsas ziploc y rotulados según el tratamiento correspondiente.

e) Almacenado

Finalmente, los panes de molde empacados fueron almacenados a temperatura ambiente y protegidos de la luz directa, para preservar sus propiedades físicas hasta el momento de los análisis posteriores.

Figura 2

Diagrama de bloques para obtener pan molde sin gluten de harina de gandul, arroz y almidón de papa



Nota. Modificado de “Elaboración de pan sin gluten utilizando harina de cañihua (*Chenopodium pallidicaule*), arroz (*Oryza sativa*) y almidón de maíz (*Zea mays*)”, Alberco, 2023

3.5. Aspectos éticos de la investigación

La presente investigación no involucró seres humanos ni animales, por lo que no fue necesaria la aplicación de consentimientos informados, asimismo, el estudio se desarrolló respetando los principios de honestidad, objetividad y rigor científico en la obtención, análisis e interpretación de los datos, además, se garantizó el uso responsable de los insumos, equipos y materiales de laboratorio conforme a las normas de seguridad establecidas, y se respetaron los derechos de autor mediante la adecuada citación de las fuentes bibliográficas de acuerdo con las normas APA (7ª edición); asimismo, se empleó el software Statgraphics Centurion XIX en su versión libre de evaluación por 30 días.

IV. RESULTADOS

4.1. Resultados de la propiedad reológica de viscosidad de empaste de las mezclas

La Tabla 10 muestra los valores de viscosidad pico, mínima y final obtenidos para los catorce tratamientos evaluados; los resultados son promedios de dos repeticiones, acompañados de su respectiva desviación estándar.

Tabla 10

Resultados de las propiedades reológicas de viscosidad de empaste de las mezclas

Tratamiento	Viscosidad pico (cP)	Viscosidad mínima (cP)	Viscosidad final (cP)
T1	98,65 (4,31)	4,42 (0,77)	29,64 (1,22)
T2	80,90 (12,59)	6,64 (0,15)	71,36 (15,22)
T3	76,60 (2,85)	2,86 (0,48)	17,78 (2,29)
T4	75,56 (2,62)	4,28 (1,13)	33,54 (1,11)
T5	72,33 (8,28)	5,98 (1,07)	41,39 (2,56)
T6	66,64 (1,69)	3,27 (0,03)	21,97 (2,06)
T7	71,57 (1,91)	4,50 (0,53)	34,55 (1,07)
T8	70,08 (1,25)	4,07 (2,28)	45,47 (0,82)
T9	69,59 (2,72)	3,96 (1,53)	34,92 (9,25)
T10	69,05 (1,07)	2,51 (0,38)	15,14 (3,76)
T11	56,86 (3,99)	2,75 (0,13)	18,63 (0,79)
T12	63,84 (1,46)	1,43 (0,02)	11,50 (0,07)
T13	69,96 (3,68)	3,60 (1,31)	47,38 (0,02)
T14	62,56 (10,46)	1,87 (0,06)	14,80 (1,68)

Nota. Cada valor corresponde al promedio de dos repeticiones, la desviación estándar se indica entre paréntesis y cP: centipoise, unidad del sistema centímetro-gramo-segundo (CGS)

La Tabla 11 presenta los estadísticos del ajuste de los modelos obtenidos para las variables respuesta de viscosidad de empaste, empleándose en todos los casos un modelo cúbico especial; para cada variable se reportan el valor de significancia del modelo (p-value), los coeficientes de determinación (R^2 , R^2 ajustado y R^2 predictivo), el estadístico de Durbin-Watson y el error estándar correspondiente.

La Tabla 12 presenta las ecuaciones ajustadas para las variables de viscosidad; se aprecia que el almidón de papa (C) fue el componente con mayor influencia positiva en las tres propiedades evaluadas, especialmente en la viscosidad final +208,51C y pico +123,99C, también la harina de arroz (A) aportó de forma positiva, aunque en menor medida, mientras que la harina de gandul (B) presentó un efecto negativo notable en la viscosidad final -85,55B.

Tabla 11

Análisis de varianza de las viscosidades de mezclas de harina de gandul, arroz y almidón de papa

Variable respuesta	Modelo	p-value	R ² (%)	R ² ajustado (%)	R ² predicted (%)	Durbi-Watson	Error estándar
Viscosidad pico (cP)	Cúbico especial	0,0002	96,22	92,98	50,25	2,2061	2,6068
Viscosidad mínima (cP)	Cúbico especial	0,1838	67,10	38,90	0,0	1,8622	1,1317
Viscosidad final (cP)	Cúbico especial	0,4297	53,47	13,58	0,0	1,3870	15,3690

Nota. cP: centipoise, unidad del sistema centímetro-gramo-segundo (CGS); R²: coeficiente de determinación; R² ajustado: ajuste por términos del modelo; R² predictivo: capacidad predictiva; Durbin-Watson: autocorrelación de residuos; error estándar: variabilidad residual.

Tabla 12

Ecuaciones obtenidas de las viscosidades de mezclas de harina de gandul, arroz y almidón de papa

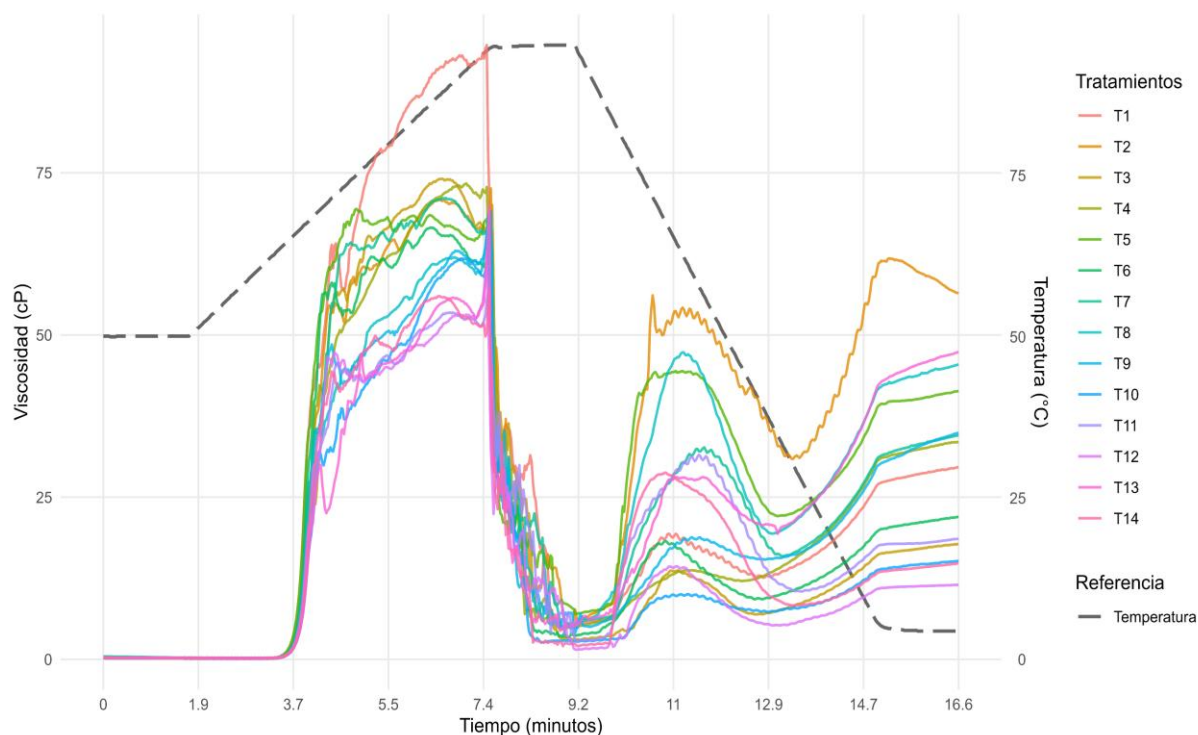
Variable respuesta	Ecuaciones
Viscosidad pico (cP)	$VP = 61,96A + 52,60B + 123,99C + 53,42AB - 94,10AC + 37,93BC - 125,30ABC$
Viscosidad mínima (cP)	$VM = 1,85A + 2,44B + 19,72C + 4,89AB - 20,79AC - 26,94BC + 27,67ABC$
Viscosidad final (cP)	$VF = 16,73A - 85,55B + 208,51C + 240,26AB - 292,30AC - 123,55BC + 306,47ABC$

Nota. cP: centipoise, unidad del sistema centímetro-gramo-segundo (CGS); A: harina de arroz, B: harina de gandul y C: almidón de papa.

En la Figura 3 se muestran las curvas promedio de viscosidad de empaste de los tratamientos T1 a T14, junto con la curva de temperatura aplicada durante el análisis reológico, en el cual se observó que inicialmente las mezclas presentaron valores bajos de viscosidad mientras la temperatura se mantuvo constante; posteriormente, se apreció un aumento de la viscosidad mientras aumentaba la temperatura, cada uno de los tratamientos alcanzaron diferentes valores de viscosidad pico, posteriormente se registró una viscosidad mínima mientras la temperatura de calentamiento era constante, a continuación se apreció un aumento durante la etapa de enfriamiento que dio lugar a la viscosidad final, en el cual se aprecia que algunos tratamientos presentaron una mayor recuperación de viscosidad durante el enfriamiento.

Figura 3

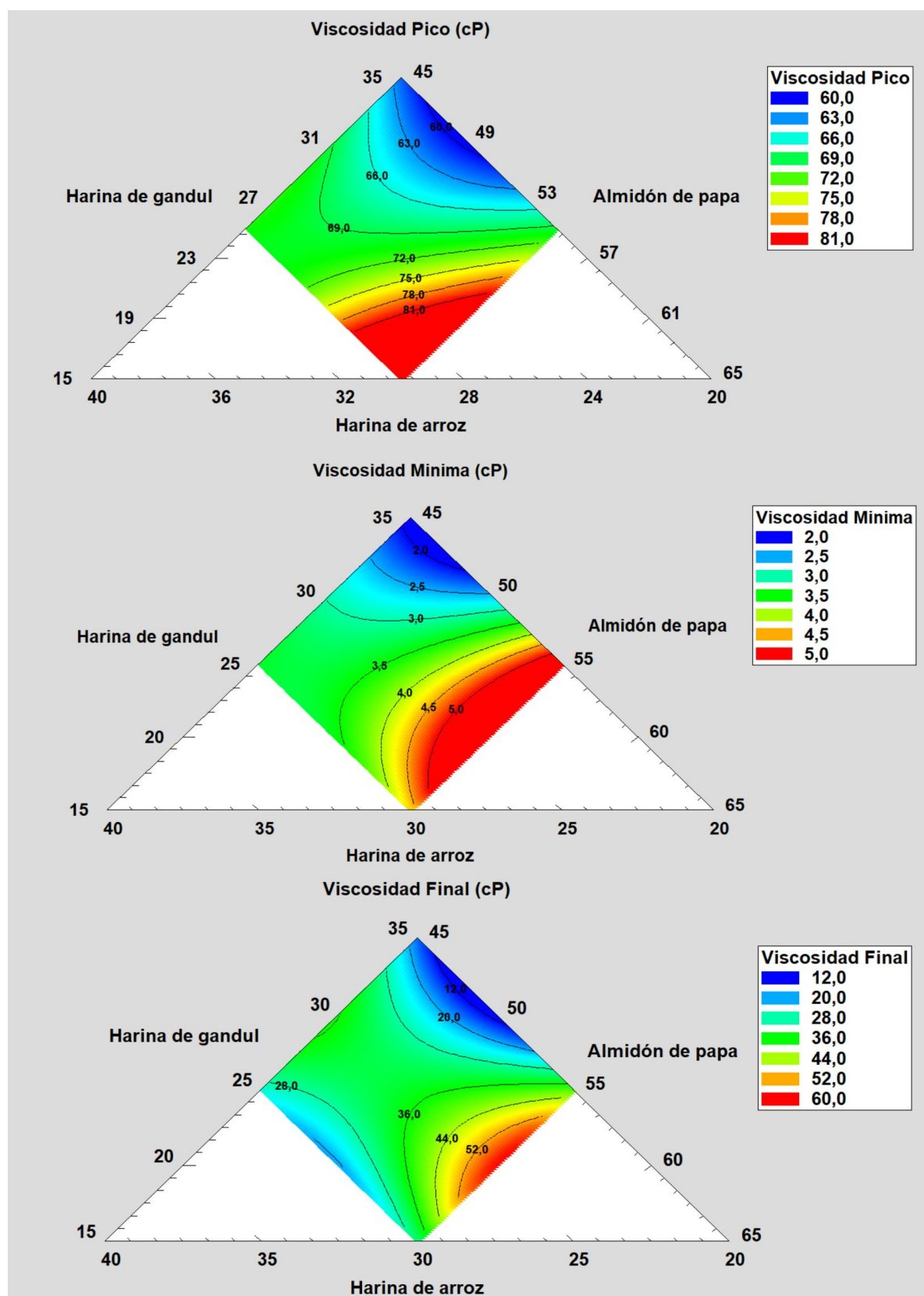
Curvas de viscosidad de los tratamientos T1–T14 y perfil temperatura en función del tiempo durante el ensayo reológico asociadas a la viscosidad de empaste.



En la Figura 4 se presentan las superficies de respuesta estimadas para las variables viscosidad pico, mínima y final, se observa cómo varían dichas viscosidades en función de la proporción de la harina de gandul, harina de arroz y almidón de papa, en el caso de la viscosidad pico, se evidencia que un mayor contenido de harina de gandul junto con una menor proporción de almidón de papa conduce a una disminución de este parámetro, mientras que una mayor de almidón incrementa significativamente dicha viscosidad; de manera similar, tanto la viscosidad mínima como la viscosidad final tienden a incrementarse con mayores proporciones de almidón de papa, mientras que disminuyen al aumentar la harina de gandul.

Figura 4

Gráfico de contorno de superficie de respuesta estimada para las viscosidades pico, final y mínima en función de las mezclas de harina de gandul, arroz y almidón de papa



4.2. Resultados de la textura instrumental del pan molde

La Tabla 13 muestra los valores de dureza, masticabilidad y elasticidad obtenidos para los catorce tratamientos evaluados; los resultados son promedios de seis repeticiones, acompañados de su respectiva desviación estándar.

Tabla 13

Resultado de las propiedades de textura instrumental del pan de molde

Tratamiento	Dureza (N)	Masticabilidad (N)	Elasticidad
T1	3,13 (0,12)	1,08 (0,17)	0,53 (0,06)
T2	4,17 (0,43)	1,85 (0,30)	0,64 (0,06)
T3	3,89 (0,44)	1,62 (0,20)	0,61 (0,04)
T4	3,31 (0,26)	1,35 (0,27)	0,60 (0,06)
T5	3,63 (0,27)	1,52 (0,30)	0,61 (0,06)
T6	4,21 (0,27)	2,16 (0,25)	0,70 (0,04)
T7	3,49 (0,16)	1,40 (0,14)	0,60 (0,04)
T8	3,73 (0,53)	1,50 (0,29)	0,60 (0,06)
T9	3,43 (0,29)	1,19 (0,21)	0,54 (0,05)
T10	3,98 (0,30)	1,83 (0,31)	0,66 (0,05)
T11	4,18 (0,41)	2,08 (0,34)	0,70 (0,05)
T12	4,58 (0,45)	2,24 (0,31)	0,69 (0,02)
T13	5,42 (0,39)	2,75 (0,32)	0,72 (0,03)
T14	6,76 (0,36)	3,72 (0,25)	0,78 (0,02)

Nota. Cada valor corresponde al promedio de seis repeticiones, la desviación estándar se indica entre paréntesis y

N: newton, unidad de fuerza del Sistema Internacional.

La Tabla 14 se presenta los estadísticos del ajuste de los modelos obtenidos para las variables respuesta de la textura instrumental del pan molde sin gluten, empleándose en todos los casos un modelo cúbico especial; para cada variable se reportan el valor de significancia del modelo (p-value), los coeficientes de determinación (R^2 , R^2 ajustado y R^2 predictivo), el estadístico de Durbin-Watson y el error estándar correspondiente.

En la Tabla 15 se presentan las ecuaciones ajustadas para las variables de dureza, masticabilidad y elasticidad; en el caso de la masticabilidad y la elasticidad, se aplicó una transformación de Box-Cox, con valores de $\lambda = 1,77668$ y $\lambda = 6,30034$ respectivamente, con el fin de mejorar el ajuste del modelo.

Tabla 14

Análisis de varianza de la textura instrumental para pan de molde sin gluten de harina de gandul, arroz y almidón de papa

Variable respuesta	Modelo	p-value	R ² (%)	R ² ajustado (%)	R ² predicted (%)	Durbi-Watson	Error estandar
Dureza (N)	Cúbico especial	0,0007	93,69	88,28	30,76	1,200	0,3267
Masticabilidad (N)	Cúbico especial	0,0011	92,90	86,81	59,38	1,1061	0,3149
Elasticidad	Cúbico especial	0,0121	85,20	72,51	0,0	1,4503	0,0467

Nota. N: newton, unidad de fuerza del Sistema Internacional; R²: coeficiente de determinación; R² ajustado: ajuste por términos del modelo; R² predictivo: capacidad predictiva; Durbin–Watson: autocorrelación de residuos; error estándar: variabilidad residual.

