

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN CIENCIA DE ALIMENTOS**



**“DESARROLLO DE PANES LIBRES DE GLUTEN CON HARINAS DE
GRANOS ANDINOS”**

Presentada por:

JULIO MAURICIO VIDAURRE RUIZ

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE DOCTOR
DOCTORIS PHILOSOPHIAE EN CIENCIA DE ALIMENTOS**

Lima - Perú

2020

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN CIENCIA DE ALIMENTOS**

**“DESARROLLO DE PANES LIBRES DE GLUTEN CON HARINAS DE
GRANOS ANDINOS”**

TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE DOCTOR
Doctoris Philosophiae

Presentada por:

JULIO MAURICIO VIDAURRE RUIZ

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Dra. Rosana Chirinos Gallardo
PRESIDENTA

Ph.D. Ritva Repo de Carrasco
PATROCINADORA

Ph.D. Regine Schönlechner
CO-PATROCINADORA

Ph.D. Fernando Vargas Delgado
MIEMBRO

Dra. Bettit Salvá Ruiz
MIEMBRO

Ph.D. Alberto Edel León
MIEMBRO EXTERNO

AGRADECIMIENTOS

A la PhD. Ritva Repo de Carrasco por todas las oportunidades brindadas para poder realizar esta investigación, por valorar mis ideas y permitirme conocer el mundo difundiendo los resultados de mi investigación.

A la PhD. Regine Schönlechner por coasesor la presente investigación y brindarme todo el apoyo para lograr las publicaciones científicas.

Al Ministerio de Educación (MINEDU) y al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) por otorgarme la beca integral para realizar los estudios de doctorado, bajo el convenio 000179-2015-FONDECYT.

Al proyecto Protein2Food (Horizonte 2020) por financiar parte de la investigación y permitirme contribuir con el desarrollo de prototipos de panes libres de gluten ricos en proteínas.

Al Centro de Investigación e Innovación en Productos Derivados de Cultivos Andinos (CIINCA) de la Facultad de Industrias Alimentarias (FIAL) por permitirme utilizar sus instalaciones y brindarme el apoyo institucional.

A mi novia Lady Cabrera y mis padres Victor Vidaurre y María del Carmen Ruiz por su apoyo incondicional y ánimo brindado.

Al profesor W. Francisco Salas por apoyarme en el análisis textural y reológico de la investigación y al profesor Miguel Solano por escuchar mis ideas y ayudarme en el modelamiento de la cinética de crecimiento de las masas.

A los miembros del jurado, Dra. Rosana Chirinos, Dra. Bettit Salvá, PhD. Fernando Vargas y Dr. Alberto León, por su tiempo y correcciones realizadas a la tesis.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1.	EL GLUTEN Y SUS PROPIEDADES TECNOLÓGICAS EN EL PAN	3
2.2.	TRASTORNOS RELACIONADOS CON LA INGESTA DE GLUTEN.....	5
2.3.	DEFICIENCIAS NUTRICIONALES DE LOS PANES LIBRES DE GLUTEN	8
2.4.	DESAFÍOS EN EL DESARROLLO DE PANES LIBRES DE GLUTEN	10
2.5.	INGREDIENTES Y PROCESOS UTILIZADOS EN EL DESARROLLO DE PANES LIBRES DE GLUTEN	13
2.6.	MÉTODOS PARA EVALUAR LA REOLOGÍA Y TEXTURA DE LAS MASAS LIBRES DE GLUTEN	20
2.7.	MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN UTILIZADOS EN EL DESARROLLO DE PANES LIBRES DE GLUTEN	22
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
3.1.	LUGAR DE EJECUCIÓN	24
3.2.	MATERIAS PRIMAS E INSUMOS	24
3.3.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	25
3.4.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	43
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	45
4.1.	PROPIEDADES DE PASTA Y TEXTURALES DE LAS MEZCLAS DE HARINAS DE QUINUA (<i>Chenopodium quinoa</i>), KIWICHA (<i>Amaranthus caudatus</i>) Y TARWI (<i>Lupinus mutabilis</i>) EN UN SISTEMA ACUOSO	45
4.2.	INFLUENCIA DE LA GOMA DE TARA Y LA GOMA XANTANA SOBRE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS Y TEXTURALES DE LA MASA Y EL PAN LIBRE DE GLUTEN A BASE DE ALMIDÓN.....	56
4.3.	PROPIEDADES REOLÓGICAS Y TEXTURALES DE LAS MASAS LIBRES DE GLUTEN ELABORADAS CON HARINAS DE GRANOS ANDINOS	64

4.4. OPTIMIZACIÓN DE LAS MASAS LIBRES DE GLUTEN ELABORADAS CON HARINA DE QUINUA O HARINA DE KIWICHA	77
4.5. OPTIMIZACIÓN DEL CONTENIDO DE HARINA DE TARWI Y AGUA EN MASAS LIBRES DE GLUTEN A BASE DE ALMIDÓN DE PAPA CON HARINA DE QUINUA Y ALMIDÓN DE PAPA CON HARINA DE KIWICHA	134
V. CONCLUSIONES.....	150
VI. RECOMENDACIONES.....	152
VII. REFERENCIAS BBLIOGRÁFICAS.....	153

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Composición proximal de la quinua, kiwicha y tarwi por cada 100g de materia húmeda	16
Tabla 2: Características físicas de los panes libres de gluten que tienen en su matriz harina de quinua o kiwicha	18
Tabla 3: Características físicas de los panes libres de gluten que tienen en su matriz harina de quinua o kiwicha	23
Tabla 4: Niveles de los componentes establecidos para evaluar los efectos de interacción de las harinas de quinua, kiwicha y tarwi utilizando el diseño de mezclas	40
Tabla 5: Niveles de los componentes establecidos para optimizar el nivel de harina de quinua o kiwicha, goma (goma xantana, goma de tara y mezcla de las gomas) y agua utilizando el diseño de mezclas	42
Tabla 6: Niveles de harina de los componentes establecidos para optimizar el nivel de harina de tarwi y agua utilizando el Diseño Central Compuesto Rotacional (DCCR)	43
Tabla 7: Proporciones de los tratamientos formulados de acuerdo con el diseño de mezcla <i>simplex lattice</i>	45
Tabla 8: Valores medios de capacidad de retención de agua y color (L^* , a^* y b^*) de los tratamientos preparados con la mezcla de harina de quinua (HQ), harina kiwicha (HK) y harina de tarwi (HT)	47
Tabla 9: Valores medios de las propiedades de pasta de las harinas de quinua (HQ), kiwicha (HK), tarwi (HT) y sus mezclas binarias y ternarias	48
Tabla 10: Valores medios de las propiedades texturales de los geles formados por las harinas de quinua (HQ), kiwicha (HK) y tarwi (HT) y sus mezclas binarias y ternarias	52
Tabla 11: Modelos matemáticos predictivos que indican el efecto de cada componente de la mezcla y sus interacciones sobre los parámetros de color, % CRA, propiedades de pasta y propiedades texturales de los geles formados al mezclar harina de quinua (HQ), harina de kiwicha (HK) y harina de tarwi (HT)	55
Tabla 12: Formulaciones de panes libres de gluten realizadas para la primera parte de la investigación	56
Tabla 13: Propiedades viscoelásticas de la masa y parámetros cinéticos durante la fermentación	57
Tabla 14: Propiedades de pasta de las formulaciones	60

Tabla 15: Características de calidad de los panes libres de gluten a base de almidón.....	62
Tabla 16: Formulaciones de masas libres de gluten con harinas de quinua, kiwicha y tarwi en diferentes proporciones	65
Tabla 17: Propiedades texturales de las masas libres gluten elaboradas con diferentes concentraciones de harinas de quinua, kiwicha y tarwi	66
Tabla 18: Propiedades reológicas de masas libres gluten elaboradas con diferentes concentraciones de harinas de quinua, kiwicha y tarwi	70
Tabla 19: Parámetros cinéticos de fermentación de las masas libres gluten elaboradas con diferentes concentraciones de harinas de quinua, kiwicha y tarwi	73
Tabla 20: Matriz de correlación (r) entre las propiedades texturales y reológicas de las masas con los parámetros cinéticos de crecimiento de las masas durante el proceso de fermentación	76
Tabla 21: Formulaciones obtenidas del diseño de mezcla D-optimal, realizadas en la cuarta parte de la investigación, para determinar el nivel óptimo de harina de quinua o kiwicha, agua y goma xantana.....	78
Tabla 22: Formulaciones obtenidas del diseño de mezcla D-optimal, realizadas en la cuarta parte de la investigación, para determinar el nivel óptimo de harina de quinua o kiwicha, agua y goma de tara	78
Tabla 23: Formulaciones obtenidas del diseño de mezcla D-optimal, realizadas en la cuarta parte de la investigación, para determinar el nivel óptimo de harina de quinua o kiwicha, agua y goma mezcla de goma xantana y goma de tara en relación 1:1 (GX+GT)	79
Tabla 24: Propiedades texturales de masas libres de gluten a base de almidón de papa con diferentes proporciones de harina de quinua, agua y goma xantana	82
Tabla 25: Propiedades texturales de masas libres de gluten a base de almidón de papa con diferentes proporciones de harina de quinua, agua y goma de tara.....	87
Tabla 26: Propiedades texturales de masas libres de gluten a base de almidón de papa con diferentes proporciones de harina de quinua, agua y mezcla de goma (xantana: tara, 1:1).....	94
Tabla 27: Resumen del análisis de varianza y ajuste del modelo matemático seleccionado para explicar el comportamiento de las propiedades texturales de las masas libres de gluten con quinua	95
Tabla 28: Modelos polinómicos predichos que muestran el efecto de cada ingrediente (HQ: harina de quinua; A: Agua; GX: Goma xantana; GT: Goma de tara; MG: Mezcla de gomas) y sus interacciones significativas sobre las propiedades texturales de las masas	96