Tabla 15

Ecuaciones obtenidas de la textura instrumental para pan de molde sin gluten de harina de gandul, arroz y almidón de papa

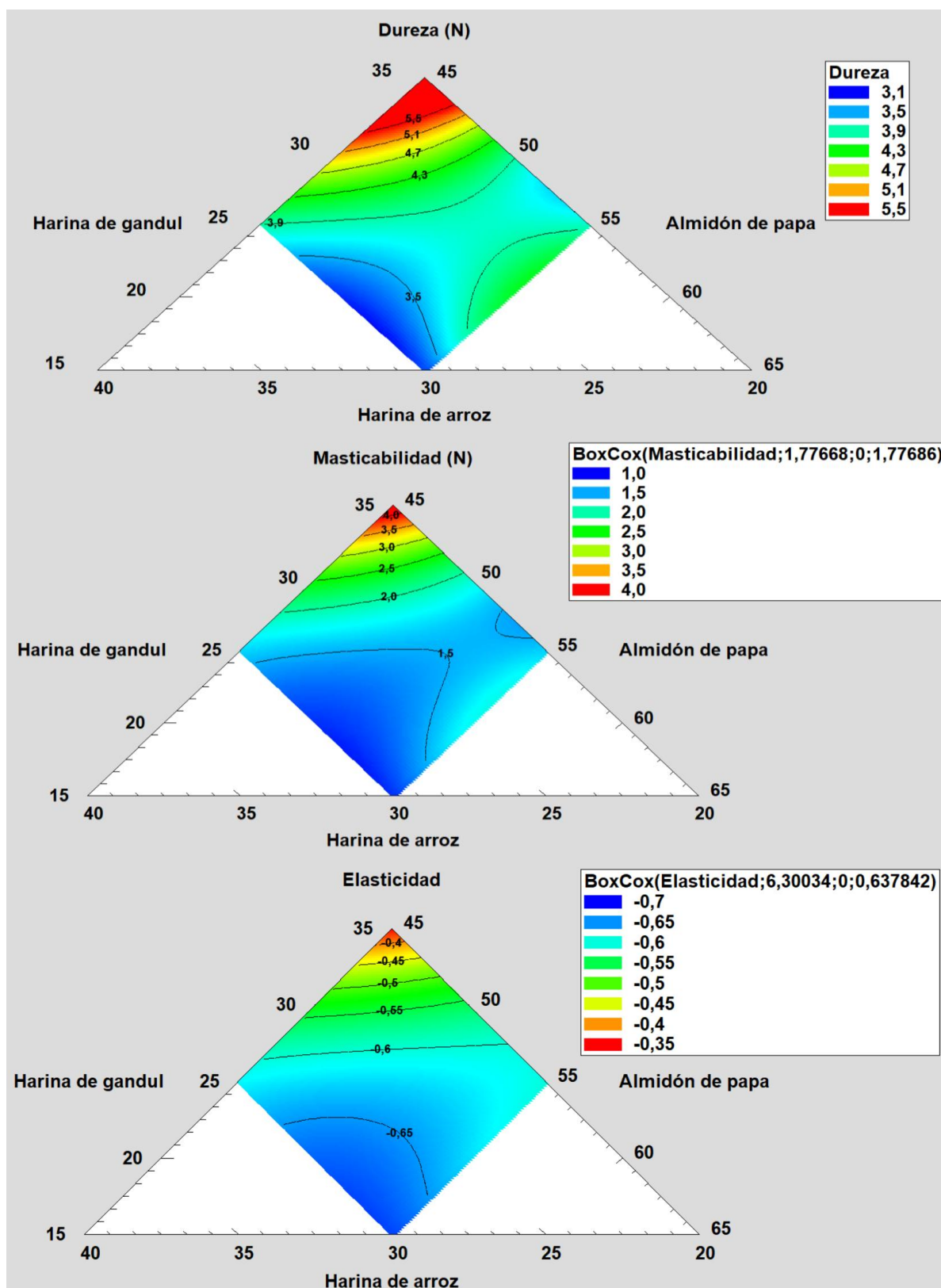
Variable respuesta	Ecuaciones
Dureza (N)	$Dureza = 6,83A + 2,89B + 11,11C - 3,78AB - 20,58AC - 15,00BC + 28,47ABC$
Masticabilidad (N)	$Masticabilidad = (1,77668 * (4,39A + 2,40B + 7,61C - 7,09AB - 17,57AC - 15,51BC + 27,25ABC))^{\frac{1}{1,77668}}$
Elasticidad	$Elasticidad = (6,30034 * (-0,35A - 0,52B - 0,21C - 0,71AB - 1,27AC - 1,25BC + 1,90ABC))^{\frac{1}{6,30034}}$

Nota. N: newton, unidad de fuerza del Sistema Internacional; A: harina de arroz, B: harina de gandul y C: almidón de papa.

En la Figura 5 se presentan las superficies de respuesta estimadas para las propiedades texturales del pan molde sin gluten, donde se observa que, en los tres casos, una mayor proporción de harina de gandul y una menor proporción de almidón de papa generan valores más altos de dureza, masticabilidad y elasticidad; en cambio, al invertir estas proporciones, se obtienen valores más bajos para dichas propiedades.

Figura 5

Gráfico de contorno de superficie de respuesta estimada para la dureza, masticabilidad y elasticidad del pan de molde según los tratamientos



4.3. Resultados de color instrumental del pan molde

4.3.1. Resultados del color instrumental de la corteza del pan molde

La Tabla 16 presenta los valores de color de la corteza de los indicadores L*, a* y b* para los catorce tratamientos evaluados; los resultados son promedios de tres repeticiones, acompañados de su respectiva desviación estándar, además del color visual de la corteza del pan molde.

Tabla 16

Resultados de color visual e instrumental de la corteza del pan de molde

Tratamiento	Color visual	Indicador de color (Corteza)		
		L*	a*	b*
T1		64,55 (1,03)	5,91 (0,98)	31,51 (0,82)
T2		57,30 (0,58)	8,74 (0,20)	30,01 (0,15)
T3		56,83 (1,16)	8,53 (0,28)	32,32 (0,36)
T4		58,88 (0,25)	11,85 (0,97)	37,28 (1,31)
T5		63,73 (1,08)	6,25 (0,28)	33,98 (0,51)
T6		59,43 (0,85)	6,57 (0,08)	30,79 (0,66)
T7		57,56 (0,51)	9,72 (1,27)	31,94 (0,20)
T8		57,42 (0,21)	6,88 (0,36)	29,94 (0,50)
T9		56,59 (0,85)	4,75 (0,33)	28,48 (0,60)
T10		57,93 (1,04)	5,95 (0,25)	30,86 (0,34)
T11		65,73 (1,13)	4,32 (0,10)	29,90 (1,17)
T12		58,78 (0,07)	4,42 (0,74)	27,71 (0,77)
T13		55,11 (1,32)	5,85 (1,01)	29,43 (0,51)
T14		55,00 (0,57)	5,52 (0,09)	29,99 (0,75)

Nota. Cada valor corresponde al promedio de tres repeticiones, la desviación estándar se indica entre paréntesis.

En la Tabla 17 se presenta los estadísticos del ajuste de los modelos obtenidos para las variables respuesta de color de la corteza del pan molde sin gluten, empleándose en todos los casos un modelo cúbico especial; para cada variable se reportan el valor de significancia del modelo (p-value), los coeficientes de determinación (R^2 , R^2 ajustado y R^2 predictivo), el estadístico de Durbin-Watson y el error estándar correspondiente.

En la Tabla 18 se presentan las ecuaciones de la evaluación del color instrumental de la corteza del pan molde mediante el sistema CIELAB, para la corteza L*, corteza a* y corteza b*, en estas variables respuestas no se empleó transformación.

Tabla 17

Análisis de varianza del color de la corteza del pan de molde sin gluten de harina de gandul, arroz y almidón de papa

Variable respuesta	Modelo	p-value	R ² (%)	R ² ajustado (%)	R ² predicted (%)	Durbi-Watson	Error estandar
Corteza L*	Cúbico especial	0,0000	97,68	95,69	79,93	1,8487	0,7027
Corteza a*	Cúbico especial	0,1548	65,97	36,80	0,0	1,6719	1,7251
Corteza b*	Cúbico especial	0,1901	63,35	31,93	0,0	2,4071	1,9848

Nota. R²: coeficiente de determinación; R² ajustado: ajuste por términos del modelo; R² predictivo: capacidad predictiva; Durbin–Watson: autocorrelación de residuos; error estándar: variabilidad residual.

Tabla 18

Ecuaciones obtenidas del color de la corteza del pan de molde sin gluten de harina de gandul, arroz y almidón de papa

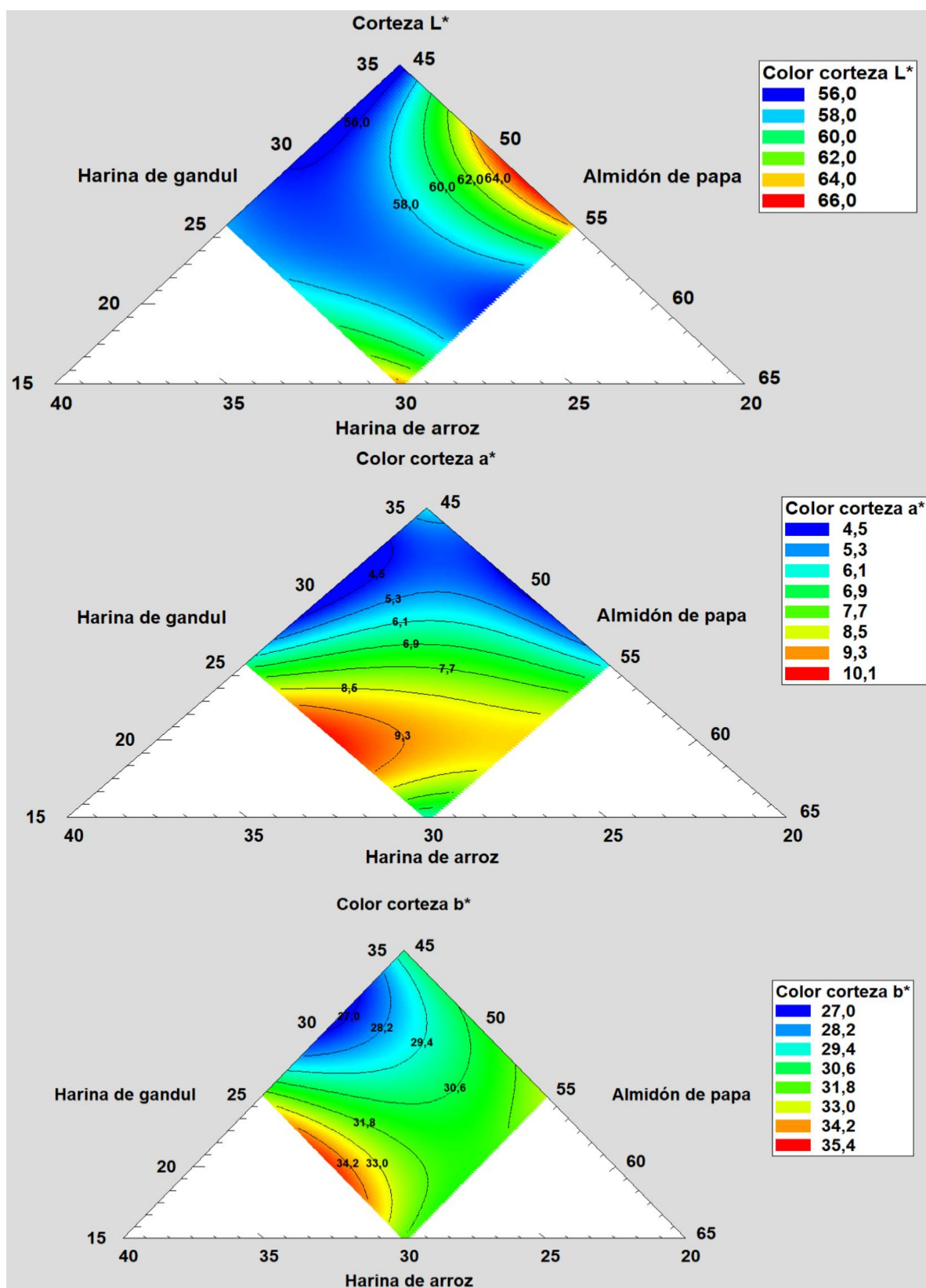
Variable respuesta	Ecuaciones
Corteza L*	Color corteza L* = 55,18A + 66,50B + 31,12C – 13,07AB + 84,53AC + 63,12BC – 238,13ABC
Corteza a*	Color corteza a* = 5,78A + 24,70B + 17,11C – 35,07AB – 22,43AC – 58,86BC + 161,67ABC
Corteza b*	Color corteza b* = 30,13A + 69,49B + 39,53C – 70,48AB – 8,56AC – 90,90BC + 114,11ABC

Nota. A: harina de arroz, B: harina de gandul y C: almidón de papa.

En la Figura 6 se observan las gráficas de superficie de respuesta, en el caso de la corteza L* se apreció el aumento de los valores con mayores proporciones de harina de arroz y almidón de papa y con bajo contenido de harina de gandul, lo cual se relaciona con una corteza más clara; en cuanto a la corteza a*, la mayor intensidad de color rojo se presenta en mezclas con predominancia de harina de arroz y cantidades intermedias de almidón de papa, siendo menor cuando se incrementa la proporción de harina de gandul; por otro lado, el componente b* (tonalidad amarilla) se incrementa principalmente con mayores niveles de harina de arroz, mientras que su valor disminuye en zonas con alta proporción de harina de gandul.

Figura 6

Gráficos de contorno de superficie de respuesta estimada para la corteza L^ , a^* y b^* del pan de molde según los tratamientos*



4.3.2. Resultados del color instrumental de la miga del pan molde

La Tabla 19 presenta los valores de color de la miga de los indicadores L*, a* y b* para los catorce tratamientos evaluados; los resultados son promedios de diez repeticiones, acompañados de su respectiva desviación estándar, además del color visual de la miga del pan molde.

Tabla 19

Resultados de color visual e instrumental de la miga del pan de molde sin gluten de harina de gandul, arroz y almidón de papa

Tratamiento	Color visual	Indicador de color (Miga)		
		L*	a*	b*
T1		62,82 (1,68)	-0,07 (0,21)	18,23 (1,68)
T2		60,63 (1,74)	0,98 (1,92)	19,43 (1,02)
T3		61,59 (2,15)	0,66 (0,17)	20,14 (0,43)
T4		65,45 (2,19)	1,32 (0,28)	22,86 (1,07)
T5		60,64 (1,93)	1,42 (0,44)	21,65 (1,73)
T6		58,56 (1,88)	1,75 (0,30)	22,77 (1,39)
T7		60,99 (1,97)	1,54 (0,38)	23,01 (1,43)
T8		63,17 (1,17)	1,14 (0,37)	21,36 (1,58)
T9		63,79 (0,91)	1,16 (0,25)	22,25 (0,98)
T10		63,37 (1,62)	1,71 (0,34)	23,13 (1,20)
T11		61,81 (1,47)	1,66 (0,36)	21,88 (1,47)
T12		59,57 (0,93)	1,77 (0,46)	22,90 (1,73)
T13		61,47 (1,23)	1,87 (0,21)	22,96 (0,74)
T14		60,19 (1,91)	2,27 (0,35)	23,19 (0,82)

Nota. Cada valor corresponde al promedio de diez repeticiones, la desviación estándar se indica entre paréntesis.

La Tabla 20 se presenta los estadísticos del ajuste de los modelos obtenidos para las variables respuesta de color de la miga del pan molde sin gluten, empleándose en todos los casos un modelo cúbico especial; para cada variable se reportan el valor de significancia del modelo (p-value), los coeficientes de determinación (R^2 , R^2 ajustado y R^2 predictivo), el estadístico de Durbin-Watson y el error estándar correspondiente.

La Tabla 21 se muestran las ecuaciones del color instrumental de la miga, correspondientes a las variables respuestas como la miga L*, miga a* y miga b*, en las cuales se incluyen a las interacciones lineales, binarias y ternarias

Tabla 20

Análisis de varianza del color de la miga para pan de molde sin gluten de harina de gandul, arroz y almidón de papa

Variable respuesta	Modelo	p-value	R ² (%)	R ² ajustado (%)	R ² predicted (%)	Durbi-Watson	Error estandar
Miga L*	Cúbico especial	0,0667	70,13	44,52	0,0	2,0308	1,3728
Miga a*	Cúbico especial	0,0030	89,67	80,81	61,90	2,2088	0,2555
Miga b*	Cúbico especial	0,0016	83,74	69,80	21,77	2,5123	0,8528

Nota. R²: coeficiente de determinación; R² ajustado: ajuste por términos del modelo; R² predictivo: capacidad predictiva; Durbin–Watson: autocorrelación de residuos; error estándar: variabilidad residual.

Tabla 21

Ecuaciones obtenidas del color de la miga del pan de molde sin gluten de harina de gandul, arroz y almidón de papa

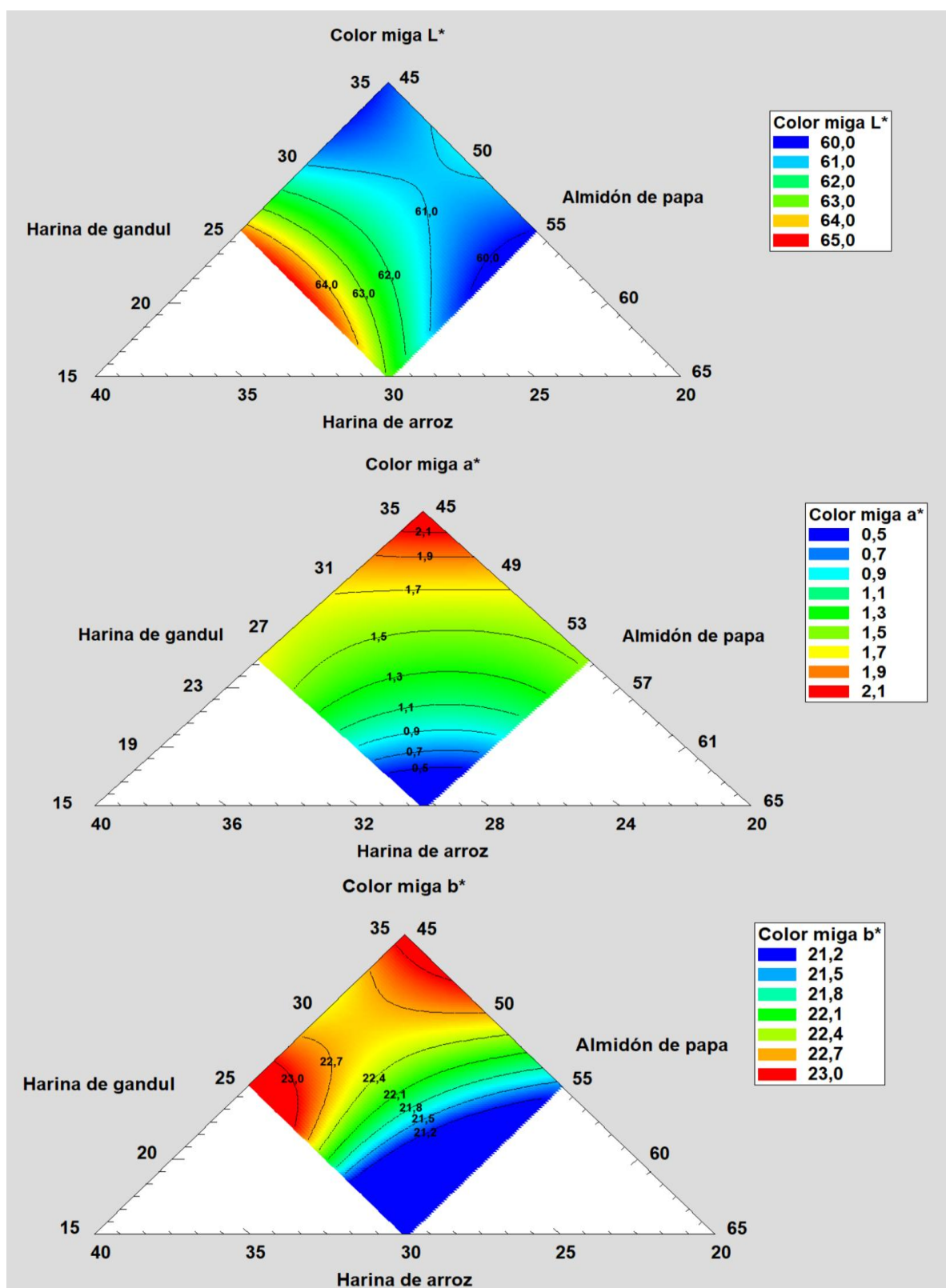
Variable respuesta (cP)	Ecuaciones
Miga L*	Color miga L* = 60,22A + 81,01B + 51,70C – 25,08AB + 16,20AC – 13,77BC + 7,67ABC
Miga a*	Color miga a* = 2,31A + 3,19B + 2,36C – 4,23AB – 3,19AC – 11,37BC + 15,013ABC
Miga b*	Color miga b* = 23,16A + 29,56B + 16,19C – 11,73AB + 7,07AC – 19,17BC + 29,43ABC

Nota. A: harina de arroz, B: harina de gandul y C: almidón de papa.

En la Figura 7 se observan las gráficas de superficie de respuesta, en el caso de la miga L*, se observa que las mayores proporciones de harina de arroz generan una miga más clara, mientras que el incremento de harina de gandul reducen la luminosidad; en el componente a*, los valores más altos se asocian a una mayor proporción de harina de gandul que van hacia tonalidades ligeramente verde, mientras que la harina de arroz tiende a disminuir esta tonalidad y respecto al componente b*, la combinación de la harina de gandul genera una miga menos amarilla, mientras que una mayor proporción de almidón de papa y harina de arroz lo favorecen.

Figura 7

Gráficos de contorno de superficie de respuesta estimada para la miga L^ , a^* y b^* del pan de molde según los tratamientos*



V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Discusión de la propiedad reológica de viscosidad de empaste de las mezclas

La viscosidad pico (VP) de las formulaciones analizadas se encontró entre $98,65 \pm 4,31$ cP (T1) y $56,86 \pm 3,39$ cP (T9) como se muestran en la Tabla 10, se observa que tratamientos con menor contenido de almidón de papa, harina de arroz y mayor proporción de harina de gandul, como el T14 (62,56 cP), registraron viscosidades pico más bajas, mientras que formulaciones con mayor contenido de almidón y menor de gandul, como el T1 (98,65 cP), alcanzaron los valores más altos; de forma similar, Alberco, (2023), encontró que la viscosidad pico aumentó con mayores proporciones de almidón de maíz, y disminuyó cuando su concentración fue menor; por otro lado, Horstmann et al. (2017), mencionan que menores valores de VP se asocian con migas más suaves lo que sugiere que las formulaciones con VP más bajas podrían favorecer una mejor miga en el producto final; además, los valores relativamente bajos obtenidos son consistentes con lo reportado por Jannasch & Wang (2025), quienes indicaron que los reómetros oscilatorios suelen registrar valores inferiores debido al menor cizallamiento aplicado; sin embargo, demostraron que, incluso con solo 100 mg de muestra, este equipo puede generar perfiles de empaste comparables estadísticamente a los del analizador rápido de viscosidad (RVA), validando su uso como herramienta alternativa.

Los valores de viscosidad mínima (VM) obtenidos en el presente estudio oscilaron entre $1,43 \pm 0,02$ cP (T12) y $6,64 \pm 0,15$ cP (T2) como se muestra en la Tabla 10, se observa que las formulaciones con mayor proporción de harina de gandul y menor proporción de harina de arroz y almidón de papa, como T12 (1,43 cP), T14 (1,87 cP), registraron las viscosidades mínimas más bajas, lo cual sugiere una notable ruptura de gránulos de almidón tras la gelatinización; este comportamiento puede explicarse por el efecto de las proteínas propias de esta harina, que, como señala Malavet (2009, como se citó en Alberco, 2023), interfieren con la estabilidad de la matriz de almidón durante el calentamiento; además los valores sugieren que la baja VM del presente estudio sugieren una mayor susceptibilidad al colapso estructural, lo cual concuerda con lo señalado por Cappa et al. (2013), quien menciona que la caída en viscosidad está directamente influenciada por el grado de hinchamiento y ruptura de los gránulos; aunque los valores que se obtuvo no son comparables numéricamente con los generados mediante el analizador rápido de viscosidad (RVA), la tendencia de los perfiles y su interpretación siguen siendo válidas; esto se debe a que el reómetro empleado permite detectar

eventos similares de gelatinización y ruptura con mayor precisión y menor cizallamiento, acercándose a condiciones fisiológicas como menciona Jannasch & Wang, (2025).

Los valores de viscosidad final (VF) obtenidos en este estudio oscilaron entre $71,36 \pm 15,22$ cP (T2) y $11,50 \pm 0,07$ cP (T12) como se muestra en la Tabla 10, se observó que las formulaciones con mayor proporción de harina de gandul y menor proporción de almidón de papa, mostraron las viscosidades finales más bajas, destacando el tratamiento T12 (11,50 cP) y T10 (15,14 cP), lo que sugiere que la presencia de proteínas podría estar interfiriendo en el reordenamiento molecular del almidón durante el enfriamiento; este comportamiento coincide con lo señalado por Zhang et al. (2014), quienes indican que las proteínas pueden interactuar con los almidones e impedir su retrogradación, reduciendo así la viscosidad final; además la baja VF fueron reportados por Jannasch & Wang, (2025), quienes indican que los valores absolutos de viscosidad tienden a ser menores que los obtenidos con equipos como el analizador rápido de viscosidad (RVA), ya que el tipo de esfuerzo aplicado es diferente; no obstante, lo relevante en estas evaluaciones no son necesariamente los valores numéricos, sino el perfil reológico resultante, el cual permite identificar fenómenos como la gelatinización, la desintegración de gránulos y la retrogradación durante el ciclo térmico.

La viscosidad pico como se señala la Tabla 11 mostró un buen ajuste de R^2 96,22% a los datos experimentales con un modelo cúbico especial, este comportamiento es comparable al estudio de Alberco, (2023) quien empleó un modelo lineal en mezclas de harina de cañihua, arroz y almidón de maíz, el cual logró un R^2 93,67%, lo que también evidenció estabilidad; asimismo, Vidaurre, (2020) obtuvo un R^2 de 98,50% con un modelo cuadrático usando harinas de quinoa, kiwicha y tarwi y Delarca et al. (2023) alcanzaron un R^2 de 99,2% aplicando un modelo cúbico en formulaciones a base de harinas de teosinte, arroz integral y arroz blanco; en comparación los resultados indican que el modelo propuesto presenta un ajuste adecuado, ya que se encuentra dentro de los rangos aceptables reportados en la literatura que a un R^2 mayor al 95 % es considerado altamente satisfactorio en estudios de mezcla Schober et al. (2018).

En cuanto a la viscosidad mínima presentó un bajo coeficiente de determinación de R^2 67,10% con un $p > 0,05$ como se señala la Tabla 11, lo que evidencia una escasa capacidad predictiva y un ajuste limitado del modelo a los datos experimentales; esta situación diferencia con lo reportado por Alberco, (2023), quienes obtuvieron para la viscosidad mínima un R^2 de 94,33%, con un valor $p < 0,05$; de manera similar, Delarca et al. (2023), obtuvieron un R^2 de 98,6% en

el modelo cúbico con un valor $p < 0,05$; esta diferencia según Schober et al. (2018), un valor bajo de R^2 puede deberse a que los datos presentan una alta variabilidad o a que el modelo utilizado no logra considerar todos los factores que influyen en la respuesta.

Del mismo modo en la viscosidad final, el modelo cúbico especial utilizado en esta variable presentó un bajo poder explicativo del modelo de R^2 53,47% con un $p > 0,05$ como se señala la Tabla 11, a diferencia de Alberco, (2023), quien obtuvo para la viscosidad final un R^2 de 99,10% en su modelo lineal, con un valor de $p < 0,05$, lo que evidencia una alta capacidad de ajuste y predicción de su modelo; por otro lado Delarca et al. (2023), reportaron en su modelo cúbico para la viscosidad final un R^2 de 98,1% con valor de $p < 0,05$; asimismo, como señala Schober et al. (2018), un bajo valor de R^2 puede ser indicativo de que el modelo no captura completamente la variabilidad de la respuesta, especialmente cuando existen efectos no lineales o interacciones no incluidas.

La ecuación del modelo cubico especial de la viscosidad pico, presentada en la Tabla 12, fue significativo ($p < 0,05$) se aprecia que los coeficientes positivos de los componentes indican que individualmente contribuyen al aumento de la viscosidad, además se destaca especialmente la interacción ternaria negativa, lo que sugiere que una mezcla equilibrada entre los tres componentes disminuye considerablemente esta propiedad; de manera similar, Delarca et al. (2023) también emplearon un modelo cúbico significativo para explicar la viscosidad pico en mezclas sin gluten a base de harina de teosinto, arroz integral y arroz blanco, encontrando efectos positivos en los términos individuales pero fuertes disminuciones en las interacciones, especialmente la ternaria; esta coincidencia entre estudios resalta que, en sistemas sin gluten, la viscosidad no depende únicamente del aporte de cada componente, sino de cómo interactúan en conjunto, lo que puede potenciar o inhibir el desarrollo de la red estructural de las mezclas durante el calentamiento.

La ecuación del modelo para la viscosidad mínima, presentada en la Tabla 12, se aprecia que los efectos individuales e interactivos de los componentes mostraron efectos combinados variados, donde algunas interacciones aumentaron y otras redujeron la viscosidad mínima; sin embargo, el modelo no fue estadísticamente significativo ($p > 0,05$), lo cual limita su capacidad predictiva; en contraste con Delarca et al. (2023) también utilizaron un modelo cúbico para describir la viscosidad mínima en formulaciones sin gluten a base de harinas de teosinto, arroz blanco e integral, y obtuvieron un ajuste estadísticamente significativo ($p < 0,05$); ambos

modelos incluyen efectos positivos y negativos en las interacciones, pero mientras en el presente estudio el término cúbico reflejó un aumento en la viscosidad mínima a comparación con Delarca que mostro un efecto reductor, esta comparación indica que, aunque se empleó la misma estructura de modelado, la respuesta de la viscosidad está influenciada por el tipo y la combinación específica de las componentes utilizadas.

La ecuación del modelo para la viscosidad final, presentada en la Tabla 12, se observó contribuciones positivas y negativas entre los efectos individuales y las interacciones, destacando la fuerte influencia positiva del almidón de papa y la interacción ternaria, aunque el modelo no fue estadísticamente significativo ($p > 0,05$), lo cual limita su capacidad predictiva; por otro lado, Delarca et al. (2023) también emplearon un modelo cúbico en mezclas de harinas sin gluten, obteniendo una ecuación estadísticamente significativa ($p < 0,05$), con mayores contribuciones de las harinas de arroz integral y blanco, y un efecto negativo marcado en la interacción ternaria; al comparar ambos modelos, comparando ambos modelos, se observa que en el presente estudio la viscosidad final está impulsada principalmente por el almidón y se incrementa con la combinación de los tres ingredientes, mientras que en el estudio de Delarca el efecto predominante lo tienen las harinas de arroz y la interacción ternaria reduce la viscosidad, lo que refleja diferencias notables en la interacción entre componentes según su tipo y composición funcional.

En la Figura 3 al comienzo del análisis algunos tratamientos aumentaron rápidamente su viscosidad, indica que la mezcla de almidón y harinas comenzó a gelatinizar antes que otros (Tester & Morrison, 1990), seguido durante la fase de mantenimiento térmico, la viscosidad bajó en todos los tratamientos, debido a que la estructura de las mezclas de almidón y harinas gelatinizadas se debilita por el calor y el movimiento del reómetro (Wang & Copeland, 2013); luego, al enfriar, la viscosidades volvieron a subir, como en el T2 y T13, lo que refleja que las mezclas comenzaron a reorganizarse o estabilizarse, un proceso conocido como retrogradación, por lo que la diferencia entre tratamientos se explican por los ingredientes y sus proporciones durante el calentamiento y enfriamiento, siendo esto clave para entender su comportamiento durante la elaboración del pan sin gluten (Tester & Morrison, 1990; Wang & Copeland, 2013).

En la Figura 4, la viscosidad pico, mínima y final se vieron reducidas por la diferente composición estructural de almidón y proteína de la harina de gandul, como señala (Navneet et al., 2025); estas harinas contienen menos almidón (40 – 50%) y se encuentran incrustados

en una matriz compacta de proteínas y otros componentes, dificultando su interacción con el agua y como consecuencia no logran hidratarse, hincharse y gelatinizarse completamente, generando un menor desarrollo de la viscosidad; en el caso de la harina de arroz a mayor proporción aumento la viscosidad pico pero redujo la viscosidad mínima y final, un efecto asociado al menor tamaño de partícula como menciona (Hasjim et al., 2013) se relaciona a una cantidad menor de proteína nativa y estructuras de la pared celular, responsables de estabilizar las pasta de almidón y evitar la ruptura de los gránulos de almidón hinchados por efecto del cizallamiento durante el calentamiento; y en el caso del almidón de papa se observó un aumento en las viscosidades a mayor proporción, debido a que el almidón gelatiniza relativamente fácil y produce pastas más viscosas que se desintegran con mayor facilidad, presentando de esta forma el aumento de las viscosidades (Dupuis & Liu, 2019).

5.2. Discusión de la textura instrumental del pan molde

En el presente estudio se obtuvo que la dureza varió entre $3,13 \pm 0,12$ N (T1) y $6,76 \pm 0,36$ N (T14) como se muestra en la Tabla 13, estos valores son comparables con los reportados por Tóth et al. (2022), el cual indica que en el pan molde blanco sin gluten comercial presenta valores entre 4,45 – 8,07 N ligeramente dentro del rango hallado en el presente trabajo; asimismo González et al. (2025) quienes desarrollaron un pan molde sin gluten a base de 54,64% de harina de arroz y 0,41% de goma xantana, con una dureza de la miga de $4,08 \pm 0,97$ N; de igual forma, Filipčev et al. (2021) elaboraron pan sin gluten con 90,7% de harina integral de trigo sarraceno y 7,3% de harina de algarroba, utilizando 0,5% de goma xantana, reportando una dureza de $3,05 \pm 0,29$ N; en cambio Huamaní et al. (2025) obtuvieron durezas entre $1,8 \pm 0,1$ N y $9 \pm 0,3$ N en panes elaborados con 50% de harina de arroz y 50% de almidón de papa, adicionando 3-5% de harina de tarwi okara nativo o modificado, con 0,5% de goma xantana, valores que también se encuentran parcialmente dentro del intervalo observado en este estudio, al comparar con los trabajos mencionados sugiere que la formulación utilizada, particularmente el empleo de goma xantana, contribuyó a alcanzar niveles adecuados de dureza, lo cual coincide con lo señalado por Culetu et al. (2021), quienes destacan que este hidrocólide, tiene la capacidad de retener agua por lo que tiende a reducir la dureza inicial en panes sin gluten; por otro lado, Ordaz (2010, como se citó en Alberco, 2023) indica que la harina de arroz por sí sola puede generar migas compactas y poco atractivas, por lo que la inclusión de ingredientes con alto contenido proteico o fibra puede ser beneficiosa para mejorar la textura y controlar la dureza, tal como indican Mezaize et al. (2009).

En cuanto a la masticabilidad se reportó valores de masticabilidad entre $1,08 \pm 0,17$ N (T1) y $3,72 \pm 0,25$ N (T14) como se muestra en la Tabla 13, estos resultados similares fueron a Tóth et al. (2022), en panes molde blanco sin gluten comercial, el cual registro valores entre 1,92–5,71 N similares a la presente investigación, asimismo Vidaurre (2020), quien desarrolló pan molde sin gluten con 0,5 % de goma xantana, harina de kiwicha (40,5 %) y tarwi (11,95 %) en el cual obtuvo una masticabilidad de $1,63 \pm 0,06$ N, del mismo modo, los valores obtenidos por Huamaní et al. (2025) que elaboraron pan molde sin gluten a base de 50% de harina de arroz y 50% de almidón de papa, incorporando 3–5% de harina de tarwi okara (nativo o modificado), reportando valores de masticabilidad entre 0,9 y 1,5 N; en comparación que a pesar de que todos estos estudios, emplearon goma xantana, que tiende a reducir la masticabilidad al suavizar la miga (Culetu et al., 2021; Roman et al., 2020), los valores más altos observados se explican por el mayor contenido proteico, el cual genera una miga más firme y compacta (Ordaz, 2010, como se citó en Alberco, 2023), esto indica que el efecto estructurante de las proteínas del gandul fue más determinante que la acción suavizante del hidocoloide, elevando así la masticabilidad frente a las formulaciones de otros autores.