Tabla 29: Formulaciones óptimas y propiedades texturales predichas de masas libres de gluten con harinas de quinua y diferentes tipos y combinación de gomas	98
Tabla 30: Propiedades de pasta de las formulaciones optimizadas de harina de quinua (OP1 y OP2) con diferentes gomas	101
Tabla 31: Características de calidad de las formulaciones óptimas de los panes libres de gluten con harina de quinua	103
Tabla 32: Propiedades texturales de masas libres de gluten a base de almidón de papa con diferentes proporciones de harina de kiwicha, agua y goma xantana	111
Tabla 33: Propiedades texturales de masas libres de gluten a base de almidón de papa con diferentes proporciones de harina de kiwicha, agua y goma de tara.....	116
Tabla 34: Propiedades texturales de masas libres de gluten a base de almidón de papa con diferentes proporciones de harina de kiwicha, agua y mezcla de gomas.....	120
Tabla 35: Resumen del análisis de varianza y ajuste del modelo matemático seleccionado para explicar el comportamiento de las propiedades texturales de las masas con kiwicha	123
Tabla 36: Modelos polinómicos predichos que muestran el efecto de cada ingrediente (HK: harina de kiwicha; A: Agua; GX: Goma xantana; GT: Goma de tara; MG: Mezcla de gomas) sobre las propiedades texturales de las masas	124
Tabla 37: Formulaciones óptimas y propiedades texturales predichas de masas libres de gluten con harinas de kiwicha y diferentes tipos y combinación de gomas.....	126
Tabla 38: Propiedades de pasta de las formulaciones optimizadas de harina de kiwicha (OP1 y OP2) con diferentes gomas	129
Tabla 39: Características de calidad de las formulaciones óptimas de los panes libres de gluten con harina de kiwicha.....	130
Tabla 40: Formulaciones obtenidas del DCCR para determinar el nivel óptimo de harina de tarwi y agua en masas libres de gluten a base de almidón de papa con harina de quinua o harina de kiwicha	135
Tabla 41: Propiedades texturales de masas libres de gluten a base de almidón de papa y harina de quinua con diferentes proporciones de harina de tarwi y agua	137
Tabla 42: Propiedades texturales de masas libres de gluten a base de almidón de papa y harina de kiwicha con diferentes proporciones de harina de tarwi y agua.....	137
Tabla 43: Resumen del análisis de varianza y ajuste del modelo matemático seleccionado para explicar el comportamiento de las propiedades texturales de las masas libres de gluten con harina de tarwi.....	140

Tabla 44: Modelos polinómicos predichos que muestran el efecto de cada ingrediente (HQ: harina de tarwi; A: Agua) sobre las propiedades texturales de las masas	141
Tabla 45: Formulaciones óptimas y propiedades texturales predichas de masas libres de gluten con harinas de tarwi.....	142
Tabla 46: Características de calidad de las formulaciones óptimas de los panes libres de gluten con harina de tarwi	145

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Fracciones proteicas del trigo.....	3
Figura 2: Principales fracciones proteicas del trigo, cebada y centeno	4
Figura 3: Desórdenes alimenticios relacionados con la ingesta de gluten.....	6
Figura 4: Mecanismo del desarrollo de la enfermedad celíaca (IEL: linfocitos intraepiteliales, TG2: transglutaminasa 2, DC: células dendríticas).....	8
Figura 5: Número de publicaciones de artículos científicos indexados en SCOPUS por año 11	
Figura 6: <i>Stand</i> de productos libres de gluten ofertados por un supermercado peruano. Fotografía tomada en el mes de abril del 2019 en el supermercado “Wong” de Plaza San Miguel, en la ciudad de Lima – Perú.	12
Figura 7: Esquema del proceso de elaboración de pan de trigo (A) comparado con el proceso de desarrollo de pan sin gluten (B).....	19
Figura 8: Diagrama general de la investigación realizada en la presente tesis.....	28
Figura 9: Perfil de viscosidad obtenido en el analizador rápido de viscosidad (RVA), donde (♦) es la viscosidad del almidón o harina y (--) es la rampa de temperatura.....	30
Figura 10: Perfil de textura obtenido de la prueba de Back Extrusion realizada en el texturómetro universal INSTRON	31
Figura 11: Aplicación computacional “ <i>Back Extrusion Analyzer 1.1v</i> ” desarrollada para la determinación de las propiedades texturales.....	32
Figura 12: A) Accesorios para la prueba de <i>Back Extrusion</i> . B) Sistema montado para la ejecución de la prueba de Back Extrusion en el INSTRON. C) Perfil textural obtenido durante la penetración del plunger en la prueba de <i>Back Extrusion</i>	36
Figura 13: Curva típica de desarrollo de la masa durante el proceso de fermentación con sus parámetros cinéticos, según la ecuación de Gompertz (Ec. 11 y 12).....	38
Figura 14: Diagramas de contorno de los efectos de las mezclas de harinas de quinua, kiwicha y tarwi sobre la viscosidad pico (cP), viscosidad mínima (cP), viscosidad de retrogradación (cP) y viscosidad final (cP)	49
Figura 15: Diagramas de contorno de los efectos de las mezclas de harinas de quinua, kiwicha y tarwi sobre la firmeza (N), consistencia (N.s), cohesividad (N) e índice de viscosidad (N.s) de los geles formados	53

Figura 16: Masas sin gluten durante la fermentación. CS-XG: almidón de maíz con goma xantana; CS-TG: almidón de maíz con goma tara; PS-XG: almidón de papa con goma xantana; PS-TG: almidón de papa con goma tara.....	59
Figura 17: Imágenes representativas de panes sin gluten. CS-XG almidón de maíz con goma xantana, CS-TG almidón de maíz con goma tara, PS-XG almidón de papa con goma xantana, PS-TG almidón de papa con goma tara. La barra blanca representa 1 cm	63
Figura 18: Curvas de flujo y curvas de crecimiento durante el proceso de fermentación de masas libres de gluten elaboradas con granos andinos en diferentes concentraciones	72
Figura 19: Crecimiento de las masas libres de gluten (GFD) con diferentes concentraciones de harinas de granos andinos. Quinoa (Q). Kiwicha (K), Tarwi (T)	74
Figura 20: Relación potencial entre los parámetros cinéticos del crecimiento de las masas durante el proceso de fermentación con la firmeza, el índice de viscosidad e índice de consistencia de las masas libres de gluten elaboradas con harinas de granos andinos	76
Figura 21: Gráficos de traza (Cox) para evaluar la influencia de los ingredientes (A: Harina de quinua; B: Agua, C: Goma xantana) en los parámetros de textura en las formulaciones de masas libres de gluten	83
Figura 22: Efecto de la concentración mínima (0.5%) y máxima (2%) de la goma xantana, goma de tara y mezcla de ambas gomas en la consistencia de las masas cuando se mezclan la harina de quinua y agua.....	85
Figura 23: Gráficos de trazas (Cox) para evaluar la influencia de los ingredientes (A: Harina de quinua; B: Agua, C: Goma de tara) en los parámetros de textura en las formulaciones de masas libres de gluten	88
Figura 24: Gráficos de trazas (Cox) para evaluar la influencia de los ingredientes (A: Harina de quinua; B: Agua, C: Mezcla de goma xantana y goma de tara, 1:1) en los parámetros de textura en las formulaciones de masas libres de gluten	93
Figura 25: Validación gráfica del perfil textural de la masa control con las formulaciones óptimas (OP1 – OP2) con harina de quinua y diferentes gomas (goma xantana, goma de tara y mezcla de ambas gomas).....	99
Figura 26: Imágenes representativas de los panes libres de gluten optimizados con harinas de quinua y diferentes tipos de gomas.	107
Figura 27: Gráficos de trazas (Cox) para evaluar la influencia de los ingredientes (A: Harina de kiwicha; B: Agua, C: Goma xantana) en los parámetros de textura en las formulaciones de masas libres de gluten	112

Figura 28: Efecto de la concentración mínima (0.5%) y máxima (2%) de la goma xantana, goma de tara y mezcla de ambas gomas en la consistencia de las masas cuando se mezclan la harina de kiwicha y agua.....	113
Figura 29: Gráficos de trazas (Cox) para evaluar la influencia de los ingredientes (A: Harina de kiwicha; B: Agua, C: Goma de tara) en los parámetros de textura en las formulaciones de masas libres de gluten	117
Figura 30: Gráficos de trazas (Cox) para evaluar la influencia de los ingredientes (A: Harina de kiwicha; B: Agua, C: Mezcla de goma xantana y goma de tara, 1:1) en los parámetros de textura en las formulaciones de masas libres de gluten	121
Figura 31: Validación gráfica del perfil textural de la masa control con las formulaciones óptimas (OP1 – OP2) con harina de kiwicha y diferentes gomas (goma xantana, goma de tara y mezcla de ambas gomas).....	127
Figura 32: Imágenes representativas de los panes libres de gluten optimizados con harinas de kiwicha y diferentes tipos de gomas	133
Figura 33: Superficie de respuesta y relación de los valores predichos y reales utilizando el modelo cuadrático para la predicción de la firmeza (A y A1) y la consistencia (B y B1) de la masa compuesta por harina de quinua, almidón de papa y harina de tarwi	139
Figura 34: Superficie de respuesta y relación de los valores predichos y reales utilizando el modelo cuadrático para la predicción de la firmeza (A y A1) y la consistencia (B y B1) de la masa compuesta por harina de kiwicha, almidón de papa y harina de tarwi	139
Figura 35: Gráficos de contorno y de superficie de respuesta de la variable Deseabilidad, para la masa con harina de quinua, almidón de papa y harina de tarwi (A y A1) y la masa con harina de kiwicha, almidón de papa y harina de tarwi (B y B1)	144

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Códigos de programación en Visual Studio 2015 desarrollados para la aplicación Back Extrusion Analyzer 1.1 v	175
Anexo 2: Valores de λ para diferentes valores de n y σ	177
Anexo 3: Gráfico para determinar el valor de θ para determinar la velocidad de corte a partir de la velocidad del émbolo.....	178
Anexo 4: Fijación de curvas no lineales obtenidas en el proceso de fermentación de masas libres de gluten con harinas de cultivos andinos	179
Anexo 5: PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS	182

LISTA DE SÍMBOLOS

A_a	Área de la sección transversal por donde fluirá el fluido (<i>annulus</i>), cm ²
A_o	Área inicial, cm ²
A_p	Área del émbolo que desplazará el fluido, cm ²
C	Cantidad asintótica de aumento que se produce cuando t aumenta indefinidamente
D_o	Diámetro inicial, cm
F_n	Fuerza máxima ejercida corregida por la fuerza de la gravedad, N
F_t	Fuerza máxima de la masa, N
G'	Módulo de almacenamiento (comportamiento elástico), Pa
G''	Módulo de pérdida (comportamiento viscoso), Pa
K	Coefficiente de consistencia, Pa.s ⁿ
L_p	Desplazamiento obtenido por el <i>plunger</i> , cm
n	Índice de comportamiento del flujo
R_c	Radio interno del cilindro hueco, cm
r_m	Radio de un punto en la corriente de flujo donde la velocidad es máxima, cm
R_p	Radio del émbolo, cm
R_s	Radio del poste que coloca al émbolo en el centro del cilindro, cm
$Tan \delta$	Relación entre el comportamiento viscoso y elástico
t	Tiempo, min
V_{max}	Tasa de máxima de crecimiento del diámetro o área, min ⁻¹
X	Momento en el que la tasa de crecimiento absoluta es máxima, min
γ	Esfuerzo cortante, Pa
θ	Parámetro adimensional que satisface las expresiones para la integral de la velocidad de punto adimensional del fluido a través del <i>annulus</i> y la cantidad de fluido desplazado por el émbolo
λ	Radio adimensional
σ	Espacio anular, cm
σ_c	Velocidad de corte, s ⁻¹
σ_s	Relación entre diámetro del poste con el diámetro del cilindro, cm

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo desarrollar panes libres de gluten con harinas de cultivos andinos. Para ello se desarrolló la investigación en cinco partes. En la primera parte se evaluaron las propiedades reológicas y texturales de las mezclas de las harinas de quinua, kiwicha y tarwi, con el objetivo de evaluar sus efectos de interacción. En la segunda parte se evaluó la influencia de la goma de tara y goma xantana sobre las propiedades reológicas de las masas y textura de los panes libres de gluten a base de almidón de maíz y almidón de papa, con el fin de seleccionar la formulación de un pan control. En la tercera parte, se sustituyó parcialmente la formulación del pan control por harina de quinua (10, 30 y 50%), harina de kiwicha (10, 30 y 50%) y harina de tarwi (10, 20 y 30%) y se evaluaron las propiedades reológicas y texturales de las masas y se correlacionaron con los parámetros cinéticos de crecimiento de la masa durante el proceso de fermentación. En la cuarta parte del estudio se optimizó el nivel de agua, goma (goma de tara, goma xantana, mezcla de las dos gomas) y harina de quinua o harina de kiwicha, que logre imitar las propiedades texturales de una masa control ($3,69 \pm 0,2$ N de firmeza; $56,46 \pm 3,7$ N.s de consistencia; $2,70 \pm 0,2$ N de cohesividad y $36,18 \pm 2,1$ N.s de índice de viscosidad) y finalmente, en la quinta parte, se buscó optimizar el contenido de agua y harina de tarwi en las formulaciones desarrolladas con harina de quinua y kiwicha. Al término de la evaluación experimental se desarrolló panes libres de gluten con elevado contenido de proteínas, grasa, fibra dietaria y minerales en su composición, así como aceptables en volumen específico y textura.

Palabras claves: Quinua, kiwicha; tarwi, panes libres de gluten, propiedades texturales.

ABSTRACT

The aim of this research was to develop gluten-free breads with Andean grain flours. The research was developed in five stages. In the first stage, the rheological and textural properties of quinoa, kiwicha and tarwi flour mixtures were evaluated, in order to determine their interaction effects. In the second stage, the influence of tara gum and xanthan gum on the rheological properties of the dough and texture of gluten-free breads based on corn starch and potato starch was evaluated in order to select a formulation of gluten-free control bread. In the third stage, the control formulation was partially replaced by quinoa flour (10, 30 and 50%), kiwicha flour (10, 30 and 50%) and tarwi flour (10, 20 and 30%) and the rheological and textural properties of the doughs were evaluated and correlated with the kinetic parameters of dough growth during the leavening process. In the fourth stage of the study the level of water, gum (tara gum, xanthan gum and mixture of two gums) and quinoa flour or kiwicha flour was optimized imitating the textural properties of a control dough ($3,69 \pm 0,2$ N of firmness; $56,46 \pm 3,7$ Ns of consistency; $2,70 \pm 0,2$ N of cohesiveness and $36,18 \pm 2,1$ Ns of viscosity index). Finally, in the fifth stage, the water and tarwi flour content was optimized in formulations developed with quinoa and kiwicha flour. At the end of the experimental evaluations, gluten-free breads with high protein, fat, dietary fiber and mineral content with acceptable specific volume and texture were developed.

Keywords: Quinoa, kiwicha, tarwi, gluten-free breads, textural properties.

I. INTRODUCCIÓN

Existe una creciente demanda de productos de panificación que son sustitutos a los productos tradicionales con trigo, debido al aumento del número de consumidores que presentan reacciones negativas al momento de ingerir gluten, como los celíacos, y por consumidores que buscan alternativas “saludables”. Aunque esta última afirmación no es del todo cierta en la realidad, ya que la gran mayoría de productos libres de gluten disponibles en el mercado son de baja calidad nutricional (Foschia *et al.*, 2017; Roman *et al.*, 2019).

La enfermedad celíaca es uno de los trastornos más comunes en todo el mundo, con una prevalencia estimada de 1 por ciento de la población en general y el único tratamiento, para los pacientes, es la supresión de la ingesta de alimentos que tengan gluten (Catassi y Fasano, 2008). El pan es un alimento de consumo masivo y diario y su elaboración sin la presencia del gluten resulta en todo un reto tecnológico. La mayor parte de los productos de panificación para celíacos son elaborados a base de harina de arroz, debido a su sabor suave, color blanco, digestibilidad de los hidratos de carbono y la hipoalergenicidad de sus proteínas (Gujral y Rosell, 2004; Marco y Rosell, 2008). A pesar de las ventajas, anteriormente descritas, las proteínas del arroz son tecnológicamente inadecuadas para el procesamiento de alimentos, debido a que son extremadamente insolubles y muy hidrofóbicas, produciendo panes de baja calidad física y nutricional (Estévez *et al.*, 2016; Hosseini *et al.*, 2018).

Los cultivos andinos como: la quinua, la kiwicha y el tarwi, son plantas que forman granos ricos en almidón y proteínas, tienen excelentes componentes nutritivos, ácidos grasos poliinsaturados y elevado contenido en minerales. Además, no contienen proteínas que formen el gluten y sus harinas son adecuadas, una vez eliminados los componentes no deseables; por lo tanto, son una alternativa atractiva para la producción de panes libres de gluten de alta calidad física y nutricional (Rosell *et al.*, 2009; Schoenlechner, 2017; Repo-Carrasco-Valencia *et al.*, 2019).

La mayoría de los productos libres de gluten en el mercado nacional son de mala calidad física, manifestando bajo volumen, migas compactas y duras. Esto es debido a la ausencia de la red de gluten, la cual es la encargada de otorgarle la viscoelasticidad a la masa para que sea capaz de retener el gas producido en la fermentación. Una alternativa tecnológica para mejorar las características de los panes libres de gluten es buscar aditivos que puedan imitar la red de gluten, y para incrementar su valor nutricional, se viene experimentando con harinas más nutritivas, como los granos andinos (Alvarez-Jubete *et al.*, 2010a, b; Sciarini *et al.*, 2010a; Turkut *et al.*, 2016).

Por lo tanto, el objetivo general de la presente investigación fue: Desarrollar panes libres de gluten con harinas de quinua (*Chenopodium Quinoa* Willd.), kiwicha (*Amaranthus caudatus* L.) y tarwi (*Lupinus mutabilis* S.). Para lograr dicho objetivo, la presente investigación se realizó en 5 partes; siendo cada parte un objetivo específico. Los objetivos específicos, de la investigación fueron: (1) Evaluar las propiedades texturales de las mezclas de harinas de quinua, kiwicha y tarwi. (2) Evaluar la influencia de la goma de tara y goma xantana en las masas y panes libres de gluten elaborados a base de almidón de maíz y almidón de papa. (3) Evaluar las propiedades reológicas y texturales de las masas libres de gluten a base de almidón de papa con diferentes niveles de sustitución de harina de quinua (10, 30, 50%), kiwicha (10, 30, 50%) y tarwi (10, 20 y 30%). (4) Optimizar las propiedades texturales de las masas libres de gluten a base de almidón de papa con harina de quinua o harina de kiwicha con goma tara, goma xantana y con la mezcla de ambas gomas. (5) Optimizar las propiedades texturales de las masas libres de gluten a base de almidón de papa, harina de quinua o harina de kiwicha con harina de tarwi y evaluar la composición nutricional de los panes libres de gluten optimizados.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. EL GLUTEN Y SUS PROPIEDADES TECNOLÓGICAS EN EL PAN

El gluten es un conjunto de proteínas responsables de la estructura en el pan, así como de proporcionar las características elásticas a la masa, y contribuye a la apariencia y estructura de la miga de muchos productos horneados. Las propiedades del gluten se hacen evidentes cuando la harina se hidrata, dando una masa extensible, con buenas propiedades de retención de gas y una buena estructura de la miga en el pan horneado (Machado y Carvalho, 2017).

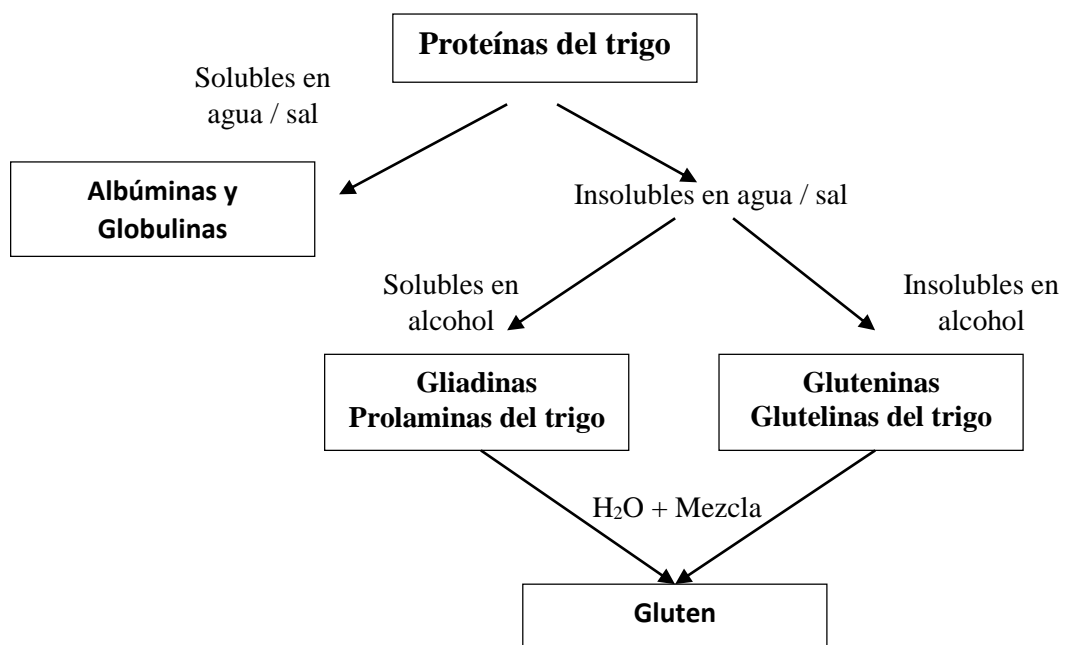


Figura 1: Fracciones proteicas del trigo

FUENTE: Arendt *et al.* (2008)

En general, el término “Gluten” es utilizado para describir la fracción de proteínas en el trigo. De acuerdo con Arendt *et al.* (2008), las proteínas del gluten aportan entre el 80 al 85% de las proteínas del trigo, siendo las principales proteínas de almacenamiento de este

grano. Los péptidos del gluten son en gran medida insolubles en agua o soluciones salinas diluidas (Figura 1). Se pueden distinguir dos grupos funcionalmente distintos de péptidos en el gluten: las gliadinas monoméricas y las gluteninas poliméricas (extraíbles y no extraíbles) (Arendt *et al.*, 2008).