En el presente estudio, la elasticidad varió entre $0,53 \pm 0,06$ (T1) y $0,78 \pm 0,02$ (T14), como se muestra en la Tabla 13; de acuerdo con Tóth et al. (2022), el pan molde blanco comercial presenta valores de elasticidad entre 0,68 y 0,94, por lo que algunos tratamientos se encuentran dentro de este rango; por otro lado se reportan datos ligeramente inferiores como Huamaní et al. (2025) quien obtuvieron elasticidades entre 0,8 y 1 al emplear harina de arroz, almidón de papa, harina de tarwi okara y 0,5 % de goma xantana en un pan molde; de forma similar, Vidaurre, (2020) alcanzó valores de $0,96 \pm 0,02$ y $0,89 \pm 0,02$ con formulaciones que incluían kiwicha, tarwi o quinua, también con goma xantana, asimismo Alberco, (2023), por su parte, reportó valores entre 0,88 y 0,90 con mezclas de arroz, cañihua, almidón de maíz y 1 % de goma xantana; en comparación, a pesar de la presencia de goma xantana en todas las formulaciones, su efecto estructurante parece haber sido menos efectivo en combinación con gandul, lo que sugiere una interacción desfavorable entre sus componentes ya que la elasticidad está relacionada con la capacidad del pan de recuperar su forma tras una deformación (Hager et al., 2012), estos valores relativamente bajos explican la menor esponjosidad observada y podrían asociarse con una mayor tendencia al desmigajado (McCarthy et al., 2005, como se citó en Alberco, 2023).

El modelo para la variable de dureza presentó un buen ajuste del modelo cubico especial con un R^2 de 93,6% y $p < 0,05$ como se muestra en la Tabla 14; estos resultados se asemejan parcialmente a los obtenidos por Alberco, (2023), quienes al elaborar pan molde a base de harina de cañihua, arroz y almidón de maíz, reportaron en su modelo polinomial para la dureza un R^2 de 90,95% y $p < 0,05$; por otro lado García y Mechán (2022), elaboraron un pan molde a base de harina de algarroba, kiwicha y almidón de papa, alcanzaron valores superiores mediante un modelo cuártico especial, con un R^2 de 97,10% y $p < 0,05$; mientras que Delarca et al. (2023), en su estudio de pan sin gluten elaborado con harina de teosinte, arroz integral y arroz blanco, obtuvieron en su modelo cúbico un R^2 de 92,8% y $p < 0,05$; por lo que en comparación de los resultados obtenidos con los estudios mencionados muestran que el modelo propuesto en el presente estudio tiene un ajuste aceptable dentro de los rangos comúnmente reportados, ya que según Schober et al. (2018), un R^2 mayor al 95 % es considerado altamente satisfactorio en estudios de mezcla.

El modelo para la variable de la masticabilidad presentó un buen ajuste del modelo cubico especial con un R^2 de 92,90% y $p < 0,05$ como se muestra en la Tabla 14; estos datos son comparables con Alberco, (2023), quien obtuvo en su modelo polinomial para la masticabilidad un R^2 de 89,24% y $p < 0,05$; en cambio Martínez & Olano (2025), alcanzaron en su modelo lineal para la masticabilidad un R^2 de 95,85% y $p < 0,05$, en conjunto, estos hallazgos sugieren que el modelo propuesto en el presente estudio presenta un ajuste adecuado para explicar la masticabilidad, ya que se ubica dentro de los rangos aceptables reportados en la literatura (Schober et al., 2018).

El modelo para la variable de la elasticidad presentó un buen ajuste del modelo cubico especial con un R^2 de 85,20% y $p < 0,05$ como se muestra en la Tabla 14; comparando con Martínez & Olano (2025), reportaron un excelente ajuste para el modelo cuadrático de elasticidad, con un R^2 de 97,90% y un $p < 0,05$; asimismo, Alberco, (2023), obtuvieron buenos niveles de ajuste con un R^2 de 95,16% y $p < 0,05$; aunque el R^2 obtenido en el presente estudio es menor en comparación con los valores reportados en otros trabajos, sigue siendo considerado aceptable debido al hecho de que el modelo presenta un valor de $p < 0,05$ lo cual indica que es estadísticamente significativo (Schober et al., 2018), lo cual respalda su utilidad para describir adecuadamente la relación entre los ingredientes y la elasticidad del pan sin gluten.

La ecuación del modelo para la dureza, presentada en la Tabla 15, fue significativa ($p < 0,05$), se observa que los componentes favorecieron positivamente en sus efectos individuales, pero mostraron una reducción de la dureza en las interacciones binarias, mientras que la interacción ternaria (ABC) generó un incremento considerable; en cambio Delarca et al. (2023) también utilizaron un modelo cúbico especial significativo ($p < 0,05$) para describir la dureza de pan sin gluten a partir de mezclas de harina de teosinto (TF), arroz integral (BRF) y arroz blanco (WRF), donde se observó una contribución positiva de los ingredientes individuales, mientras que las interacciones presentaron efectos leves que no modificaron significativamente el comportamiento del modelo; al comparar ambos estudios, se observa que en el presente trabajo las mezclas de ingredientes influyen de forma más marcada en la textura, mientras que en el estudio de Delarca, el comportamiento es más simple y las combinaciones no cambian tanto el resultado final.

La ecuación del modelo para la masticabilidad, presentada en la Tabla 15, resultó estadísticamente significativo ($p < 0,05$), lo que permite interpretar con confianza los efectos individuales e interactivos de los ingredientes; se observó que el almidón de papa tuvo el mayor impacto positivo sobre esta variable, mientras que las interacciones binarias presentaron efectos negativos considerables; sin embargo, la interacción ternaria ABC aportó positivamente, indicando que una formulación equilibrada de los tres componentes podría mejorar la masticabilidad del pan; por otro lado, el modelo cúbico especial propuesto por Miranda et al. (2020), incluyó cuatro componentes como la maca, fécula de patata, y dos tipos de harina de mandioca; sin embargo, no fue estadísticamente significativo ($p > 0,05$), lo que limita la fiabilidad de sus interpretaciones; aun así, destacan los altos coeficientes en varias interacciones binarias y una interacción ternaria negativa entre el almidón de papa, harina de mandioca dulce y acida, lo que sugiere que ciertas combinaciones pueden afectar negativamente la masticabilidad del pan sin gluten; en comparación, el presente estudio no solo logra un modelo estadísticamente válido, sino que también demuestra que una proporción balanceada entre los componentes del estudio, produce un efecto favorable a la masticabilidad del pan molde, mientras que el modelo de Miranda evidencia mayor inestabilidad y una menor claridad en los efectos de sus ingredientes sobre esta propiedad física.

La ecuación del modelo para la elasticidad, presentada en la Tabla 15, fue estadísticamente significativo ($p < 0,05$), en el cual se observa que, si bien los términos individuales presentan coeficientes negativos, la interacción ternaria tiene un efecto positivo que matiza el

comportamiento global del modelo, sugiriendo que la elasticidad mejora únicamente bajo combinaciones específicas de los tres componentes; por otro lado, el modelo cúbico especial utilizado por Miranda et al. (2020) para describir la elasticidad en panes sin gluten incluyó cuatro componentes como la maca, fécula de patata, y dos tipos de harina de mandioca, pero no resultó estadísticamente significativo ($p > 0,05$), lo cual limita la confiabilidad del modelo para interpretar el fenómeno; aun así se observa un patrón similar con efectos positivos en términos individuales, negativos en las interacciones binarias y positivos en las interacciones ternarias; al comparar ambos modelos, se evidencia que, aunque comparten estructura y ciertas tendencias, la mezcla evaluada en el presente estudio presentó una mayor sensibilidad a la interacción de sus componentes; el cual sugiera que si bien ambos estudios consideran los efectos combinados, en el presente estudio estos tienen un peso más determinante en la elasticidad del pan molde.

En la Figura 5 se observa que una mayor proporción de harina de gandul aumenta la dureza, masticabilidad y elasticidad, tal y como menciona Canale et al. (2025), los panes con mayor porcentaje de harina de frejoles tienden a ser más duros y masticables; por otro lado, la harina de arroz contribuyó a disminuir la dureza, la masticabilidad y la elasticidad del pan sin gluten, que de acuerdo con la literatura, a mayor inclusión de harina de arroz, se asocia al tamaño del pan y la suavidad del pan, efectos relacionados con la retrogradación del almidón (Ding et al., 2021); asimismo, el almidón de papa disminuyó ligeramente estas propiedades, lo cual concuerda con Aleman et al. (2021), donde afirma que la aplicación de almidón en mayor inclusión en formulaciones de panadería sin gluten demuestra una capacidad comprobada para reducir la dureza y la masticabilidad del pan.

5.3. Discusión de color instrumental del pan molde

5.3.1. Discusión del color instrumental de la corteza del pan molde

En el presente estudio se obtuvo en el color L^* de la corteza del pan molde sin gluten elaborado con harina de gandul (15 – 35%), arroz (20 – 30%) y almidón de papa (45 – 55%) valores entre $65,73 \pm 1,13$ (T11) y $55,00 \pm 0,57$ (T14) presentadas en la Tabla 16, indicando tonalidades de marrón claro a marrón medio; estos resultados se aproximan a los reportados por Huamaní et al. (2025), quienes desarrollaron panes a partir de harina de arroz (50%) y almidón de papa (50%), adicionando harina de tarwi okara (3 – 5%), obteniendo valores de luminosidad en la corteza entre $53,5 \pm 0,2$ y $59,3 \pm 0,3$, lo cual representa colores similares de marrón medio; en cambio, los valores reportados por Piluk et al. (2025) se acercan con valores desde $41,30 \pm 6,66$

y $50,16 \pm 2,52$, representando un color marrón oscuro hasta marrón medio; en conjunto, los valores de L^* obtenidos fueron similares a los de otros estudios y reflejan un pardeamiento no enzimático adecuado, atribuido a reacciones de Maillard y caramelización durante el horneado; este oscurecimiento se relaciona con el contenido de proteínas y la reducción de agua libre (Sader de Melo, 2018; Huamaní et al., 2025); además, el color depende de la composición de los ingredientes y su interacción con hidrocoloides (Mezaize et al., 2009), así como del proceso de formación de corteza y la intensidad del pardeamiento (Wagner et al., 2007 y Feillet et al., 2000, como se citó en Alberco, 2023).

En cuanto al color a^* de la corteza oscilaron entre $4,32 \pm 0,10$ (T11) y $11,85 \pm 0,97$ (T4) presentadas en la Tabla 16, lo que indica tonalidades rojizas de baja a moderada intensidad; estos resultados son comparables a los reportados por Mognaschi, (2024), quienes elaboraron 2 panes molde a base de harina garbanzo germinado y sin germinar con harina de arroz (29%), sorgo (15%), almidón de maíz (15%), obteniendo valores de a^* de $8,91 \pm 0,45$ en el pan sin gluten con garbanzo sin germinar, correspondiente a una tonalidad ligeramente rojiza, y $10,43 \pm 4,49$ en el pan con garbanzo germinado, que representa una tonalidad moderadamente rojiza; asimismo, Huamaní et al., (2025), al emplear mezclas de harina de arroz (50%) y almidón de papa (50%) con adición de harina de tarwi okara (3–5%), registraron valores de a^* entre 11,4 y 13,2, correspondientes a una tonalidad rojiza intensa, similares al valor máximo obtenido en el presente estudio; en comparación la presencia de tonos rojizos en la corteza se atribuye a reacciones de Maillard y caramelización durante el horneado (Sader de Melo, 2018), estas reacciones, influenciadas por la composición de harinas, hidrocoloides y condiciones térmicas, determinan la intensidad del color (Mezaize et al., 2009; Feillet et al., 2000, como se citó en Alberco, 2023), por ello, las diferencias en los valores de a^* entre estudios responden a la formulación y el proceso térmico empleado.

El componente b^* del color de la corteza varió entre $27,71 \pm 0,77$ (T12) y $37,28 \pm 1,31$ (T4) presentadas en la Tabla 16, lo que indica una tendencia hacia tonalidades amarillas medias a intensas; estos valores son comparables con los reportados por Piluk et al. (2025), quienes obtuvieron valores de b^* entre $28,72 \pm 0,94$ y $31,58 \pm 3,49$ en panes molde a base de polvo de clara de huevo (65 – 79%) y almidón resistente tipo 4 (21 – 35%); de forma similar, Huamaní et al, (2025) reportaron tonalidades amarillo medio a intenso con valores de b^* entre 33,9 y 34,7 al emplear harina de arroz (50%) y almidón de papa (50%) combinadas con harina de

tarwi okara (3 – 5%); asimismo, Alberco, (2023) encontró valores de b^* entre $19,07 \pm 1,13$ y $27,16 \pm 0,42$, tonalidades que varían de amarillo claro a intenso en panes sin gluten elaborados con harina de arroz (20 – 30%), cañihua (30 – 50%) y almidón de maíz (30 – 40%), presentando una ligera cercanía al límite inferior de este estudio; en comparación, las tonalidades amarillas de la corteza varían según la formulación, influenciadas no solo por el color de los ingredientes, sino también por reacciones de Maillard y caramelización durante el horneado (Sander, 2018; Mezaize et al., 2009); estas reacciones se intensifican tras la deshidratación superficial (Wagner et al, 2007, como se citó en Alberco, 2023) además Huamaní et al. (2025) también relacionaron el oscurecimiento con mayor contenido de proteína y menor agua libre.

El modelo para la variable de color corteza L^* presentó un buen ajuste del modelo cúbico especial con un R^2 de 97,68% y $p < 0,05$ como se muestra en la Tabla 17, comparando con Alizadeh et al. (2022), quienes elaboraron pan sin gluten a base de harina de arroz, maíz, quinua, almidón de maíz y goma xantana (0–0,5%), reportaron un modelo cúbico reducido para el color L^* de la corteza, con un R^2 de 99,25% y un $p < 0,05$, asimismo, Delarca et al. (2023), quienes elaboraron pan molde a base de harinas de teosinte, arroz integral y arroz blanco, reportaron un modelo cúbico para el color L^* de la corteza, con un R^2 de 80,9% y $p < 0,05$; en comparación, los resultados indican que el modelo propuesto presenta un ajuste adecuado, ya que, como señala Schober et al. (2018), un coeficiente de determinación (R^2) superior al 95 % se considera altamente satisfactorio en estudios de diseño de mezclas.

El modelo para la variable de color corteza a^* presentó un bajo ajuste del modelo cubico especial con un R^2 de 66,72% y $p > 0,05$ como se muestra en la Tabla 17, en comparación con Delarca et al. (2023), reportaron un modelo cúbico para el parámetro a^* de la corteza con un R^2 de 95,6% y $p < 0,05$, asimismo, Alizadeh et al. (2022), obtuvieron valores aún más altos de ajuste para dicho parámetro, reportaron un R^2 de 98,12% y $p < 0,05$; sus resultados, en comparación con los del presente estudio, evidencian una mayor eficacia del modelo para explicar la variabilidad del color en función de los ingredientes y aditivos empleados, esto concuerda con lo señalado por Schober et al. (2018), quien indica que un bajo valor de R^2 puede reflejar que el modelo no capta completamente la variabilidad de la respuesta, especialmente cuando existen efectos no lineales o interacciones no contempladas

El modelo para la variable de color corteza b^* presentó un bajo ajuste del modelo cubico especial con un R^2 de 63,35% y $p > 0,05$ como se muestra en la Tabla 17; en contraste, Alizadeh

et al. (2022), obtuvieron un ajuste notablemente superior en el valor b^* de la corteza con un modelo cúbico reducido, alcanzando un R^2 de 98,12% y $p < 0,05$; de manera similar, Delarca et al. (2023), reportaron un modelo cúbico para el valor b^* de la corteza con un R^2 de 87,7% y $p < 0,05$, mostrando una mayor capacidad del modelo para representar la variación del color; el modelo del presente estudio muestra una menor capacidad para explicar la variabilidad del color, lo cual, según Schober et al. (2018), podría deberse a un bajo valor de R^2 causado por interacciones entre ingredientes, es decir, combinaciones que generan efectos distintos a los esperados de manera individual, así como por efectos no lineales, donde el cambio en la respuesta no guarda una relación proporcional con las cantidades de los factores evaluados.

La ecuación del modelo para el color de la corteza L^* , presentada en la Tabla 18, fue modelado con un diseño cúbico especial, obteniéndose un modelo estadísticamente significativo que mostró un aumento en la luminosidad con la harina de gandul, arroz y almidón de papa; no obstante, al analizar las interacciones, se aprecia que, aunque algunas combinaciones binarias contribuyen positivamente, la interacción ternaria entre los tres ingredientes genera una marcada reducción en la luminosidad, indicando que una mezcla equilibrada tiende a oscurecer la corteza del pan; este comportamiento fue comparado con el estudio de Delarca et al. (2023), quienes también aplicaron un modelo cúbico especial para evaluar el color L^* de la corteza en panes sin gluten formulados con harina de teosinto, arroz blanco y arroz integral; en su caso, los efectos individuales también fueron positivos, pero las interacciones tuvieron un impacto mínimo, manteniendo una luminosidad más estable; esta comparación resalta que, a diferencia del estudio de Delarca, donde las interacciones entre ingredientes fueron leves, en este trabajo se observó que el color de la corteza está fuertemente influenciado por el efecto combinado de los tres componentes, especialmente cuando se encuentran en proporciones similares.

La ecuación del modelo para el color de la corteza a^* , presentada en la Tabla 18, presentó coeficientes de gran magnitud, especialmente en las interacciones, donde destaca un efecto ternario positivo marcado, sin embargo, el modelo no resultó estadísticamente significativo ($p > 0,05$); en contraste, el estudio de Delarca et al. (2023) también empleó un modelo cúbico especial para predecir el color a^* de la corteza, obteniendo una ecuación estadísticamente significativa ($p < 0,05$), con coeficientes más pequeños y efectos suaves tanto en los términos individuales como en las interacciones; en comparación se aprecia diferencias en la magnitud y comportamiento de las mezclas ya que en el presente estudio las interacciones tienen un

mayor impacto numérico sobre el color y en el modelo de Delarca, los cambios en a^* son más sutiles, lo cual puede estar relacionado con la naturaleza de las harinas empleadas, la composición del producto y la respuesta del sistema al combinar los ingredientes.

La ecuación del modelo para el color de la corteza b^* , presentada en la Tabla 18, presento aportes individuales positivos, pero con interacciones binarias negativas destacadas, especialmente entre arroz y almidón ($-90,90$), mientras que la interacción ternaria resultó positiva ($+114,11$), sin embargo, el modelo no fue estadísticamente significativo ($p > 0,05$); por otro lado, Delarca et al, (2023) también utilizaron un modelo cúbico especial para evaluar b^* en corteza, obteniendo una ecuación significativa ($p < 0,05$) con efectos individuales e interactivos positivos, pero de menor magnitud, lo que sugiere un comportamiento más estable y predecible en su formulación; en comparación, los resultados del presente estudio evidencian una mayor complejidad en la respuesta del color b^* , posiblemente atribuida a diferencias en los tipos de harinas empleadas, la composición de cada mezcla y su efecto conjunto sobre la coloración durante el horneado.

En la Figura 6 se observa que el aumento de la proporción de harina de arroz y almidón de papa incrementa la luminosidad en la corteza, mientras que una mayor proporción de harina de arroz y una menor proporción de harina de gandul incrementan los valores de a^* y b^* en la corteza; este comportamiento concuerda con lo reportado por Esteller & Lannes, (2008) quienes indican que una mayor luminosidad en la corteza se asocia con el alto contenido de almidón y menor contenido de proteínas, lo que reduce la intensidad de las reacciones de Maillard durante el horneado; asimismo da lugar a una menor intensidad de los tonos rojizos y amarillos en la corteza (Ronie et al., 2023).

5.3.2. Discusión del color instrumental de la miga del pan molde

En el presente estudio, el valor de L^* del color de la miga del pan molde sin gluten elaborado con harina de gandul (15–35%), harina de arroz (20–30%) y almidón de papa (45–55%), con 0,5% de goma xantana, osciló entre $58,56 \pm 1,88$ (T5) y $65,45 \pm 2,19$ (T4) como se presenta en la Tabla 19, correspondientes a tonalidades desde beige tostado hasta beige muy claro; estos valores son comparables con Huamaní et al. (2025), quienes elaboraron pan molde sin gluten con harina de arroz (50%) y almidón de papa (50%) con la incorporación de 3–5% de harina de tarwi okara (nativo y modificado), registrando valores de L^* entre $59,6 \pm 0,3$ y $62,6 \pm 0,1$,

lo que corresponde a tonos entre beige medio cálido y beige claro; de igual forma, Mognaschi, (2024) desarrollaron dos panes molde sin gluten a base harina de garbanzo germinado (15%) y sin germinar (15%), las dos con harinas de arroz (29%), sorgo (15%), almidón de maíz (15%), reportando valores de L^* en la miga de $53,12 \pm 1,87$ y $55,57 \pm 1,82$ en el pan molde de harina de garbanzo germinado y sin germinar respectivamente, los cuales se asociaron a tonalidades que van desde marrón claro hasta beige medio oscuro; en comparación, estos resultados confirman que las diferencias en el valor de L^* en la miga se deben al tipo de harinas y almidones utilizados tal y como indica Gómez et al. (2007), que señala que en la miga no ocurren reacciones de Maillard por la baja temperatura interna en el horneado, por lo que su color depende del tono natural de los ingredientes generando migas claras con harinas claras y migas oscuras con harinas oscuras.

En cuanto al componente a^* en la miga, los valores observados en los panes de molde elaborados a base de harina de gandul (15–35%), harina de arroz (20–30%), almidón de papa (45–55%) oscilaron entre $-0,07 \pm 0,21$ (T1) y $2,27 \pm 0,35$ (T14) como se presenta en la Tabla 19, lo que representa tonalidades que varían desde una ligera tendencia al verde hasta un tono rojizo leve; estos resultados son comparables con los reportados por Mognaschi, (2024), quienes elaboraron dos tipos de pan a base de harina de garbanzo germinado (15%) y sin germinar (15%), junto con harina de arroz (29%), sorgo (15%) y almidón de maíz (15%), obteniendo valores de a^* en la miga de $-0,07 \pm 0,17$ y $0,21 \pm 0,21$, correspondientes a tonalidades que van desde una leve tendencia al verde hasta un tono neutro con ligera inclinación al rojo; asimismo, Huamaní et al. (2025), al desarrollar panes sin gluten con 50% de harina de arroz, 50% de almidón de papa y 3–5% de harina de tarwi okara, registraron valores de a^* entre $1,24 \pm 0,07$ y $1,47 \pm 0,04$, correspondientes a tonalidades que varían desde una baja saturación de rojo hasta un tono ligeramente rojizo, coincidiendo con el rango observado en el presente estudio; por otro lado, Guzmán et al. (2023), al utilizar microalga *C. vulgaris* (2 a 6%), con harina de trigo sarraceno (11,71%), arroz integral (11,71%), almidón de maíz (11,71%), fécula de papa (3,75%), *Plantago Syllium* (1,41%) y 0,94 % de goma xantana, reportaron valores de a^* en miga de $2,17 \pm 1,48$ a $3,00 \pm 0,26$, tonalidades que oscilan entre un tono rojizo bajo y un rojizo suave, ligeramente superiores; en comparación, todos los estudios muestran un rango similar de tonalidades, desde ligera tendencia al verde hasta rojizas suaves, lo que sugiere que las diferencias en el valor de a^* se deben principalmente al color natural de las harinas e ingredientes empleados, ya que en la miga no se desarrollan reacciones de Maillard

debido a que la temperatura interna alcanzada durante el horneado no es suficiente para activarlas (Gómez et al., 2007).

En cuanto al componente b^* en la miga, los panes de molde elaborados a base de harina de gandul (15–35 %), harina de arroz (20–30 %), almidón de papa (45–55 %) presentaron valores entre $18,23 \pm 1,68$ (T1) y $23,19 \pm 0,82$ (T14) como se presenta en la Tabla 19, correspondientes a tonalidades que van desde amarillo claro hasta amarillo intenso; estos resultados son ligeramente superiores al de Alberco, (2023), quien empleó harina de arroz (20–30 %), cañihua (30–50 %) y almidón de maíz (30–40 %), reportando valores de b^* entre $15,59 \pm 0,17$ y $17,72 \pm 0,21$, lo que indica una coloración desde amarillo claro tenue hasta amarillo claro; asimismo, Guzmán et al. (2023), al elaborar pan molde con diferentes proporciones de microalga *Chlorella vulgaris* (2–6 %), junto con harina de trigo sarraceno (11,71 %), arroz integral (11,71 %), almidón de maíz (11,71 %), fécula de papa (3,75 %) y *Plantago psyllium* (1,41 %), reportaron valores de b^* entre $16,90 \pm 1,48$ y $18,43 \pm 1,36$, correspondientes a tonalidades desde amarillo claro suave hasta amarillo medio suave; en comparación, todos los estudios muestran una tendencia hacia tonalidades amarillas, con variaciones atribuibles al tipo y proporción de harinas y almidones empleados tal como menciona Gómez et al. (2007), que indica que estas diferencias se deben al color natural de los ingredientes, ya que en la miga no ocurren reacciones de Maillard debido a la baja temperatura interna durante el horneado.

El modelo obtenido para la variable de color de miga L^* presentó un bajo ajuste con el modelo cúbico especial, evidenciado por un coeficiente de determinación R^2 de 70,13% y un valor de $p > 0,05$, como se muestra en la Tabla 20; en contraste, Alberco, (2023), quien formuló pan molde a base de harinas de cañihua, arroz y almidón de maíz, reportó un modelo polinomial con una alta capacidad explicativa evidenciando un R^2 de 98,37% y un valor de $p < 0,05$; de manera similar, Delarca et al. (2023) trabajaron con mezclas sin gluten elaboradas con harina de teosinte, arroz integral y arroz blanco para panificación, obteniendo un R^2 de 92,7% para la luminosidad de la miga, aplicando también un modelo cúbico con significancia estadística de $p < 0,05$; estos resultados muestran que los modelos propuestos por los anteriores autores fueron más efectivos para explicar la variabilidad del color L^* de la miga, en comparación con el modelo del presente estudio; esto podría deberse a diferencias en la naturaleza de los ingredientes o a interacciones específicas entre componentes que no fueron significativas en este caso ya que como señala Schober et al. (2018), un bajo R^2 puede reflejar limitaciones del modelo para captar completamente la variación de la respuesta.

El modelo obtenido para la variable de color de miga a^* presentó un buen ajuste con el modelo cúbico especial, evidenciado por un coeficiente de determinación R^2 de 89,67% y un valor de $p < 0,05$, como se muestra en la Tabla 20, en comparación, Delarca et al. (2023), reportaron para la miga a^* un modelo cúbico con un R^2 de 99,4% y $p < 0,05$, aunque ambos modelos son estadísticamente adecuados, el mayor R^2 reportado por Delarca sugiere una mejor capacidad predictiva del color de la miga a^* en su formulación; no obstante, según Schober et al. (2018), un valor de $p < 0,05$ indica que el modelo obtenido en este estudio también es estadísticamente confiable.

El modelo obtenido para la variable de color de miga b^* presentó un bajo ajuste con el modelo cúbico especial, con un coeficiente de determinación R^2 de 83,74% y un valor de $p < 0,05$, como se muestra en la Tabla 20; en comparación con Delarca et al. (2023) reportaron un modelo cúbico con un R^2 de 75,5% y $p < 0,05$ para esta misma variable; si bien la diferencia entre ambos R^2 no es muy amplia, el modelo obtenido en el presente estudio demuestra una mayor capacidad para explicar la variabilidad del color b^* de la miga; ya que según Schober et al. (2018), esto podría atribuirse a que la formulación empleada permitió representar con mayor precisión las interacciones entre ingredientes y la complejidad del sistema, lo cual favorece un mejor ajuste estadístico del modelo.

La ecuación del modelo para el color de la miga L^* , presentada en la Tabla 21, mostró efectos positivos individuales de los tres componentes, mientras que las interacciones binarias presentaron efectos tanto negativos como positivos, y la interacción ternaria tuvo un coeficiente positivo moderado; sin embargo, este modelo no resultó estadísticamente significativo ($p > 0,05$), lo cual limita su capacidad predictiva; por otro lado, Delarca et al. (2023) también utilizaron un modelo cúbico especial para el color L^* de la miga, en el que los tres componentes, harina de teosinto, arroz integral y arroz blanco, mostraron efectos positivos individuales, pero todas las interacciones, incluidas las binarias y la ternaria, fueron negativas, aunque de magnitud muy baja; a diferencia del presente estudio, el modelo de Delarca fue estadísticamente significativo ($p < 0,05$), lo que refleja una mayor estabilidad en el comportamiento de sus ingredientes, lo cual evidencia que aunque ambos estudios utilizaron el mismo tipo de modelo y la interacción de las materias primas influyeron de manera distinta en la luminosidad de la miga, afectando la significancia estadística y el comportamiento final del color.

La ecuación del modelo para el color de la miga a^* , presentada en la Tabla 21, fue estadísticamente significativa ($p < 0,05$), en el que todos los ingredientes individuales contribuyen positivamente al incremento del tono rojizo, mientras que las interacciones binarias reducen dicho valor y la interacción ternaria lo incrementa notablemente; de forma similar, Delarca et al. (2023) ajustaron un modelo cúbico especial significativo para el mismo parámetro, utilizando harinas de teosinto, arroz integral y arroz blanco, en el que los efectos individuales e interacciones mostraron coeficientes muy bajos, positivos y negativos, indicando un comportamiento más atenuado del color rojizo en función de la mezcla; en comparación, el modelo obtenido en el presente estudio presenta mayor variabilidad en los coeficientes, lo que sugiere que los ingredientes empleados tienen un impacto más pronunciado sobre el componente rojo del color de la miga, tanto de forma individual como combinada.

La ecuación del modelo para el color de la miga b^* , presentada en la Tabla 21, fue estadísticamente significativa ($p < 0,05$) permitiendo describir adecuadamente el efecto combinado de la harina de gandul, arroz y almidón de papa sobre la tonalidad amarilla del pan; en este modelo, se observa que, si bien los ingredientes presentan efectos individuales positivos, las interacciones entre ellos modifican ese comportamiento, destacando una interacción ternaria con efecto positivo que sugiere un incremento del color b^* cuando los tres componentes se combinan; de manera similar, Delarca et al. (2023) reportan que sus efectos individuales también fueron positivos, aunque de menor magnitud, y todas las interacciones, incluidas la ternaria, mostraron efectos negativos muy leves, lo que indica un sistema más estable y con menor sensibilidad a las combinaciones; en conjunto, ambos modelos reflejan la influencia de la composición sobre el color de la miga, pero el presente estudio revela un comportamiento más marcado y dependiente de las interacciones, especialmente cuando se combinan los tres ingredientes en proporciones similares.

En la Figura 7 se evidencia que la disminución de la proporción de harina de gandul y el aumento de la harina de arroz incrementan la luminosidad de la miga, mientras que una mayor proporción de harina de gandul y una menor proporción de almidón de papa favorecen el aumento de los valores de a^* y b^* de la miga, este comportamiento se relaciona que el color de la miga está determinado por el color propio de la harinas y de los ingredientes utilizados en la formulación, tal como lo reportaron Gómez et al., (2003, 2011) esto se debe a que en la miga del pan no se producen reacciones de Maillard, ya que la temperatura alcanzada en el interior durante el horneado no es suficiente para que dichas reacciones ocurran (Sader de Melo, 2018).

VI. CONCLUSIONES

- Se determinó que existe influencia significativa ya que la harina de gandul (*Cajanus cajan*) disminuyo la viscosidad pico, mínima y final, incrementó significativamente la dureza, masticabilidad y elasticidad, su aumento reduce la luminosidad en la corteza y miga; en cuanto a la harina de arroz (*Oryza sativa*) redujo la dureza, masticabilidad y elasticidad, aumento la luminosidad y el valor de a^* en la corteza, además incremento b^* en la miga y la corteza; y el almidón de papa (*Solanum tuberosum*) genero mayor viscosidad pico, mínima y final, aumento la luminosidad en la corteza, y su reducción provoco menor valor en b^* en la corteza y miga; influyendo así en las propiedades físicas del pan molde y de sus mezclas.
- Se determinó las propiedades reológicas de empaste de las 14 mezclas a partir de la harina de gandul (*Cajanus cajan*), arroz (*Oryza sativa*) y almidón de papa (*Solanum tuberosum*), la viscosidad pico presentó el valor mínimo de 63,84 cP en el tratamiento T12 y máximo de 98,65 cP en el tratamiento T1, la viscosidad mínima varió entre 1,43 cP (T12) y 6,64 cP (T2) y la viscosidad final osciló entre 11,50 cP (T12) y 71,36 cP (T2).
- Se determinó la textura instrumental de los 14 panes de molde a partir de la harina de gandul (*Cajanus cajan*), arroz (*Oryza sativa*) y almidón de papa (*Solanum tuberosum*), en el cual se observó valores de dureza entre el valor mínimo de 3,13 N en el tratamiento T1 y máximo de 6,76 N en el tratamiento T14, en cuanto a la masticabilidad resultaron valores entre 1,08 N (T1) y 3,72 N (T14) y elasticidad entre 0,53 (T1) y 0,78 (T14).
- Se determinó el color instrumental de la corteza y la miga de los 14 panes de molde a partir de harina de gandul (*Cajanus cajan*), arroz (*Oryza sativa*) y almidón de papa (*Solanum tuberosum*); con respecto al color de la corteza, la luminosidad (L^*) varió entre el valor de 55,00 (T14) y 65,73 (T11) que indica una variación de tonalidades oscuras a más claras, en el componente a^* se obtuvo valores entre 4,32 (T11) y 11,85 (T4), lo que indica una variación entre tonos ligeramente rojizos hasta rojo intenso; en el componente b^* osciló entre 27,71 (T12) y 37,28 (T4), correspondiente a tonos amarillo claro a amarillo intenso y en cuanto al color de la miga, la luminosidad (L^*) osciló entre 59,77 (T5) y 64,30 (T4), indicando un color ligeramente opaco hasta más claro, en el componente a^* se registraron valores entre -0,01 (T1) y 2,66 (T14) lo que indica variación de un tono ligeramente verdoso a un ligero matiz rojizo y para el componente b^* , los valores oscilaron entre 19,62 (T2) y 24,08 (T10), que indican una coloración amarilla moderada a una más pronunciada.

VII. RECOMENDACIONES

- Incorporar una evaluación sensorial que permita relacionar las propiedades físicas del pan molde a partir de harina de gandul (*Cajanus cajan*), arroz (*Oryza sativa*) y almidón de papa (*Solanum tuberosum*) con la percepción del consumidor, especialmente en términos de textura, color y aceptación general.
- Realizar estudios de vida útil del pan molde, en diferentes condiciones de almacenamiento, para observar cómo cambia su textura, color y calidad en el tiempo.
- Evaluar otras propiedades físicas no consideradas en este estudio, como pérdida de humedad de horneado, densidad aparente, estructura alveolar, con el fin de obtener una caracterización más completa del pan molde sin gluten.
- Caracterizar mediante un análisis fisicoquímico al pan molde a partir de harina de gandul (*Cajanus cajan*), arroz (*Oryza sativa*) y almidón de papa (*Solanum tuberosum*), así como cada una de las materias primas empleadas.