El trigo, el centeno y la cebada son miembros de la familia de las gramíneas (Poaceae) y están estrechamente relacionados taxonómicamente, estos cereales también contienen péptidos similares al conjunto de proteínas que conforman el gluten (Figura 2). Todos estos cereales y sus prolaminas [gliadinas (trigo), hordeína (cebada), secalina (centeno)] son tóxicos para las personas con enfermedad celíaca (Catassi y Fasano, 2008), como se explicará más adelante.

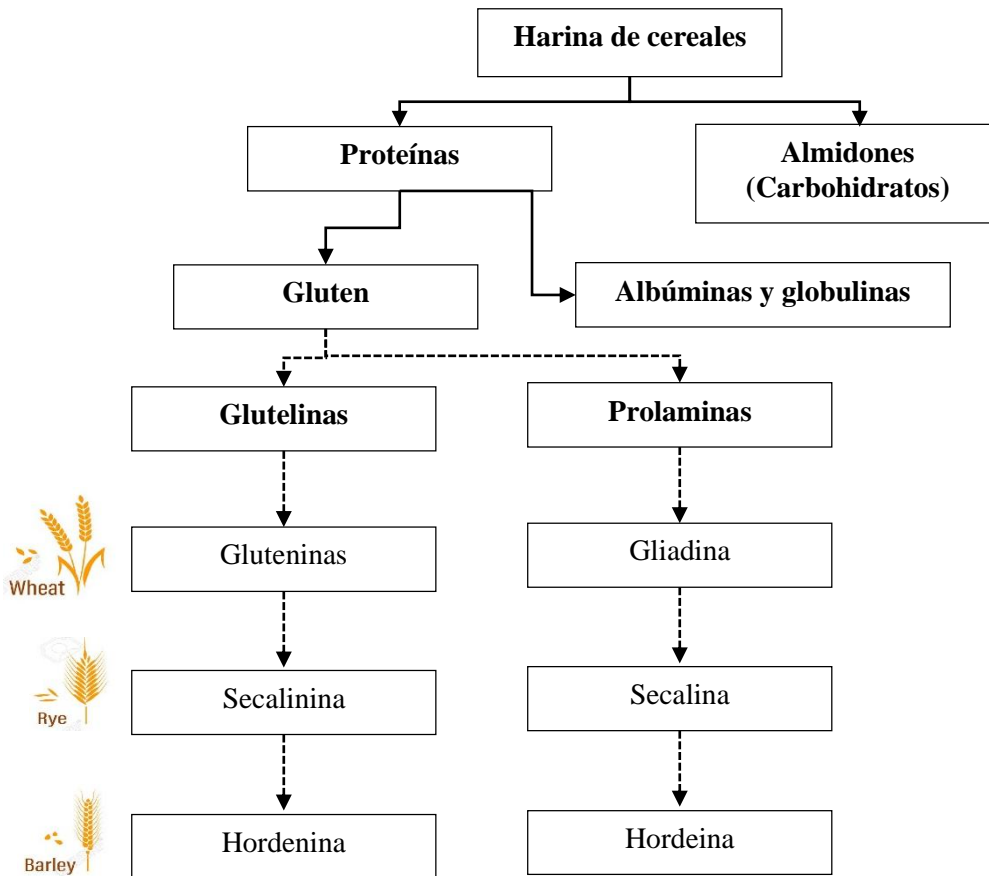


Figura 2: Principales fracciones proteicas del trigo, cebada y centeno

La harina de trigo es casi única entre las harinas de cereales con propiedades que le permiten ser utilizada para preparar una amplia gama de productos horneados con levadura que el consumidor encuentra atractivos. Estas propiedades se deben a las propiedades

viscoelásticas de las proteínas de almacenamiento (gliadina y glutenina) (Machado y Carvalho, 2017). Cuando está completamente hidratado, el gluten presenta propiedades cohesivas, elásticas y viscosas que combinan los extremos de los dos componentes. La cantidad y la calidad de la proteína del gluten son parámetros importantes para la calidad del uso final del trigo (Zhang *et al.*, 2007).

Cuando la masa se desarrolla mezclando o laminando, la proteína del gluten forma una red viscoelástica continua en toda la masa. Estas propiedades hacen que el trigo solo sea adecuado para la preparación de una gran diversidad de productos alimenticios: panes, fideos, pastas, entre otros (Machado y Carvalho, 2017).

Se ha informado que la fracción de gliadina contribuye a las propiedades viscosas y a la extensibilidad de la masa de trigo, mientras que la fracción de glutenina del gluten de trigo tiene un papel destacado en el elástico y el fortalecimiento de la masa (Xu *et al.*, 2007).

Está claro que la funcionalidad de las proteínas del gluten es fundamental para la calidad del pan. Los experimentos de fraccionamiento y reconstitución muestran claramente que las variaciones en el rendimiento de la panificación están determinadas por las proteínas del gluten (Veraverbeke *et al.*, 2002).

2.2. TRASTORNOS RELACIONADOS CON LA INGESTA DE GLUTEN

La enfermedad celíaca ha alcanzado especial atención en los últimos años. Hasta mediados de la década de 1990, la enfermedad celíaca se consideraba extremadamente rara y, por lo tanto, era prácticamente ignorada por los profesionales de la salud. En solo 10 años, la enfermedad celíaca ha pasado de la oscuridad al foco popular en todo el mundo (Sapone *et al.*, 2012). Las cifras de prevalencia de la enfermedad celíaca (en particular en los países del norte) aumentan constantemente. Se estima que su prevalencia media es del 1 al 2% de la población mundial (Reilly y Green, 2012). En países europeos, según el diagnóstico serológico, la prevalencia de la enfermedad celíaca varía de 1: 50 a 1: 100 en Suecia (Carlsson *et al.*, 2001) o 1: 180 en Italia (Volta *et al.*, 2001). Junto con la enfermedad celíaca, otras afecciones relacionadas con la digestión del gluten han surgido como problemas de salud.

Hay tres formas principales de reacciones al gluten: alérgica (alergia al trigo), autoinmune (enfermedad celíaca, dermatitis herpetiforme y ataxia del gluten) y posiblemente inmunomediada (sensibilidad al gluten) (Sapone *et al.*, 2012) (Figura 3). La alergia al trigo se define como una reacción inmunológica adversa a las proteínas del trigo y se desencadena por secuencias repetidas en los péptidos de gluten, que causan una reacción inmunológica. Los anticuerpos Ig E juegan un papel central en la patogénesis de las enfermedades alérgicas al trigo. Su prevalencia en todo el mundo se considera inferior al 1% (Sapone *et al.*, 2012). Las personas que padecen alergia al trigo tienen que excluir el trigo de su dieta, pero pueden incluir todos los demás cereales.

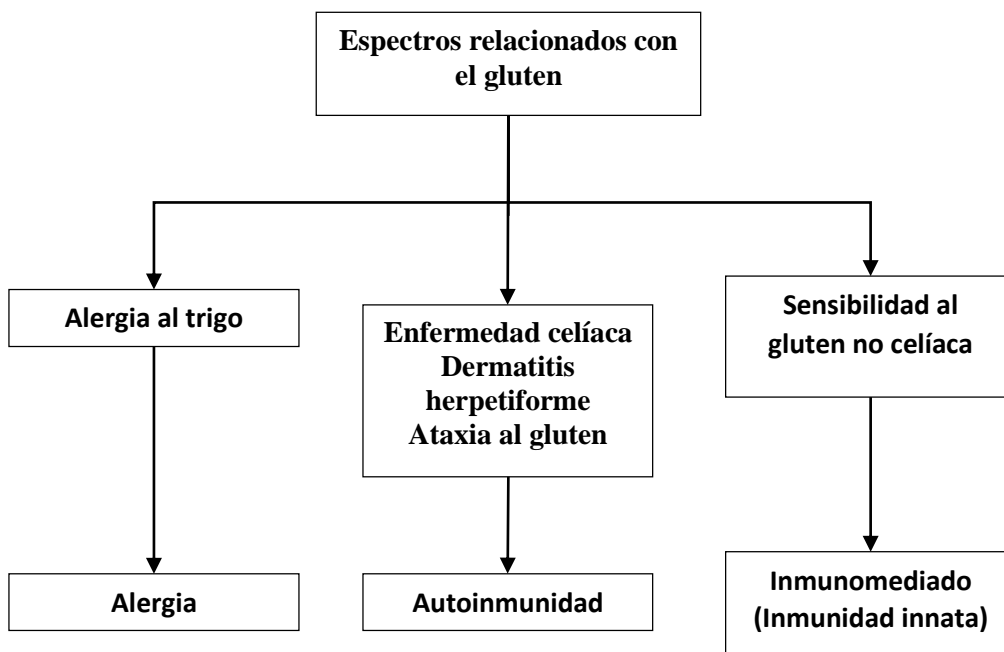


Figura 3: Desórdenes alimenticios relacionados con la ingesta de gluten

FUENTE: Mulder *et al.*, (2013)

La enfermedad celíaca es una enfermedad autoinmune multisistémica caracterizada por una respuesta inmune desregulada a la transglutaminasa tisular (tTG). La enfermedad celíaca está fuertemente asociada con los genes específicos de antígeno leucocitario humano (HLA) clase II, HLQ-DQ2 y HLQ-D8. Solo las personas con HLQ-DQ2 y / o HLQ-D8 positivos pueden desarrollar la enfermedad celíaca. La enfermedad celíaca causa lesión de la mucosa del intestino delgado clasificada en diferentes etapas de gravedad. Estos síntomas de la enfermedad celíaca son provocados por el gluten, un complejo de proteínas en el trigo con

proteínas tóxicas equivalentes que se encuentran en otros cereales, en particular el centeno y la cebada (Schoenlechner, 2017).

El desarrollo de la celiaquía requiere la interacción de factores genéticos, inmunológicos y ambientales (Catassi y Fasano, 2008; DeGeorge *et al.*, 2017). Según Larretxi *et al.*, (2017) cuando se ingiere el gluten que está presente en los alimentos, se metaboliza en péptidos (prolamina). Tomando el trigo como ejemplo, la gliadina atraviesa la barrera epitelial, que tiene una permeabilidad aumentada en estos pacientes, y alcanza la lámina propia. En este nivel, el péptido se desamina por una transglutaminasa tisular (tTG2), que permite su reconocimiento por HLA DQ-2 o DQ8. La célula presentadora de antígeno presenta glutamina desamidada a células T CD4. Estas células inmunitarias, por un lado, secretan citocinas proinflamatorias que causan daño (atrofia de las vellosidades e hiperplasia de la cripta) a los enterocitos pero, por otro lado, activan las células B que producen anticuerpos contra la gliadina u otra prolamina tóxica. Al mismo tiempo, la glutamina desamidada induce la producción de IL15 por el enterocito, lo que estimula la proliferación de linfocitos intraepiteliales (IEL) (Figura 4).

El único tratamiento eficaz es una exclusión estricta del gluten de la dieta. Lograr la curación de la mucosa es esencial, ya que la atrofia vellosa persistente parece aumentar el riesgo de complicaciones a largo plazo, como la osteoporosis y trastornos relacionados a la falta de absorción de nutrientes (Catassi y Yachha, 2009; Sapone *et al.*, 2012).

Recientemente se ha reconocido otro trastorno del gluten, en el que no intervienen mecanismos alérgicos ni autoinmunes. Estos se definen generalmente como la sensibilidad al gluten (Nejad *et al.*, 2012). Las personas afectadas por la sensibilidad al gluten sufren síntomas gastroenterológicos similares a la enfermedad celíaca, pero, a diferencia de la enfermedad celíaca, el daño a la mucosa en el intestino delgado no se produce y no se acompaña de la aparición de anticuerpos tTG. El diagnóstico de este trastorno no es fácil, porque en la actualidad no hay biomarcadores específicos para la sensibilidad al gluten. Se estima que la prevalencia de la sensibilidad al gluten es de hasta el 7% de la población total (Nejad *et al.*, 2012). Para tratar este trastorno, nuevamente se debe eliminar el gluten de la dieta, pero aún no está completamente claro qué nivel de rastros de gluten pueden tolerar.

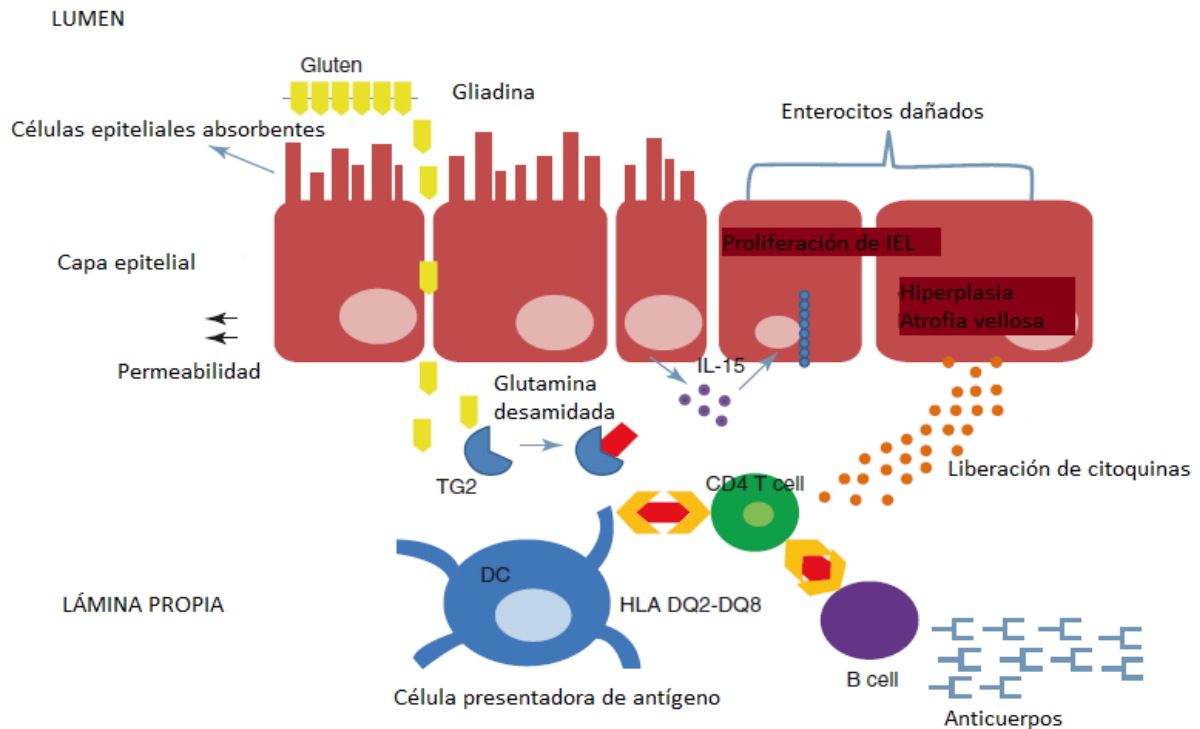


Figura 4: Mecanismo del desarrollo de la enfermedad celíaca (IEL: linfocitos intraepiteliales, TG2: transglutaminasa 2, DC: células dendríticas)

FUENTE: Larretxi *et al.* (2017)

Los trastornos relacionados con el gluten solo pueden tratarse con una dieta sin gluten de por vida. El término "gluten" comprende las fracciones de las proteínas de almacenamiento del endospermo, a saber, la prolamina y la glutelina, de especies de cereales específicas (trigo, centeno, cebada y eventualmente avena). Su efecto tóxico ni siquiera se minimiza por la desnaturalización o la hidrólisis enzimática de los péptidos (Urban, 2007).

Por lo tanto, las personas que padecen la enfermedad celíaca no pueden consumir ninguno de los cereales o productos mencionados. Teóricamente, existe una alternativa, que es, sin embargo, mucho más difícil de realizar: esto implica eliminar estas fracciones de las materias primas o hidrolizarlas enzimáticamente a sus aminoácidos, permitiendo así el consumo de celíacos.

2.3. DEFICIENCIAS NUTRICIONALES DE LOS PANES LIBRES DE GLUTEN

El pan ha sido un alimento básico para muchas culturas en todo el mundo. Es uno de los primeros alimentos "procesados" hechos y consumidos por la humanidad. La evidencia

arqueológica indica que una "industria" de fabricación de pan relativamente sofisticada se había desarrollado en Egipto hace más de 5000 años (3000 a. C.) para proporcionar alimento a la fuerza laboral sustancial necesaria para construir pirámides y otras estructuras. Los romanos consideraban que la producción de pan de trigo era un signo de un alto grado de civilización y un signo de poder excepcional. De hecho, el control de la producción y la distribución de pan se ha utilizado como un medio para ejercer influencia política sobre la población durante al menos los últimos 2000 años. Hoy en día, los productos horneados siguen siendo la base de la dieta diaria en muchos países y el pan todavía juega un papel importante, de importancia religiosa en los rituales sagrados de muchas culturas (Arendt y Zannini, 2013).

Los productos de panificación sin gluten, en comparación con sus equivalentes que contienen gluten, son más bajos en proteínas, vitaminas, minerales y fibra dietética (Mandala y Kapsokfalou, 2011).

El contenido promedio de proteína de los panes libres de gluten, en el mercado, es de 3,91%, lo cual es mucho más bajo que sus homólogos hechos con harina de trigo, ya que estos pueden llegar a tener 8,85% de proteína (Romana *et al.*, 2019). Estudios anteriores realizados por Allen y Orfila (2018) y do Nascimento *et al.* (2014), también han destacado el menor contenido de proteínas que contienen los panes libres de gluten en comparación con los panes que contienen gluten. Esto es explicado por el uso de harina de arroz y almidones en la elaboración de panes libres de gluten.

Aunque algunos de estos panes incluyen proteínas exógenas de diferentes fuentes, su cantidad no parece ser suficiente para igualar el contenido de proteínas de sus contrapartes de gluten. Además, las harinas libres de gluten con mayor contenido de proteínas, como la quinua, el amaranto o las legumbres, no suelen usarse como un ingrediente principal en las formulaciones existentes en el mercado (Romana *et al.*, 2019).

Con respecto al contenido de fibra, es de esperarse que este sea menor en comparación con el pan de trigo, debido al uso de los almidones como fuente primaria en la formulación de panes libres de gluten. Según el estudio realizado por do Nascimento *et al.* (2014) en Brasil, el contenido promedio de fibra de los panes libres de gluten fue de 0,7%, mientras que el contenido promedio de fibra de los panes con gluten fue de 4,3%.

Según Hosseini *et al.* (2018), el uso de almidones y harinas refinadas con bajo contenido de fibra en productos libres de gluten conduce a una ingesta inadecuada de fibra. La incidencia de anemia en pacientes celíacos recién diagnosticados ha sido reportada en un 4% en los Estados Unidos. También, se conoce que los productos que contienen gluten tienen un contenido de folato más alto que sus homólogos libres de gluten. Por lo tanto, se debería buscar el uso alternativo de harinas más nutritivas que contribuyan en la nutrición de los pacientes celíacos.

En consecuencia, los pacientes celíacos enfrentan varios problemas relacionados con la nutrición, como pérdida de peso, anemia por deficiencia de hierro, osteoporosis, síndrome de fatiga y diabetes. Además del contenido de nutrientes, los productos sin gluten a base de almidón son menos sabrosos que los productos que contienen gluten. En el caso del pan, también existe una alta tendencia al envejecimiento debido a la ausencia de gluten (Mandala y Kapsokefalou, 2011).

Los pseudocereales como la quinua y el amaranto se pueden usar para mejorar el contenido nutricional, particularmente el contenido de proteínas del producto final. Además, se pueden agregar proteínas de diferentes fuentes como la soya, la arveja, la albúmina de huevo y el suero de leche para aumentar el valor nutricional de los productos sin gluten (Foschia *et al.*, 2017). Al agregar proteínas, también se informa una mejora en la calidad del pan sin gluten debido a la formación de una fase proteica continua (Sciarini *et al.*, 2010b). De ello se deduce que la selección de las proteínas utilizadas en una formulación sin gluten es un tema crítico.

2.4. DESAFÍOS EN EL DESARROLLO DE PANES LIBRES DE GLUTEN

La investigación en temas relacionados a productos “libres de gluten” (*Gluten-free*) ha crecido exponencialmente desde hace 10 años. Esto se puede evidenciar en la producción científica de los últimos años. Tras una búsqueda en la base de datos de SCOPUS con la palabra clave: “*Gluten-free*”, podemos observar que en el año 2018 se registraron 226 artículos científicos, evidenciando un incremento exponencial, comparado con la producción científica de los últimos años. Del mismo modo, el número de artículos científicos registrados en la base de datos de SCOPUS con las palabras claves: “*Gluten-free bread*” fue de 54. Esta tendencia refleja el interés del tema desde el campo de la investigación (Figura 5).

El incremento de productos de panificación libres de gluten en el mercado es una tendencia mundial. Prueba de ello es la gran cantidad de marcas comerciales que se encuentran en el mercado. En una reciente investigación, Roman *et al.* (2019) detectaron 228 tipos de panes libres de gluten comerciales de 32 marcas, pertenecientes a 12 países diferentes.