VIII. REFERENCIAS

- Aedo, K. (2023). *Evaluación de la biodisponibilidad de hierro en galletas libres de gluten sustituidas con harina de quinoa (*Chenopodium quinoa*), harina de maíz (*Zea mays* L.) y cushuro en polvo (*Nostoc sphaericum*)* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. Repositorio UNSCH. <https://shorturl.at/oAX6r>
- Ahmad, D., Ying, Y., & Bao, J. (2024). Understanding starch biosynthesis in potatoes for metabolic engineering to improve starch quality: A detailed review. *Carbohydrate Polymers*, 346, 122592. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122592>
- Airaksinen, L., Cerqueira, J., Huhtala, H., Saavalainen, P., Yohannes, D., Mäki, M., Kurppa, K., Kilpeläinen, E., Shcherban, A., Palotie, A., Kaukinen, K., & Lindfors, K. (2021). Dissecting the contribution of single nucleotide polymorphisms in CCR9 and CCL25 genomic regions to the celiac disease phenotype. *Journal of Translational Autoimmunity*, 4, 100128. <https://doi.org/10.1016/j.jtauto.2021.100128>
- Alberco, C. (2023). *Elaboración de pan sin gluten utilizando harina de cañihua (*Chenopodium pallidicaule*), arroz (*Oryza sativa*) y almidón de maíz (*Zea mays*)* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional Lamolina. <https://shorturl.at/WgNLs>
- Aleman, R., Paz, G., Morris, A., Prinyawiwatukul, W., Moncada, M., & King, J. (2021). High protein brown rice flour, tapioca starch & potato starch in the development of gluten-free cupcakes. *LWT*, 152, 112326. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112326>
- Alizadeh, G., Lakzadeh, L., Forootanfar, H., & Akhavan, H. (2022). Optimization of gluten-free bread production with low aflatoxin level based on quinoa flour containing xanthan gum and laccase enzyme. *International Journal of Biological Macromolecules*, 200, 61–76. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.12.091>
- Baldera, K., Chaupis, D., Cárcamo, C., Holmes, K., & García, P. (2020). Seroprevalencia poblacional de la enfermedad celíaca en zonas urbanas del Perú. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 37(1), 63–66. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2020.371.4507>
- Balet, S., Guelpa, A., Fox, G., & Manley, M. (2019). Rapid visco analyser (RVA) as a tool for measuring starch-related physiochemical properties in cereals: a Review. *Food Analytical Methods*, 12(10), 2344–2360. <https://doi.org/10.1007/s12161-019-01581-w>
- Bastidas, A. (2023). *Evaluación del comportamiento productivo de cuyes (*Cavia porcellus*) con tres niveles de harina de gandul (*Cajanus cajan*), incorporado a la dieta como*

- suplemento alimenticio, etapa de levante y acabado* [Trabajo de pregrado, Universidad Técnica de Babahoyo]. UTB Repositorio Institucional. <https://shorturl.at/OpVSD>
- Bhandari, R. (2025). *Perspectivas del mercado de productos sin gluten en Perú (2025-2031) | Tamaño, análisis, participación, tendencias, ingresos, crecimiento, pronóstico, empresas, industria y valor*. 6Wresearch. <https://www.6wresearch.com/industry-report/peru-gluten-free-products-market>
- Cáceres, J. (2024). *La harina de arroz (Oryza sativa) y el comportamiento de algunas características fisicoquímicas en el pan libre de gluten elaborado* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Callao]. Repositorio UNAC. <https://shorturl.at/GrfjC>
- Canale, M., Sanfilippo, R., Moscaritolo, S., Fiore, M., Strano, M., Allegra, M., Fascella, G., Gugliuzza, G., & Spina, A. (2025). Qualitative characteristics of semolina–pulse flour mixes and related breads. *Foods*, 14(21), 3720. <https://doi.org/10.3390/foods14213720>
- Canahuati, J. (2020). *Estandarización de pastel sin gluten utilizando diseño de experimentos en panadería “La hormiga vainilla”* [Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica Centroamericana]. Repositorio UNITEC. <https://shre.ink/tyG9>
- Cappa, C., Lucisano, M., & Mariotti, M. (2013). Influence of psyllium, sugar beet fibre and water on gluten-free dough properties and bread quality. *Carbohydrate Polymers*, 98(2), 1657–1666. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.08.007>
- Coaquira, D. (2023). Evaluación de las propiedades fisicoquímicas, funcionales y reológicas del almidón de cushuco (*Lilaeopsis macloviana*) extraído por los métodos de decantación y centrifugación [Tesis pregrado, Universidad Nacional de Juliaca]. Repositorio UNAJ. <https://shre.ink/tyGn>
- Culet, A., Duta, D., Papageorgiou, M., & Varzakas, T. (2021). The role of hydrocolloids in gluten-free bread and pasta; rheology, characteristics, staling and glycemic index. *Foods*, 10(12), 3121. <https://doi.org/10.3390/foods10123121>
- Delarca, F., Alemán, R., Kazemzadeh, S., Sarmiento, M., Muela, A., Mendoza, Y., Marcia, J., Prinyawiwatkul, W., & King, J. (2023). Development of gluten-free bread using teosinte (*Dioon mejiae*) flour in combination with high-protein brown rice flour and high-protein white rice flour. *Foods*, 12(11), Article 2132. <https://doi.org/10.3390/foods12112132>
- Ding, X.-L., Wang, L.-J., Li, T.-T., Wang, F., Quan, Z.-Y., Zhou, M., Huo, Z.-Y., & Qian, J.-Y. (2021). Pre-gelatinisation of rice flour and its effect on the properties of gluten free rice bread and its batter. *Foods*, 10(11), 2648. <https://doi.org/10.3390/foods10112648>

- Djeukeu, W., Assiene, J., Dongho, F., Boudjeka, V., Demasse, A., Nyangono, F., Fongzossie, E., & Gouado, I. (2024). Improving gluten-free bread volume using additives: A review. *Food Chemistry Advances*, 5, 100738. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100738>
- Dupuis, J., & Liu, Q. (2019). Potato starch: a review of physicochemical, functional and nutritional properties. *American Journal of Potato Research*, 96(2), 127–138. <https://doi.org/10.1007/s12230-018-09696-2>
- El Juguero. (2025). *Tendencias del consumo de pan en Perú este 2025*. Surtido. <https://surtido.pe/tendencias-del-consumo-de-pan-en-peru-este-2025/>
- Eser, A. (2025). *Estadísticas de la industria del pan*. WifiTalents. <https://wifitalents.com/bread-industry-statistics/>
- Esteller, M., & Lannes, S. (2008). Production and characterization of sponge-dough bread using scalded rye. *Journal of Texture Studies*, 39(1), 56–67. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2007.00130.x>
- Ferreira, R., Wessel, D., Silva, A., Saraiva, J., & Cardoso, S. (2024). Production of opuntia ficus-indica fortified breads: a comparative analysis of wheat and gluten-free varieties and the impact on phytochemicals and antioxidant capacity. *Food and Bioproducts Processing*, 147, 251–263. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2024.07.005>
- Ferrin, C., & Endara, M. (2022). *Efecto de la harina de frejol de palo (Cajanus cajan L.) en la calidad bromatológica y sensorial de galletas dulces*. [Tesis pregrado, Universidad Técnica De Manabí]. Repositorio Institucional UTM. <https://shre.ink/tyGm>
- Filipčev, B., Pojić, M., Šimurina, O., Mišan, A., & Mandić, A. (2021). Psyllium as an improver in gluten-free breads: effect on volume, crumb texture, moisture binding and staling kinetics. *LWT*, 151, 112156. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112156>
- García, J. (2021). *Determinación de la vida útil del pan molde libre de gluten con quinua (Chenopodium quinoa)* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional Lamolina. <https://shre.ink/tyhY>
- García, O., Aiello, C., Peña, M., Ruiz, J., & Acevedo, I. (2012). Caracterización físico-química y propiedades funcionales de la harina obtenida de granos de quinchoncho (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.) sometidos a diferentes procesamientos. *Revista Científica UDO Agrícola*, 12(3), 689–699. <https://acortar.link/ZnkVBf>
- García, R., & Mechán, J. (2022). *Optimización de las características texturales y sensoriales del pan de molde a base de harina de Prosopis pallida, Amaranthus caudatus y almidón de papa*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. Repositorio Institucional UNPRG. <https://bit.ly/4bS6Jnr>

- García, Y., Cabrera, D., & Fuenmayor, C. (2020). Obtención y caracterización de harinas compuestas de Cucurbita moschata D. y Cajanus cajan L. como fuentes alternativas de proteína y vitamina A. *Acta Agronómica*, 69(2), 89–96. <https://doi.org/10.15446/acag.v69n2.80412>
- Gómez, M., Jiménez, S., Ruiz, E., & Oliete, B. (2011). Effect of extruded wheat bran on dough rheology and bread quality. *LWT - Food Science and Technology*, 44(10), 2231–2237. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.06.006>
- Gómez, M., Ronda, F., Blanco, C., Caballero, P., & Apesteguía, A. (2003). Effect of dietary fibre on dough rheology and bread quality. *European Food Research and Technology*, 216(1), 51–56. <https://doi.org/10.1007/s00217-002-0632-9>
- Gómez, P.; León, A.; Rosell, C. (2007). Trigo. En A. E., León, y C. M., Rosell (Eds.), De tales harinas, tales panes (pp. 19-71). Córdoba: CYTED. <https://acortar.link/0eYswv>
- Gonçalves, R., Madalena, D., Fernandes, J., Marques, M., Vicente, A., & Pinheiro, A. (2022). Application of nanostructured delivery systems in food: From incorporation to detection and characterization. *Trends in Food Science & Technology*, 129, 111–125. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.09.016>
- González, L., Álvarez, C., & Tolaba, M. (2025). Effect of different hydrocolloids on the quality and aging of gluten-free bread based on pre-hydrated rice grains. *Food Bioscience*, 69, 106857. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.106857>
- Guzmán, M., Cortez, S., Garza, E., García, M., & García, C. (2023). Mejoramiento de propiedades nutricionales, fisicoquímicas y estructurales de un pan sin gluten adicionado con microalga a base de pre-fermento. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 8, 572–579. <https://idcyta.uanl.mx/index.php/i/article/view/77/72>
- Hager, A., Wolter, A., Czerny, M., Bez, J., Zannini, E., Arendt, E., & Czerny, M. (2012). Investigation of product quality, sensory profile and ultrastructure of breads made from a range of commercial gluten-free flours compared to their wheat counterparts. *European Food Research and Technology*, 235(2), 333–344. <https://doi.org/10.1007/s00217-012-1763-2>
- Hasjim, J., Li, E., & Dhital, S. (2013). Milling of rice grains: Effects of starch/flour structures on gelatinization and pasting properties. *Carbohydrate Polymers*, 92(1), 682–690. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.09.023>
- Hård af Segerstad, E., Mramba, L., Liu, X., Uusitalo, U., Yang, J., Norris, J., Virtanen, S., Liu, E., Kurppa, K., Koletzko, S., Ziegler, A., Toppari, J., Rewers, M., Akolkar, B.,

- Krischer, J., Aronsson, C., & Agardh, D. (2023). Associations of dietary patterns between age 9 and 24 months with risk of celiac disease autoimmunity and celiac disease among children at increased risk. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 118(6), 1099–1105. <https://doi.org/10.1016/j.ajcnut.2023.08.009>
- Horstmann, S., Foschia, M., & Arendt, E. (2017). Correlation analysis of protein quality characteristics with gluten-free bread properties. *Food & Function*, 8(7), 2465–2474. <https://doi.org/10.1039/c7fo00415j>
- Hu, D., Yang, G., Fan, L., Li, R., & Wang, S. (2025). Recent advances in the impact of novel thermal technologies on gluten-free grain starches: Structures, techno-functional properties, and food applications. *Food Hydrocolloids*, 162, 110961. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110961>
- Huamaní, C., Vidaurre, J., Cabezas, D., Correa, M., Burbano, J., Rodríguez, J., & Repo, R. (2025). Tarwi okara (*Lupinus mutabilis*) native and modified by high-intensity ultrasound as a gluten-free bread improver. *Food Hydrocolloids*, 163, 111131. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2025.111131>
- Jannasch, A., & Wang, Y. (2025). Comparison of pasting and rheological properties of rice flours and cross-linked waxy rice starches using the Rapid Visco Analyser and dynamic rheometer. *Journal of Cereal Science*, 123, 104155. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2025.104155>
- Kumari, S., Kaur, B., & Thiruvalluvan, M. (2024). Ultrasound modified millet starch: Changes in functional, pasting, thermal, structural, in vitro digestibility properties, and potential food applications. *Food Hydrocolloids*, 153, 110008. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110008>
- Luangsakul, N., & Van, T. (2025). Sustainable techniques to enhance novel techno-functional properties and modulate starch digestibility of polyphenol-rich red rice flours with varying amylose content. *Food Chemistry*, 480, 143915. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.143915>
- Martínez, O., & Olano, D. (2025). *Evaluación fisicoquímica y sensorial de pan de molde elaborado a partir de harina de cáscara de café (Suillus luteus) y cañihua (Chenopodium pollidicaule)* (Tesis pregrado, Universidad Señor de Sipán). Repositorio Institucional USS. <https://hdl.handle.net/20.500.12802/15263>
- Mejía, N., & Rodrigo, H. (2022). *Evaluación de concentraciones harinas de soja (Glycine max), maíz (Zea mays) y almidón de papa (Solanum tuberosum) al elaborar panes sin*

- gluten* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. Repositorio UNPRG. <https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/11781>
- Sader de Melo, T. (2018). *Enriquecimiento de panes sin gluten con mezclas proteicas* [Trabajo de Fin de Máster, Universidad de Valladolid]. Repositorio Institucional UVaDoc. <https://acortar.link/advBQ0>
- Mezaize, S., Chevallier, S., Le Bail, A., & de Lamballerie, M. (2009). Optimization of gluten-free formulations for French-style breads. *Journal of Food Science*, 74(3), E140–E146. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01096.x>
- Miranda, F., Steinmacher, N., Lahis, D., Bedendo, A., Pereira, A., de Souza, N., & Rodrigues, A. (2020). Application of statistical modelling of mixtures in the development of gluten-free bread with maca, potato, sweet and sour manioc. *Revista Chilena de Nutrición*, 47(3), 372–380. <https://doi.org/10.4067/S0717-75182020000300372>
- Mognaschi, P. (2024). *Desarrollo de premezcla para pan libre de alérgenos con alto contenido de proteínas de origen vegetal* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cuyo]. Biblioteca Digital UNCUIYO. <https://shre.ink/tyh4>
- Montoya, L., & Rodríguez, A. (2025). Effect of germination on the rheological properties of quinoa (*Chenopodium quinoa* var. Blanca de Junin) and maize (*Zea mays* - Quality Protein Maize) flours and application in gluten-free formulations. *Journal of Cereal Science*, 123, 104134. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2025.104134>
- Moura, J., Shewan, H., Stokes, J., Best, O., & Smyth, H. (2025). Physicochemical, rheological and sensory properties of gluten-free doughs and breads of Australian bunya nuts. *Future Foods*, 11, 100584. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2025.100584>
- Narciso, J., Fonseca, K., Silva, J., Rodrigues, S., Ching, L., Gentili, A., De Meireles, C., Fonseca, J., Lacombe, L., & Schiavon, L. (2024). Acute abdominal perforation as a clinical presentation of coeliac disease. *Arab Journal of Gastroenterology*, 25(1), 64–66. <https://doi.org/10.1016/j.ajg.2023.10.003>
- Navneet, Sharma, M., Duizer, L., & Joye, I. (2025). Evaluation of the performance of physically processed bean flours in gluten-free cake production. *Food Structure*, 45, 100456. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2025.100456>
- Norma Técnica Peruana. (2019). *Arroz. Harina extruida de arroz. Requisitos. 1ª Edición*. <https://salalecturavirtual.inacal.gob.pe:8098/datos.aspx?id=31716>
- Norma Técnica Peruana. (2023). *Arroz. Arroz elaborado. Requisitos. 4ª Edición*. <https://salalecturavirtual.inacal.gob.pe:8098/datos.aspx?id=32812>

- Norma Técnica Peruana. (2021). *Panadería, pastelería y galletería. Pan de molde. Requisitos*. 2^a Edición. <https://salalecturavirtual.inacal.gob.pe:8098/detalle.aspx?id=32815&idtv=8882>
- Nudel, A., Cohen, R., Abbo, S., & Kerem, Z. (2023). Developing a nutrient-rich and functional wheat bread by incorporating Moringa oleifera leaf powder and gluten. *LWT*, 187, 115343. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115343>
- Ocaña, E. (2022). *Harina de frejol de gandul (Cajanus cajan L.) como fuente de proteína para la alimentación de cerdos* [Trabajo de pregrado, Universidad Técnica de Babahoyo]. UTB Repositorio Institucional. <https://shre.ink/tyh6>
- Ordoñez, G., Roa, D., & Nieto, J. (2024). Cacay seed cake flour and papaya dietary fiber concentrates as nutritional supplement and quality improvers for gluten-free breads. *NFS Journal*, 36, 100188. <https://doi.org/10.1016/j.nfs.2024.100188>
- Papagianni, E., Kotsiou, K., Matsakidou, A., Biliaderis, C., & Lazaridou, A. (2024). Development of “clean label” gluten-free breads fortified with flaxseed slurry and sesame cake: Implications on batter rheology, bread quality and shelf life. *Food Hydrocolloids*, 150, 109734. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.109734>
- Parra, L. (2023). *Evaluación sensorial y nutricional de una galleta libre de gluten a base de fréjol de palo (Cajanus cajan), morocho (Zea mays indurata) y quinoa (Chenopodium quinoa)* [Trabajo de titulación, Universidad Agraria del Ecuador]. Centro de Información Agraria. <https://shre.ink/tyh0>
- Piluk, P., Khemthong, C., Chupeerach, C., Suttisansanee, U., Chamchan, R., Thangsiri, S., & On-nom, N. (2025). Development and characterization of high protein and fiber gluten free bread formulations from egg white powder and resistant starch. *LWT*, 227, 117984. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.117984>
- Proetto, I., Pesce, F., Arena, E., Grasso, A., Parafati, L., Fallico, B., & Palmeri, R. (2024). Use of vegetable flours obtained from artichoke by-products as a functional ingredient in gluten-free bread formulations. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 38, 101015. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2024.101015>
- Quina, J., & Pamo, G. (2023). *Elaboración de pan sin gluten con almidón de maíz y mezcla de hidrocoloides; enriquecido con proteína aislada de soja* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Repositorio UNSA. <https://shre.ink/tyhJ>
- Raungrusmee, S., Shrestha, S., Sadiq, M., & Anal, A. (2020). Influence of resistant starch, xanthan gum, inulin and defatted rice bran on the physicochemical, functional and