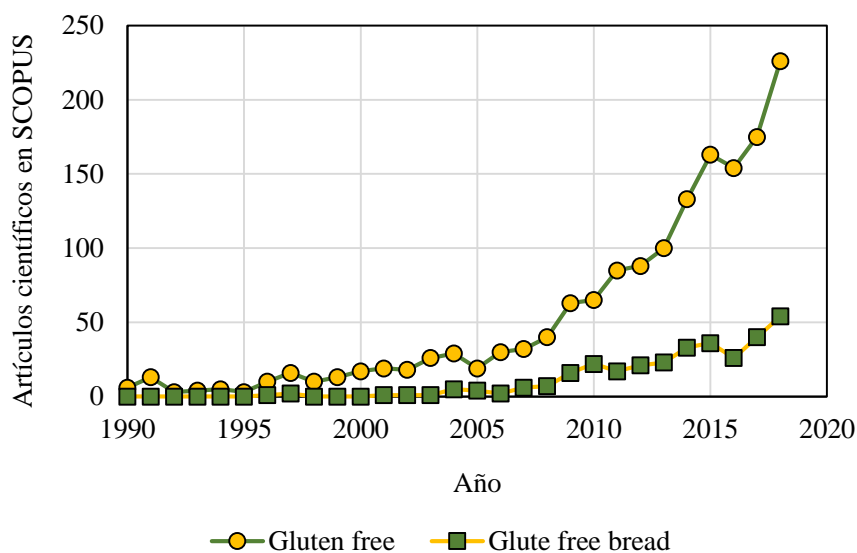


Figura 5: Número de publicaciones de artículos científicos indexados en SCOPUS por año. La búsqueda fue realizada en la página web de SCOPUS filtrando las palabras: “*Gluten-free*” y “*Gluten-free bread*” específicamente en el título de los artículos

FUENTE: SCOPUS (<https://www.scopus.com>)

En Perú, el incremento de la oferta de productos libres de gluten, se ve reflejado en las secciones específicas de “productos sin gluten” en los supermercados (Figura 6). Sin embargo, en su gran mayoría, los productos de panificación libres de gluten expendidos son importados de Italia y Estados Unidos. En la actualidad, sólo una marca peruana, “Molinos del Mundo®”, expende panes libres de gluten en los supermercados más conocidos del país (Wong, Plaza Vea y Metro). Dicha empresa oferta: pan de queso sin gluten, pan de hamburguesa sin gluten a base de harina de arroz, pan de molde sin gluten a base de harina de arroz y pan mini baguette sin gluten a base de harina de arroz. Aunque también existen algunas empresas peruanas que ofertan panes libres de gluten utilizando sus propios canales de distribución, como son: “Mikhuy Thani” y “Nutrilís”.

El aumento de la demanda de productos sin gluten, y en específico de panes libres de gluten, puede atribuirse al mejor conocimiento sobre los problemas de salud que puede traer la

ingesta de gluten en personas sensibles a esta proteína (Roman *et al.*, 2019), o por la creencia de que los productos libres de gluten son más saludables que sus contrapartes que contienen gluten (Reilly, 2016; Hartmann *et al.*, 2018). Sin embargo, esto no es del todo cierto, ya que la gran mayoría de productos de panificación libres de gluten están elaborados a base de almidones y harina de arroz, los cuales no son nutritivos (Calvo-lerma *et al.*, 2019).



Figura 6: Stand de productos libres de gluten ofertados por un supermercado peruano. Fotografía tomada en el mes de abril del 2019 en el supermercado “Wong” de Plaza San Miguel, en la ciudad de Lima – Perú.

Las características sensoriales de los productos de panificación libres de gluten, es otro desafío que enfrenta la industria, ya que la gran mayoría de los panes libres de gluten comerciales tienen sabor artificial y desagradable (Matos *et al.*, 2015). Un estudio realizado con celíacos en Brasil, sobre las percepciones de los productos comerciales libres de gluten, demuestra que los consumidores se encuentran insatisfechos con la calidad de los panes libres de gluten (do Nascimento *et al.*, 2014).

Lograr imitar las características físicas y sensoriales de un pan de trigo resulta en todo un reto, debido a las características únicas de la red de gluten que se forma al momento de

mezclar la harina de trigo con el agua y aplicar fuerza cizalla durante el amasado (Mir *et al.*, 2016).

Diversas estrategias se vienen investigando con el fin de imitar las características viscoelásticas debidas al gluten, como el uso de aditivos (hidrocoloides y emulsionantes), enzimas, e ingredientes como harinas de granos libres de gluten, mezcla de harinas libres de gluten con almidones, fibras, proteínas y lípidos (Elgeti *et al.*, 2015; Mir *et al.*, 2016; Shaabani *et al.*, 2017). Así mismo, se evidencia que se vienen realizando investigaciones para evaluar el desarrollo de panes libres de gluten desde la perspectiva del mejoramiento de las propiedades nutricionales, sensoriales, calidad física e influencia del proceso.

2.5. INGREDIENTES Y PROCESOS UTILIZADOS EN EL DESARROLLO DE PANES LIBRES DE GLUTEN

2.5.1. Almidones utilizados en panes libres de gluten

La materia prima ampliamente utilizada en el desarrollo de panes sin gluten es el almidón, siendo los tres más comúnmente utilizados: el almidón de maíz, el almidón de papa y el almidón de yuca. La gelatinización del almidón durante la etapa de cocción es crucial en los panes sin gluten, y la influencia de las condiciones del horno depende principalmente del tipo y las características morfológicas del almidón utilizado (Brites *et al.*, 2018).

Se sabe que, durante la preparación de la masa, el almidón absorbe hasta un 45% de agua, en función de su propio peso, y se considera que actúa como relleno inerte en la matriz continua de la masa (Horstmann *et al.*, 2017). Un factor importante que puede modificar las propiedades del almidón es la disponibilidad de agua. Cuando se reducen los niveles de agua, se retrasa la gelatinización del almidón; sin embargo, si los niveles de agua son abundantes, el proceso se llevará a cabo rápidamente, pero puede afectar la gelificación y la retrogradación del almidón después del enfriamiento (Brites *et al.*, 2018).

Durante el proceso de cocción del pan, los gránulos de almidón se gelatinizan, es decir, se hinchan y se solubilizan parcialmente, pero aún mantienen su identidad granular (Horstmann *et al.*, 2017). El almidón actúa como la matriz de los productos de panificación libres de gluten, reteniendo el dióxido de carbono para permitir la expansión de las células del aire,

evitando la coalescencia durante el crecimiento y estabilizando la estructura final después del enfriamiento (Houben *et al.*, 2012).

La calidad de los panes sin gluten a base de almidón está determinada por la caracterización tecnológica del almidón, utilizando parámetros como la temperatura de gelatinización, la viscosidad de la pasta, la solubilidad, la tendencia a la retrogradación y la capacidad de la amilosa para formar complejos con lípidos y emulsionantes. El origen, el tipo de almidón y el tamaño de los gránulos tienen una influencia directa en la masa y afectan principalmente la retención de agua, la estructura y el sabor de los panes sin gluten (Witczak *et al.*, 2016).

2.5.2. Hidrocoloides utilizados en panes libres de gluten

Los hidrocoloides utilizados en los alimentos provienen de una amplia gama de materiales como algas (carrageninas y alginatos), bacterias (goma de xantana), cítricos y manzanas (pectina), extractos de semillas (goma de guar y goma de algarroba), exudados de plantas (goma arábiga) y derivados de celulosa [carboximetilcelulosa (CMC), hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC) y celulosa microcristalina (MCC)]. Todos los hidrocoloides son de alto peso molecular (generalmente carbohidratos) y tienen una gran capacidad para retener el agua (Brites *et al.*, 2018).

Los hidrocoloides se utilizan para simular la formación de la red de gluten en panes libres de gluten debido a su capacidad para cambiar las características de la masa. Las propiedades viscoelásticas de la masa se ven aumentadas por las propiedades viscoelásticas de las cadenas de polisacárido en un medio acuoso. Este efecto depende de la estructura y conformación de la cadena del polisacárido hidrocoloide, que determinará las asociaciones intermoleculares (Tsatsaragkou *et al.*, 2016).

La adición de hidrocoloides a las masas sin gluten conduce a un aumento de la viscosidad debido a la capacidad de retención de agua de estas moléculas. También mejora el desarrollo y la retención de gases durante la fermentación. Algunos derivados de celulosa contienen grupos hidrófobos, que tienen afinidad por la fase no polar de la masa. En consecuencia, esto resulta en una actividad interfacial dentro de los límites de las celdas de gas y forma una red durante el horneado. La formación de esta red provoca un aumento de la viscosidad de la masa, una expansión de las paredes celulares y aumenta aún más el volumen del pan (Mir *et al.*, 2016; Sabanis y Tzia, 2010).

El CMC y el HPMC son ejemplos de derivados de celulosa que se han estudiado ampliamente en productos horneados sin gluten. Otros hidrocoloides (como, goma guar, k-carragenina, alginato, goma xantana y pectina) tienen mecanismos de acción similares durante la cocción, pero son menos intensos que los derivados de celulosa (Demirkesen *et al.*, 2014; Matos y Rosell, 2013).

Peressini *et al.* (2011) investigaron el efecto de agregar goma xantana y alginato de propilenglicol (0,5% –1,5%) a formulaciones libres de gluten hechas de harina de arroz y harina de alforfón. Los autores observaron que ambos hidrocoloides afectaron la retrogradación del almidón durante el almacenamiento, y los panes con alginato mostraron mayores volúmenes específicos y menores valores de firmeza cuando se utilizó un mayor porcentaje de hidrocoloide. Hager y Arendt (2013) incorporaron hasta 2% de HPMC y XG (calculados según la metodología de la superficie de respuesta) en formulaciones libres de gluten con diferentes bases de harina y contenido de agua (por ejemplo, harina de arroz, 120% –130%; harina de alforfón, 85% –95%; harina de maíz, 90% –100%; y harina de teff, 95% –105%). Los autores informaron que los efectos sobre el volumen y la firmeza de la miga variaron según la materia prima utilizada como base; por ejemplo, el HPMC tuvo un efecto positivo en el volumen de pan preparado con harina de maíz y harina de teff y un efecto negativo en el pan hecho con harina de arroz. HPMC no tuvo efectos significativos en el volumen específico de pan hecho con harina de trigo sarraceno; sin embargo, se observaron niveles de dureza más bajos en la miga del pan. Curiosamente, se requirió una mayor cantidad de agua para todas las masas hechas con la adición de HPMC. En contraste, no se observaron efectos significativos en el volumen de pan con goma xantana, la cual disminuyó la dureza de la miga solo en pan hecho de harina de maíz.

2.5.3. Cultivos andinos utilizados en panes libres de gluten

Los cultivos andinos como la quinua, la kiwicha y el tarwi están emergiendo como alternativas saludables a los cereales que contienen gluten. No solo son naturalmente libres de gluten, son también altos en una amplia gama de nutrientes (Kupper, 2005; Pagano, 2006). En la Tabla 1, se detalla la composición proximal de la quinua, kiwicha y tarwi.

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) es un grano andino ancestral que se ha convertido en objeto de atención en todo el mundo en los últimos años, debido a su valor nutricional y funcional, y su potencial para aplicaciones farmacéuticas (Bhargava *et al.*, 2006; Hirose *et*

al., 2010; Vega- Gálvez *et al.*, 2010). El valor nutricional de la quinua es ahora reconocido por sus proteínas de alta calidad (especialmente rica en aminoácidos esenciales) y por su contenido de hidratos de carbono (con un índice glucémico bajo y generalmente más altas cualidades nutricionales y funcionales de los granos de cereales como el maíz, avena, trigo y arroz) (Repo-Carrasco *et al.*, 2003; Repo-Carrasco-Valencia *et al.*, 2010).

Tabla 1: Composición proximal de la quinua, kiwicha y tarwi por cada 100g de materia húmeda

Componente (g/100g)	Quinua (Arendt y Zannini, 2013)	Kiwicha (Cai <i>et al.</i> , 2004)	Tarwi (Jacobsen y Mujica, 2006)
Humedad	10 – 13	9,5 – 11,6	7,7
Proteína	14 – 16,5	17,6 – 18,4	44,3
Grasa	5 – 10	6,9 – 8,1	16,5
Carbohidratos	61 – 74	59,6 – 62,8	28,2
Fibra	2 – 3	3,2 – 5,8	7,1
Ceniza	3	3,1 – 4,4	3,3

La kiwicha (*Amaranthus caudatus* L.) es un grano andino con altos niveles de proteínas nutricionalmente favorable (tienen una composición de aminoácidos cerca de la proteína ideal) (Arendt y Zannini, 2013). Recientemente Schoenlechner *et al.* (2010), encontraron que la kiwicha posee cantidades muy altas de folatos totales, siendo las fracciones de salvado las que contenían mayor cantidad de folatos que la fracción harinosa. La cantidad de folatos en los granos andinos es aproximadamente cerca de diez veces más que en el trigo.

La quinua y la kiwicha son tan denominados como pseudocereales, esto es referido a que son plantas dicotiledóneas. Caso opuesto a la mayoría de los cereales (por ejemplo, trigo, arroz, cebada) que son monocotiledóneas. Por lo tanto, se les conoce como pseudocereales, porque sus semillas se parecen en función y composición a las de los “verdaderos cereales” (Alvarez-Jubete *et al.*, 2010b)

El tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet) es una leguminosa con elevado contenido de proteínas y grasas. Al ser comparado con la soya, el tarwi posee valores superiores. El valor de proteína varía de 30 a 40%, con niveles considerables de lisina (7,3%) pero carece de aminoácidos sulfurados como la metionina y cisteína, esenciales para la síntesis de queratina (Guenes-Vera *et al.*, 2004).

La utilización de los granos andinos en la elaboración de panes libres de gluten se ha incrementado en los últimos años, rescatando siempre el aporte nutricional y tecnológico que pueden ofrecer sus componentes. Como ejemplo, Gambus *et al.* (2002) estudiaron la viabilidad de la kiwicha como una alternativa libre de gluten para mejorar la calidad nutricional de los panes sin gluten. Al sustituir el 10% de almidón de maíz con harina de kiwicha, Gambus *et al.* (2002) encontraron un aumento en los niveles de proteína y fibra en un 32 y 152%, respectivamente, mientras que la calidad sensorial no fue afectada. Los resultados indican que la harina de kiwicha se puede utilizar para aumentar el contenido de proteína y fibra de panes libres de gluten.

Alvarez-Jubete *et al.* (2009) estudiaron, las harinas de amaranto, quinua y trigo sarraceno, como posibles ingredientes saludables para mejorar la calidad nutricional de los panes sin gluten. Estos granos y sus panes libres de gluten fueron evaluados en términos del contenido de proteína, almidón, grasa total, fibra dietética, cenizas y minerales, así como su composición en ácidos grasos. Mostrando que los panes libres de gluten, formulados a base de estos granos, muestran niveles significativamente más altos de proteína, grasa, fibra y minerales que el pan control. Los atributos de estos panes se ajustan a las recomendaciones nutricionales de los expertos de la dieta libre de gluten (Thompson, 2000; Thompson *et al.*, 2005). Estos resultados sugieren que la kiwicha, la quinua y el trigo sarraceno pueden representar una alternativa saludable como ingredientes en la elaboración de productos libres de gluten.

La inclusión de los granos andinos como quinua y amaranto en la formulación de panes libres de gluten, también vienen siendo estudiados desde el punto de vista tecno funcional, ya que se presume que sus componentes contribuyen a mejorar la capacidad de retención de agua de la masa (Encina-Zelada *et al.*, 2018), mejoran la textura de la miga (Alvarez-Jubete *et al.*, 2010a) y pueden contribuir a mejorar el volumen específico del pan (Alencar *et al.*, 2015). Con respecto a la harina de tarwi, hasta el momento, no se han encontrado antecedentes que la utilicen en la elaboración de panes libres de gluten. Pero si hay evidencia del uso de harinas concentradas de lupino para mejorar las propiedades reológicas de las masas (Ziobro *et al.*, 2016; Ziobro *et al.*, 2013b).

En la Tabla 2, se muestran algunas investigaciones que utilizan harinas de quinua o amaranto en su matriz, así como el volumen específico y firmeza de la miga obtenida en el pan libre de gluten.

Tabla 2: Características físicas de los panes libres de gluten que tienen en su matriz harina de quinua o kiwicha

Matriz	Volumen específico (mL/g)	Firmeza de la miga (N)	Referencia
Harina de arroz (49,32%), almidón de papa (10,95%), almidón de yuca (16,43%), almidón de tapioca agria (3,3%), harina integral de amaranto (20%).	2,30 – 2,65	3,87 – 5,36	(Alencar <i>et al.</i> , 2015)
Harina de arroz (49,32%), almidón de papa (10,95%), almidón de yuca (16,43%), almidón de tapioca agria (3,3%), harina integral de quinua (20%).	2,36 – 2,88	2,54 – 5,56	(Alencar <i>et al.</i> , 2015)
Harina de arroz (50%), harina de maíz (30%) y harina de quinua (20%)	2,41 – 2,92	21,28 – 29,30	(Encina-Zelada <i>et al.</i> , 2019)
Harina de arroz (10 – 45%), harina de maíz (5 – 22,5%), almidón de maíz (25%), harina de quinua integral (7,5 – 60%)	1,35 – 1,87	10,67 – 32,04	(Föste <i>et al.</i> , 2014)
Harina de arroz (50%), harina de quinua (50%)	1,40	30,40	(Alvarez-Jubete <i>et al.</i> , 2010a)
Harina de arroz (50%), harina de kiwicha (50%)	1,31	17,85	(Alvarez-Jubete <i>et al.</i> , 2010a)
Harina de arroz (25%), almidón de papa (25%), harina de quinua (12,5 – 50%), harina de trigo sarraceno (0 – 37,5%).	1,73 – 1,85	16,4 – 35	(Turkut <i>et al.</i> , 2016)

2.5.4. Proceso de elaboración de panes libres de gluten y métodos alternativos

La producción de panes sin gluten difiere significativamente a los panes de trigo (Figura 7). Tradicionalmente, la masa de trigo se mezcla, reposa, se divide / moldea, se fermenta y finalmente se hornea. La mayoría de los panes sin gluten tienden a contener niveles de agua más altos y tienen una estructura más fluida. Además, requieren tiempos de mezcla, fermentación y horneado más cortos que sus contrapartes de trigo (Arendt *et al.*, 2008).

El método de elaboración de pan libre de gluten que actualmente utilizan la mayoría de investigaciones en el tema fue propuesto por Moore *et al.* (2004), el método consiste en mezclar, fermentar y hornear. Este método se ha aplicado con éxito en estudios posteriores al 2004, como en los trabajos de Moore y Arendt (2007) y Schober *et al.* (2005).

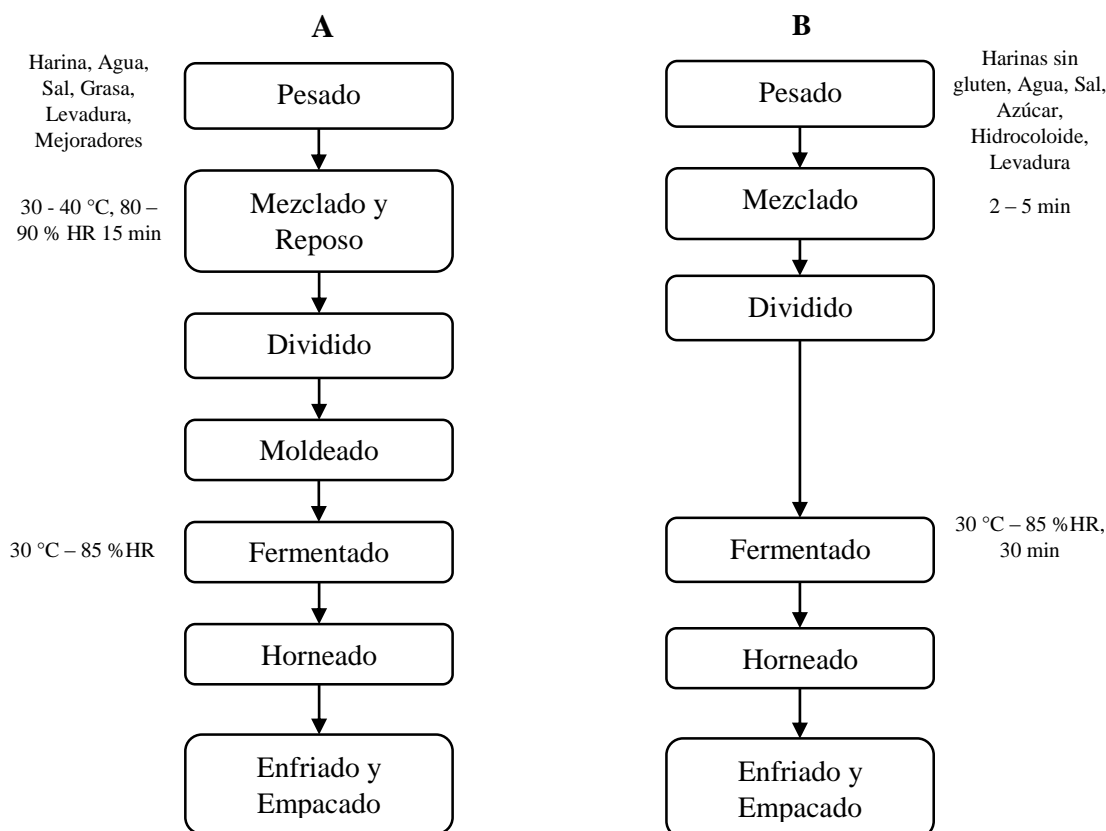


Figura 7: Esquema del proceso de elaboración de pan de trigo (A) comparado con el proceso de desarrollo de pan sin gluten (B)

FUENTE: Arendt *et al.* (2008)

Así mismo, actualmente se vienen realizando variantes en el proceso o adicionando compuestos para mejorar la calidad física, nutricional o sensorial de los panes libres de gluten. Uno de ellos es el uso de masa fermentada, este método representa una alternativa para aumentar la calidad de los panes libres de gluten. La acidificación de la harina mediante fermentación de masa fermentada puede reemplazar hasta cierto punto la función del gluten y mejorar las propiedades de hinchamiento de los polisacáridos, lo que lleva a una mejor estructura del pan (Hosseini *et al.*, 2018). También mejora el volumen del pan y la estructura de la miga, el sabor, el valor nutricional y el tiempo de vida útil (Arendt *et al.*, 2011).