- sensory properties of low glycemic gluten-free noodles. *LWT*, 126, 109279. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109279>
- Roman, L., Reguilon, M., Martinez, M., & Gomez, M. (2020). The effects of starch cross-linking, stabilization and pre-gelatinization at reducing gluten-free bread staling. *Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*, 132, Article 109908. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109908>
- Ronie, M., Mamat, H., Abdul Aziz, A., & Zainol, M. (2023). Proximate compositions, texture, and sensory profiles of gluten-free bario rice bread supplemented with Potato Starch. *Foods*, 12(6), 1172. <https://doi.org/10.3390/foods12061172>
- Sachanarula, S., Chantarasinlapin, P., & Adisakwattana, S. (2022). Substituting whole wheat flour with pigeon pea (*Cajanus cajan*) flour in chapati: effect on nutritional characteristics, color profiles, and in vitro starch and protein digestion. *Foods*, 11(20), 3157. <https://doi.org/10.3390/foods11203157>
- Sánchez, A., Arriaga, R., Del Pino, R., Bayona, D., & Moscol, D. (2023). *Diseño de una planta de producción de harina a base de arroz en la región Piura*. <https://shre.ink/tyhO>
- Scanlon, M., & Koksel, F. (2024). The role of bubbles and interfaces in the quality of foamed cereal products. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 73, 101843. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2024.101843>
- Scherf, K. (2019). Immunoreactive cereal proteins in wheat allergy, non-celiac gluten/wheat sensitivity (NCGS) and celiac disease. *Current Opinion in Food Science*, 25, 35–41. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.02.003>
- Schober, P., Boer, C., & Schwarte, L. (2018). *Correlation coefficients: appropriate use and interpretation*. *Anesthesia & Analgesia*, 126(5), 1763–1768. <https://doi.org/10.1213/ANE.00000000000002864>
- Steele, A. (2019). Starch characteristics of cooking and dessert bananas during fruit development and implications for starch functionality [Tesis doctoral, University of Bath]. University of Bath Research Portal. <https://shre.ink/tyhw>
- Tester, R., & Morrison, W. (1990). Swelling and gelatinization of cereal starches. *Cereal Chemistry*, 67(6), 551–557. <https://shre.ink/tyhV>
- Tóth, M., Kaszab, T., & Meretei, A. (2022). Análisis del perfil de textura y evaluación sensorial de muestras de pan sin gluten disponibles comercialmente. *European Food Research and Technology*, 248, 1447–1455. <https://doi.org/10.1007/s00217-021-03944-2>
- Torbica, A., Radosavljević, M., Belović, M., Djukić, N., & Marković, S. (2022). Overview of nature, frequency and technological role of dietary fibre from cereals and pseudocereals

- from grain to bread. *Carbohydrate Polymers*, 290, 119470. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119470>
- Villanueva, M., Vicente, A., Náthia, G., & Ronda, F. (2024). Microwave-treated rice flour halves the need of hydroxypropyl methylcellulose in the formulation of gluten-free bread. *Food Hydrocolloids*, 150, 109738. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.109738>
- Vidaurre, J. (2020). *Desarrollo de panes libres de gluten con harinas de granos andinos* [Tesis de Doctoris Philosophiae, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional Lamolina. <https://bit.ly/4f9Q6Xx>
- Vinod, B., Asrey, R., Rudra, S., Urhe, S., & Mishra, S. (2023). Chickpea as a promising ingredient substitute in gluten-free bread making: An overview of technological and nutritional benefits. *Food Chemistry Advances*, 3, 100473. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100473>
- Wang, S., & Copeland, L. (2013). Molecular disassembly of starch granules during gelatinization and its effect on starch digestibility: A review. *Food & Function*, 4(11), 1564–1580. <https://europepmc.org/article/med/24096569>
- Waziroh, E., Bender, D., Fuhrmann, P., & Schoenlechner, R. (2025). Effect of non-covalent interactions on gluten-free batter stability and bread properties. *LWT*, 215, 117263. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.117263>
- Yan, X., Luo, S., Ye, J., & Liu, C. (2024). Effect of starch degradation induced by extruded pregelatinization treatment on the quality of gluten-free brown rice bread. *International Journal of Biological Macromolecules*, 272, 132764. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132764>
- Zhang, L., Huang, S., Ananingsih, V., Zhou, W., & Chen, X. (2014). A study on *Bifidobacterium lactis* Bb12 viability in bread during baking. *Journal of Food Engineering*, 122, 33–37. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.08.029>
- Zhang, J., Zhu, Q., Cheng, L., Kang, J., Liu, H., Zhang, L., Li, H., Li, Q., Guo, Q., & Goff, H. (2025). Enhancing gluten-free dough and bread properties using xanthan gum and its trifluoroacetic acid hydrolytes. *Food Hydrocolloids*, 164, 111204. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2025.111204>
- Zhao, F., Li, Y., Li, C., Ban, X., Gu, Z., & Li, Z. (2022). Exo-type, endo-type and debranching amylolytic enzymes regulate breadmaking and storage qualities of gluten-free bread. *Carbohydrate Polymers*, 298, 120124. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120124>

IX. ANEXOS

Anexo 1 Insumos empleados en la formulación del pan molde sin gluten



Nota. A: Harina de arroz B: Harina de gandul. C: Almidón de papa. D: Aceite de soja. E: Agua de mesa. F: Goma xantana. G: Lecitina de soja. H: Sal. I: Levadura. J: Azúcar.

Anexo 2 Registro fotográfico del proceso de la elaboración del pan molde sin gluten

Figura 8

Pesado de materia prima

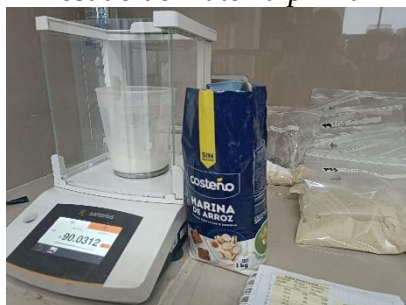


Figura 9

Mezclado 1 de insumos secos



Figura 10

Mezclado 2 de insumos líquidos

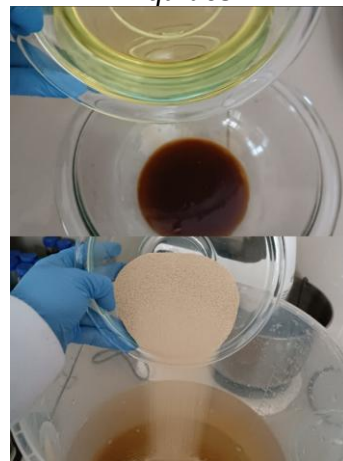


Figura 11

Mezclado 3 de insumos secos y líquidos



Figura 12

Fermentado de la masa de pan molde



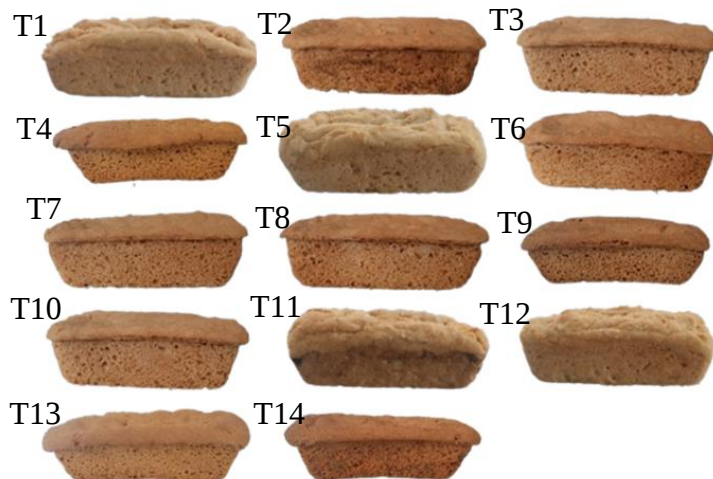
Figura 13

Horneado del pan de molde



Figura 14

Panes de molde de los 14 tratamientos



Anexo 3 Registro fotográfico de las metodologías experimentales**Figura 15**

Medición de color en la corteza del pan molde

**Figura 16**

Medición de color en la miga del pan molde

**Figura 17**

Muestras para TPA de la miga del pan molde

**Figura 18**

Carga de la muestra en el texturómetro

**Figura 19**

Medición de TPA de la miga del pan molde

**Figura 20**

Muestras para analizar la viscosidad de empaste de las mezclas

**Figura 21**

Carga de la muestra en el equipo de reología

**Figura 22**

Medición de viscosidad de empaste de las mezclas



Anexo 4 Resultados de las repeticiones de cada tratamiento de la propiedad reológica de
viscosidad de empaste de las mezclas

Muestra	Repetición	Viscosidad Pico (cP)	Viscosidad Mínima (cP)	Viscosidad Final (cP)
V1	R1	95,600	3,874	28,770
	R2	101,700	4,967	30,500
V2	R1	89,800	6,534	60,590
	R2	72,000	6,743	82,120
V3	R1	74,580	2,523	16,160
	R2	78,610	3,198	19,400
V4	R1	77,410	3,476	34,320
	R2	73,710	5,074	32,750
V5	R1	78,180	6,735	39,580
	R2	66,470	5,216	43,200
V6	R1	65,440	3,241	23,420
	R2	67,830	3,290	20,510
V7	R1	70,220	4,130	33,790
	R2	72,920	4,875	35,310
V8	R1	70,960	5,681	46,050
	R2	69,190	2,462	44,890
V9	R1	71,510	5,040	28,380
	R2	67,660	2,878	41,460
V10	R1	69,810	2,240	12,480
	R2	68,290	2,772	17,800
V11	R1	59,680	2,660	18,070
	R2	54,040	2,846	19,190
V12	R1	62,800	1,417	11,550
	R2	64,870	1,448	11,450
V13	R1	67,360	2,681	47,360
	R2	72,560	4,527	47,390
V14	R1	55,160	1,833	15,990
	R2	69,950	1,911	13,610

Anexo 5 Resultados de las repeticiones de cada tratamiento de las propiedades de textura instrumental del pan molde

Muestra	Repetición	Elasticidad	Masticabilidad (N)	Dureza (N)
PAN 1	R1	0,45	0,88	3,22
	R2	0,52	1,05	3,14
	R3	0,57	1,24	3,15
	R4	0,54	1,07	2,9
	R5	0,47	0,91	3,24
	R6	0,6	1,3	3,12
PAN 2	R1	0,71	2,06	3,98
	R2	0,57	1,4	3,69
	R3	0,68	1,91	3,73
	R4	0,57	1,56	4,31
	R5	0,67	2,17	4,59
	R6	0,63	2,01	4,7
PAN 3	R1	0,66	1,95	4,18
	R2	0,61	1,64	4,08
	R3	0,64	1,71	3,87
	R4	0,63	1,53	3,35
	R5	0,6	1,41	3,38
	R6	0,54	1,47	4,45
PAN 4	R1	0,58	1,2	3,26
	R2	0,5	0,95	3,06
	R3	0,58	1,25	3,1
	R4	0,62	1,57	3,77
	R5	0,64	1,47	3,21
	R6	0,66	1,66	3,45
PAN 5	R1	0,57	1,33	3,57
	R2	0,72	2	3,82
	R3	0,6	1,59	3,92
	R4	0,64	1,68	3,76
	R5	0,58	1,35	3,53
	R6	0,56	1,17	3,16
PAN 6	R1	0,76	2,54	4,43
	R2	0,67	1,83	3,95
	R3	0,7	2,26	4,48
	R4	0,72	2,26	4,25
	R5	0,71	2,04	3,82
	R6	0,66	2,04	4,34
PAN 7	R1	0,54	1,25	3,63
	R2	0,58	1,38	3,55
	R3	0,62	1,44	3,39
	R4	0,64	1,61	3,71
	R5	0,62	1,45	3,33
	R6	0,57	1,25	3,33
PAN 8	R1	0,67	1,85	4,02

Muestra	Repetición	Elasticidad	Masticabilidad (N)	Dureza (N)
PAN 8	R2	0,66	1,75	3,79
	R3	0,53	1,49	4,49
	R4	0,58	1,43	3,74
	R5	0,61	1,45	3,38
	R6	0,52	1,01	2,96
PAN 9	R1	0,57	1,24	3,27
	R2	0,45	0,86	3,16
	R3	0,55	1,18	3,39
	R4	0,52	1,05	3,19
	R5	0,6	1,43	3,68
	R6	0,56	1,38	3,89
PAN 10	R1	0,69	1,97	4,12
	R2	0,69	2,07	4,27
	R3	0,7	2,2	4,35
	R4	0,66	1,78	3,75
	R5	0,6	1,5	3,76
	R6	0,6	1,45	3,64
PAN 11	R1	0,7	1,93	3,83
	R2	0,74	2,4	4,49
	R3	0,61	1,49	3,53
	R4	0,71	2,28	4,51
	R5	0,69	2,03	4,21
	R6	0,72	2,32	4,51
PAN 12	R1	0,66	1,88	4,07
	R2	0,67	1,99	4,29
	R3	0,7	2,56	5,07
	R4	0,71	2,37	4,68
	R5	0,68	2,02	4,24
	R6	0,72	2,6	5,14
PAN 13	R1	0,7	2,3	4,75
	R2	0,73	2,87	5,61
	R3	0,68	2,44	5,3
	R4	0,72	2,81	5,61
	R5	0,74	2,9	5,36
	R6	0,75	3,15	5,9
PAN 14	R1	0,75	3,56	6,66
	R2	0,77	3,52	6,55
	R3	0,8	3,91	6,87
	R4	0,75	3,44	6,33
	R5	0,8	3,86	6,77
	R6	0,78	4,04	7,39

Anexo 6 Resultados de las repeticiones de cada tratamiento del color instrumental de la corteza del pan molde

Muestra	Repetición	Corteza		
		L*	a*	b*
C1	R1	63,88	6,95	32,00
	R2	64,03	5,78	31,96
	R3	65,73	5,00	30,56
C2	R1	57,54	8,93	29,84
	R2	57,71	8,75	30,09
	R3	56,64	8,53	30,10
C3	R1	58,04	8,38	32,30
	R2	57,87	8,77	33,84
	R3	56,71	8,36	31,98
C4	R1	59,17	10,74	35,99
	R2	58,75	12,31	37,24
	R3	58,73	12,50	38,60
C5	R1	62,61	6,55	34,51
	R2	63,82	5,99	33,49
	R3	64,77	6,20	33,95
C6	R1	59,82	6,66	30,17
	R2	58,45	6,51	30,71
	R3	60,02	6,53	31,49
C7	R1	57,79	9,80	29,48
	R2	58,15	10,09	32,14
	R3	57,24	10,77	31,75
C8	R1	58,14	6,51	28,75
	R2	57,63	7,18	30,33
	R3	57,42	6,48	30,12
C9	R1	56,15	4,50	28,30
	R2	56,04	5,13	29,14
	R3	55,61	5,64	30,49
C10	R1	57,07	5,78	30,57
	R2	57,62	5,83	30,78
	R3	59,09	6,24	31,23
C11	R1	64,26	5,59	31,62
	R2	65,10	4,42	28,54
	R3	65,06	4,31	30,57
C12	R1	57,88	5,74	28,73
	R2	58,81	4,31	28,46
	R3	58,70	5,20	27,74
C13	R1	56,42	4,79	29,14
	R2	59,31	6,56	30,08
	R3	58,67	6,00	32,05
C14	R1	55,28	9,44	35,97
	R2	56,74	8,48	35,62
	R3	57,76	9,16	36,47

Anexo 7 Resultados de las repeticiones de cada tratamiento del color instrumental de la miga del pan molde

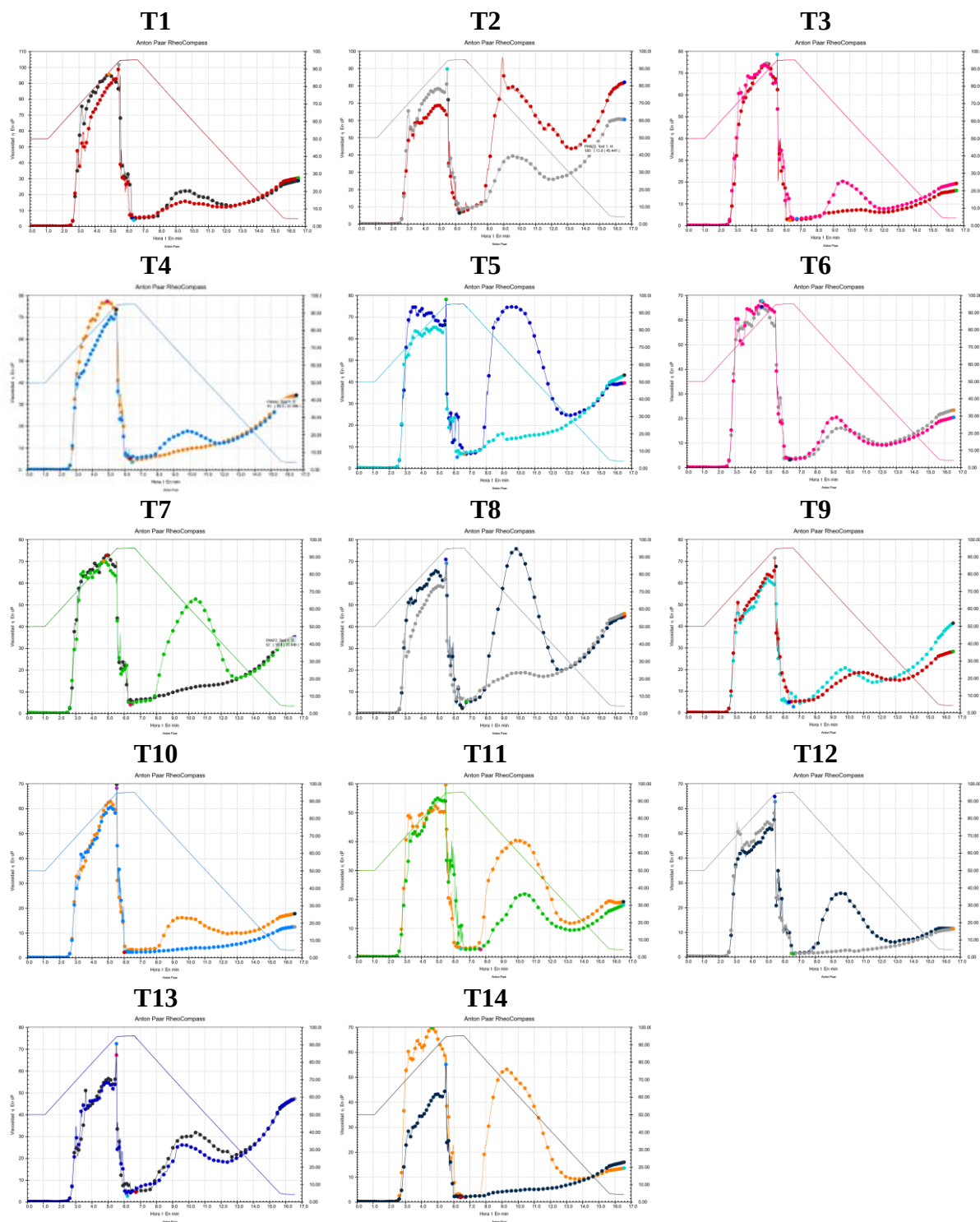
Muestra	Repetición	Miga		
		L*	a*	b*
M1	1	61,79	0,06	19,88
	2	63,61	0,13	17,99
	3	59,83	-0,34	16
	4	63,38	-0,1	19,29
	5	64,11	-0,19	17,09
	6	65,13	-0,23	18,58
	7	60,94	-0,28	15,18
	8	62,19	0,36	19,65
	9	64,69	-0,1	18,43
	10	62,54	0,02	20,18
M2	1	63,99	6,42	20,33
	2	60,98	0,4	19,95
	3	58,88	0,36	19,24
	4	60,98	0,15	18,08
	5	61,12	0,26	19,23
	6	61,29	0,77	21,36
	7	57,88	0,45	19,52
	8	59,04	0,18	17,89
	9	60,21	0,39	19,04
	10	61,9	0,42	19,68
M3	1	59,67	0,88	20,3
	2	63,92	0,75	20,59
	3	57,41	0,92	20,11
	4	60,01	0,68	20,14
	5	63,95	0,53	20,03
	6	62,93	0,71	20,06
	7	60,97	0,63	20,62
	8	61,27	0,6	19,9
	9	63,65	0,32	19,13
	10	62,11	0,6	20,47
M4	1	64,54	0,72	20,62
	2	64,03	1,3	23,56
	3	65,65	1,56	24,15
	4	65,25	1,14	22,73
	5	69,43	1,38	24,14
	6	63,63	1,25	23,06
	7	62,23	1,36	22,27
	8	67,25	1,31	23,2
	9	68,02	1,79	22,99
	10	64,44	1,35	21,9

Muestra	Repetición	Miga		
		L*	a*	b*
M5	1	59,82	1,2	20,98
	2	62,99	1,21	21,67
	3	64,67	2,36	25,08
	4	60,04	1,12	20,19
	5	59,46	1,11	20,18
	6	59,11	1,19	19,61
	7	58,85	2,08	24,13
	8	59,68	1,24	21,68
	9	59,69	1,55	21,61
	10	62,1	1,14	21,36
M6	1	59,89	1,57	23,38
	2	59,69	2,17	25,15
	3	56,8	1,79	22,57
	4	60,05	1,24	21,79
	5	59,71	1,52	21,1
	6	58,75	2,29	24,81
	7	55,82	1,78	22,07
	8	59,84	1,82	23,08
	9	55,2	1,72	21,07
	10	59,85	1,64	22,65
M7	1	59,55	1,42	23,64
	2	60,71	1,15	21,78
	3	60,78	0,92	20,38
	4	63,21	1,42	23,38
	5	64,61	1,88	24,03
	6	61,66	1,59	22,74
	7	61,77	1,45	23,89
	8	57,89	1,96	24,8
	9	60,7	2,18	24,19
	10	58,99	1,4	21,26
M8	1	63,7	1,15	22,03
	2	63,73	1,16	21,66
	3	61,61	1,48	23,29
	4	64,21	0,91	19,87
	5	64,34	0,89	20,92
	6	63,48	1,09	20,4
	7	63,31	2,01	24,43
	8	63,46	0,7	20,12
	9	60,58	0,89	19,4
	10	63,24	1,16	21,5
M9	1	63,28	1,38	23,51
	2	63,82	1,6	23,65
	3	64,35	0,72	20,6
	4	64,83	1,22	22,91

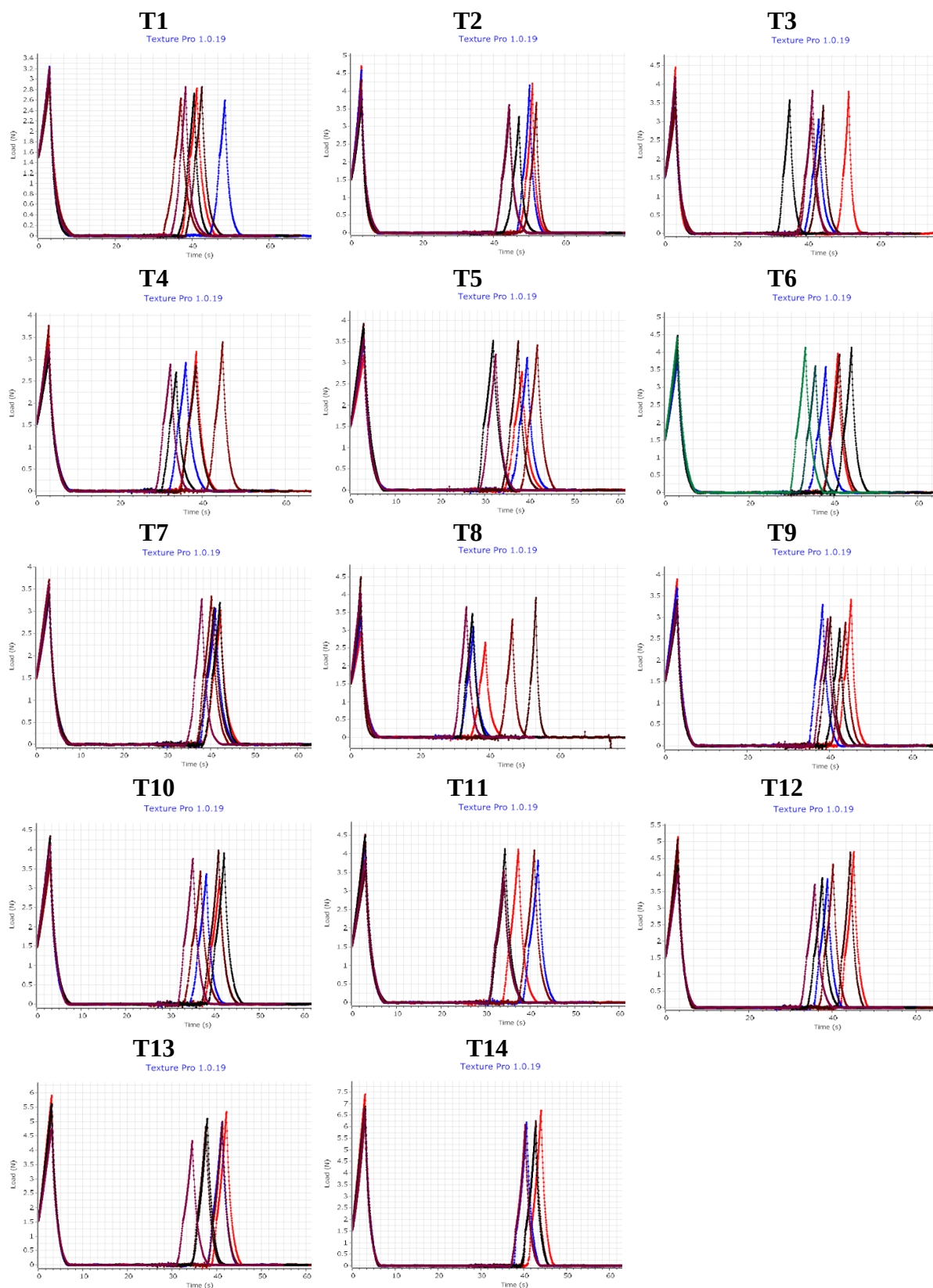
Muestra	Repetición	Miga		
		L*	a*	b*
M9	5	62,41	0,88	21,71
	6	63,36	1,14	21,55
	7	63,59	1,04	21,83
	8	63,63	1,21	23,02
	9	65,54	1,34	22,03
	10	63,07	1,1	21,7
M10	1	62,7	1,95	24,09
	2	60,35	1,22	20,49
	3	62,91	1,23	22,04
	4	64,9	1,79	23,77
	5	66,4	2	24,01
	6	62,91	1,99	24,11
	7	63,2	1,44	23,23
	8	62,38	1,72	22,21
	9	63,63	2,18	23,32
	10	64,31	1,56	24,03
M11	1	60,72	1,56	21,87
	2	61,55	1,24	19,04
	3	63,86	1,85	22,88
	4	60,48	1,44	21,12
	5	60,49	2,08	23,67
	6	62,84	2,31	23,22
	7	63,27	1,13	19,94
	8	61,69	1,59	21,87
	9	59,7	1,71	22,72
	10	63,5	1,65	22,44
M12	1	61,33	2,02	24,79
	2	59,45	2,8	25,33
	3	60,45	1,33	20,94
	4	60,35	1,66	23,38
	5	59,83	1,75	23,36
	6	58,78	2,07	23,98
	7	58,98	1,41	21,89
	8	59,26	1,88	23,86
	9	58,23	1,58	21,41
	10	58,99	1,18	20,08
M13	1	60,05	1,72	22,78
	2	60,98	2,11	23,81
	3	61,9	1,86	22,96
	4	59,89	2,14	24,46
	5	62,28	2,15	23,31
	6	62,68	1,68	22,06
	7	63,82	1,67	22,9
	8	60,46	1,73	22,71

Muestra	Repetición	Miga		
		L*	a*	b*
M13	9	61,39	1,96	22,32
	10	61,27	1,66	22,27
M14	1	59	2,11	23,44
	2	58,63	2,63	24,15
	3	57,85	2,17	22,16
	4	62,84	1,8	22,25
	5	60,6	2,71	24,23
	6	61,05	2,59	23,52
	7	60,69	1,81	22,69
	8	62,42	2,17	22,74
	9	61,57	2,68	24,18
	10	57,29	2,06	22,51

Anexo 8 Gráficas de las repeticiones de cada tratamiento para la viscosidad de empaste de las mezclas



Anexo 9 Gráficas de las repeticiones de cada tratamiento para el análisis de perfil de textura de los panes de molde



Anexo 10 Resultados completos del modelo de las variables respuesta

Viscosidad pico

<i>Model</i>	<i>SE</i>	<i>R-Squared</i>	<i>Adj. R-Squared</i>
Linear	5,38976	74,61	69,99
Quadratic	2,71411	95,32	92,39
Special Cubic	2,60683	96,22	92,98
Cubic	2,28291	98,34	94,62

Viscosidad mínima

<i>Model</i>	<i>SE</i>	<i>R-Squared</i>	<i>Adj. R-Squared</i>
Linear	1,13426	48,07	38,63
Quadratic	1,09088	65,07	43,24
Special Cubic	1,13174	67,10	38,90
Cubic	1,25486	76,89	24,89

Viscosidad final

<i>Model</i>	<i>SE</i>	<i>R-Squared</i>	<i>Adj. R-Squared</i>
Linear	16,4709	16,01	0,74
Quadratic	14,6689	51,55	21,27
Special Cubic	15,369	53,47	13,58
Cubic	18,259	62,47	0,00

Dureza

<i>Model</i>	<i>SE</i>	<i>R-Squared</i>	<i>Adj. R-Squared</i>
Linear	0,646181	61,22	54,16
Quadratic	0,408311	88,74	81,70
Special Cubic	0,326719	93,69	88,28
Cubic	0,24069	98,04	93,64

Masticabilidad

<i>Model</i>	<i>SE</i>	<i>R-Squared</i>	<i>Adj. R-Squared</i>
Linear	0,594253	60,23	53,00
Quadratic	0,392365	87,39	79,51
Special Cubic	0,314876	92,90	86,81
Cubic	0,168865	98,83	96,21

Elasticidad

<i>Model</i>	<i>SE</i>	<i>R-Squared</i>	<i>Adj. R-Squared</i>
Linear	0,0566958	65,71	59,47
Quadratic	0,0472787	82,66	71,82
Special Cubic	0,0466979	85,20	72,51
Cubic	0,0273354	97,10	90,58

Color corteza L*

<i>Model</i>	<i>SE</i>	<i>R-Squared</i>	<i>Adj. R-Squared</i>
Linear	2,99016	33,94	21,92
Quadratic	2,35833	70,11	51,43
Special Cubic	0,702745	97,68	95,69
Cubic	0,447619	99,46	98,25

Color corteza a*

<i>Model</i>	<i>SE</i>	<i>R-Squared</i>	<i>Adj. R-Squared</i>
Linear	0,271024	30,20	17,51
Quadratic	0,305855	35,35	0,00
Special Cubic	0,234584	66,72	38,20
Cubic	0,242892	79,61	33,74

Color corteza b*

<i>Model</i>	<i>SE</i>	<i>R-Squared</i>	<i>Adj. R-Squared</i>
Linear	2,28864	23,42	9,50
Quadratic	2,15057	50,82	20,09
Special Cubic	1,98484	63,35	31,93
Cubic	1,40595	89,49	65,85

Color miga L*

<i>Model</i>	<i>SE</i>	<i>R-Squared</i>	<i>Adj. R-Squared</i>
Linear	1,36386	53,66	45,24
Quadratic	1,28619	70,03	51,30
Special Cubic	1,37279	70,13	44,52
Cubic	1,32764	84,03	48,11

Color miga a*

<i>Model</i>	<i>SE</i>	<i>R-Squared</i>	<i>Adj. R-Squared</i>
Linear	0,283476	80,02	76,39
Quadratic	0,278444	85,98	77,22
Special Cubic	0,255548	89,67	80,81
Cubic	0,185274	96,90	89,91

Color miga b*

<i>Model</i>	<i>SE</i>	<i>R-Squared</i>	<i>Adj. R-Squared</i>
Linear	1,01296	63,95	57,39
Quadratic	0,845443	81,73	70,32
Special Cubic	0,852834	83,74	69,80
Cubic	0,649189	94,62	82,50

Anexo 11 Matriz de consistencia

Título: Influencia de harina de gandul (*Cajanus cajan*), arroz (*Oryza sativa*) y almidón de papa (*Solanum tuberosum*) sobre las propiedades físicas del pan molde y sus mezclas

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Dimensiones	Indicadores	Índice	Diseño
¿Cómo influye la combinación de harina de gandul, harina de arroz y almidón de papa en diferentes proporciones sobre las propiedades físicas del pan de molde y sus mezclas?	Objetivo general Determinar la influencia de harina de gandul, arroz y almidón de papa sobre las propiedades físicas del pan molde y sus mezclas. Objetivos específicos - Determinar la viscosidad de empaste de las mezclas de harina de gandul, arroz y almidón de papa, mediante el análisis de la viscosidad pico, mínima y final. - Determinar la textura instrumental del pan molde de harina de gandul, arroz y almidón de papa, enfocándose en parámetros como elasticidad, dureza y masticabilidad. - Determinar el color instrumental de la corteza y la miga del pan molde de harina de gandul, arroz y almidón de papa.	Hipótesis general La combinación de harina de gandul, harina de arroz y almidón de papa en diferentes proporciones influirá positivamente en las propiedades físicas del pan de molde, mejorando la textura, el color de la miga y corteza y la viscosidad de las mezclas	Mezcla panadera	% de harina de gandul (HG) % de harina de arroz (HA) % de almidón de papa (AP)	g/100g	$15 \leq HG \leq 35$ $20 \leq HA \leq 30$ $45 \leq AP \leq 55$	Se empleó diseño de mezclas con vértices extremos, con 14 tratamientos a experimentar, con 3 componentes experimentales (harina de arroz, gandul y almidón de papa), generados por el software Statgraphics Centurion XIX - versión de evaluación (30 días). Para la variable respuesta se empleó la ecuación de regresión para las variables dependientes: $Y = \beta_A X_1 + \beta_B X_2 + \beta_C X_3 + \beta_{AB} X_1 X_2 + \beta_{AC} X_1 X_3 + \beta_{BC} X_2 X_3 + \beta_{ABC} X_1 X_2 X_3$
			Propiedad física de las mezclas	Viscosidad de empaste (reología): Viscosidad pico Viscosidad mínima Viscosidad final	cP cP cP	56,98 - 96,16 1,51 – 5,55 11,63 – 57,81	
			Propiedad es físicas del pan molde	Textura instrumental: Dureza Masticabilidad Elasticidad Color instrumental	N N - Corteza L* Corteza a* Corteza b* Miga L* Miga a* Miga b*	3,25 – 6,76 1,19 – 3,72 0,54 – 0,78 55,93 - 64,81 4,77 – 11,85 28,31 – 37,28 59,54 – 64,28 -0,01 – 2,37 19,41 – 23,71	