Además, las bacterias del ácido láctico pueden producir polímeros de azúcar de cadena larga llamados exo-polisacáridos, que pueden ser producidos como prebióticos e hidrocoloides para mejorar las propiedades tecnológicas y nutricionales de los panes GF libres de gluten. Las bacterias del ácido láctico también pueden producir compuestos antimicóticos, antimicotoxigénicos, bioactivos y aromáticos que tienen la capacidad de mejorar la calidad general del pan (Moroni *et al.*, 2009).

También se viene investigando el uso de ciertas enzimas para mejorar la calidad física de los panes libres de gluten. Se ha encontrado que la Transglutamasa (TGasa) tiene un efecto severo en la absorción de agua de la masa, modificando el comportamiento viscoelástico y mejorando la estabilidad térmica (Huang *et al.*, 2010). Además, la TGasa tiene un efecto significativo en el volumen específico en el pan. Se ha demostrado que la aplicación de proteína de leche descremada con 10 unidades de enzima conduce a la estructura más compacta, como se refleja en el perfil de textura de la miga. Esto podría deberse a la formación de una red de proteínas en el pan sin gluten con la adición de TGasa (Moore *et al.*, 2006).

Otra enzima que afecta las propiedades reológicas de la masa y la calidad física del pan es la proteasa. El pan de arroz tratado con proteasa tuvo una mejor apariencia de miga, un gran volumen, una textura suave y una tasa de envejecimiento más lenta, dependiendo de la cantidad de enzima agregada (Kawamura-Konishi, 2013). La agregación de proteínas de almacenamiento parcialmente degradadas que rodean los gránulos de almidón y la interacción proteína-almidón puede mejorar la retención del gas antes del horneado y aumentar el volumen específico del pan (Hamada *et al.*, 2013).

2.6. MÉTODOS PARA EVALUAR LA REOLOGÍA Y TEXTURA DE LAS MASAS LIBRES DE GLUTEN

Entender las propiedades reológicas de las masas libres de gluten es esencial para el desarrollo de panes. En la literatura, los estudios sobre las propiedades reológicas de las masas sin gluten, así como los informes que abordan las posibles relaciones entre las propiedades y los atributos de calidad de los productos finales son limitados y en algunas veces contradictorios (Lazaridou y Biliaderis, 2009; Ziobro *et al.*, 2016).

Diversos métodos reológicos han sido utilizados para caracterizar reológica y texturalmente las masas libres de gluten, por ejemplo, el farinógrafo se ha utilizado para la determinación de parámetros como la absorción de agua, el tiempo de desarrollo de la masa, la consistencia y la elasticidad de las masas sin gluten basadas en harina de arroz con o sin adición de hidrocoloides (Gujral y Rosell, 2004; Lazaridou *et al.*, 2007). El RVA (Analizador Rápido de Viscosidad) y el viscoamilógrafo Brabender se han empleado para determinar las propiedades de pasta de las masas de pan libres gluten basadas en la harina de arroz (Marco y Rosell, 2008). Se ha encontrado que el parámetro de retroceso relacionado con el comportamiento de retrogradación del almidón y, a su vez, con la gelación-cristalización de la amilosa, era uno de los parámetros más importantes para predecir las características del pan de arroz (Lazaridou y Biliaderis, 2009).

También se ha utilizado un penetrómetro de cono para ajustar el contenido de agua en una formulación de pan sin gluten que consiste en almidón de maíz, harina de arroz y almidón de yuca; el agua se ajustó a un contenido en el que la masa alcanzó 250 unidades del penetrómetro (Sánchez *et al.*, 2002). Las pruebas texturales se han utilizado ampliamente para estudiar las propiedades mecánicas de deformación de las masas sin gluten. Por ejemplo, se ha utilizado para determinar la fuerza a una penetración de una sonda esférica de 25 mm en una masa de arroz; con el fin de determinar el índice conveniente de consistencia de la masa (Haque y Morris, 1994). La textura de la masa, también ha sido evaluada con otros accesorios, por ejemplo, Moore *et al.*, (2004) utilizaron el accesorio de extrusión hacia adelante para medir la consistencia de masas libres de gluten a base de almidón de maíz o harina de arroz. La fuerza de extrusión máxima se usó como un indicador de la firmeza o consistencia de la masa. Además, esta prueba ha sido utilizada para estandarizar la cantidad de agua agregada a la formulación, con la finalidad de obtener una consistencia constante de la mezcla durante la extrusión (Schober *et al.*, 2005).

Otros métodos utilizados para caracterizar reológicamente las masas libres de gluten son los métodos reológicos fundamentales; estas medidas incluyen las pruebas de flujo y las pruebas oscilatorias, tales como barridos de tensión y frecuencia (Sabanis *et al.*, 2009; Ziobro *et al.*, 2013b).

2.7. MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN UTILIZADOS EN EL DESARROLLO DE PANES LIBRES DE GLUTEN

Los estudios de optimización de formulaciones de panes libres gluten, buscan determinar las cantidades adecuadas de ingredientes como: harinas, hidrocoloides, enzimas, etc; con el fin de mejorar las características físicas, estructurales y nutricionales de los productos de panificación (Arendt *et al.*, 2008).

Los diseños de superficie de respuesta son utilizados, analizando el volumen, la textura, valor nutricional y aspectos sensoriales, tratando siempre de mejorar a los típicos productos libres de gluten a base de harina de arroz (Emire y Tiruneh, 2012; Mezaize *et al.*, 2009; Sabanis *et al.*, 2009; Sanchez *et al.*, 2004). Dentro de los diseños de optimización utilizados para el desarrollo de panes libres de gluten, se han reportado el diseño de mezclas (Mancebo *et al.*, 2015a; Santos *et al.*, 2017) y el diseño central compuesto (Hager y Arendt, 2013; Sabanis *et al.*, 2009).

El detalle de los parámetros optimizados, así como los métodos de optimización utilizados por recientes investigaciones en el desarrollo de panes libres de gluten, se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Características físicas de los panes libres de gluten que tienen en su matriz harina de quinua o kiwicha

Matriz	VARIABLES a optimizar	VARIABLES respuesta	Método de optimización	Fuente
Harina de arroz y almidón de yuca	Goma xantana Goma guar Alginato de sodio	Volumen específico Fracción de área celular	Diseño de mezcla simplex centroide	Cajas <i>et al.</i> (2019)
Harina de arroz, harina de maíz y harina de quinua	HPMC Gomas de xantano Guar	Volumen específico Luminosidad de la corteza Dureza TPA Densidad celular	Diseño de mezclas D-Optimal	Encina-Zelada <i>et al.</i> (2019)
Harina de arroz, almidón de maíz y almidón de trigo	Harina de arroz Almidón de maíz Almidón de trigo	Volumen específico Firmeza Cohesividad Resiliencia Brillo de la corteza Densidad celular Aceptabilidad general	Diseño de mezclas	Mancebo <i>et al.</i> (2015a)
Almidón de maíz, almidón de yuca, harina de arroz, harina de soya	Almidón de maíz/ almidón de yuca Harina de yuca / almidón de yuca	Volumen específico Puntaje de grano de miga Puntaje de pan	Diseño Central Compuesto	Sanchez <i>et al.</i> (2002)
Almidón de maíz, almidón de yuca, harina de arroz	Harina de soya Leche en polvo	Suavidad de la masa Volumen específico Puntuación de grano de miga Puntaje de pan contenido de Proteína de pan	Diseño Central Compuesto	Osella <i>et al.</i> (2014)
Harina de arroz, almidón de patata	HPMC Agua	Volumen específico Altura del pan Dureza de la miga Número de células (Alveolos)	Diseño Central Compuesto	Mccarthy <i>et al.</i> (2005)
Harina de trigo sarraceno, harina de teff, harina de arroz y harina de maíz	Agua HPMC Goma xantana	Volumen del pan Dureza de la miga Área de células Grosor de la pared celular	Diseño Central Compuesto	Hager y Arendt, (2013)

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LUGAR DE EJECUCIÓN

La presente investigación se realizó en los laboratorios de investigación de la Facultad de Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) y el laboratorio de procesos de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Trujillo (UNT). El periodo de ejecución de los experimentos fue desde inicios del año 2017 hasta inicios del año 2019.

3.2. MATERIAS PRIMAS E INSUMOS

Se utilizaron granos de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) variedad Pasankalla y kiwicha (*Amaranthus caudatus* L.) variedad Centenario; los cuales fueron proporcionados por el Programa de Cereales y Granos Nativos de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Los granos de tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet), variedad Blanco de Yunguyo, fueron adquiridos en el Departamento de Cajamarca.

La elección de la variedad Pasankalla, para el caso de la quinua, fue porque esta variedad presentó mayor contenido de proteínas en comparación con las variedades comerciales, así mismo, esta variedad fue seleccionada por los responsables del proyecto PROTEIN2FOOD (Horizonte 2020) por ser una variedad comercial en el Perú. Para el caso de la kiwicha Centenario, esta es una variedad desarrollada por el Programa de Cereales y Granos Nativos de la Universidad Nacional Agraria La Molina en el año 2006 y recibe el nombre de “Centenario” en homenaje a los 100 años de fundación de la UNALM; así mismo, se tiene antecedentes que esta variedad presenta mayor contenido de fibra dietaria que otras variedades (Repo-Carrasco-Valencia *et al.*, 2009). Con respecto a la variedad de tarwi utilizado, Blanco de Yunguyo, se debió a que es una variedad comercial en el Departamento de Cajamarca, lugar donde se consume en gran cantidad el tarwi.

Para la elaboración de las masas y panes libres de gluten también se utilizaron almidones de maíz (ARO®) y papa (ARO® y Frutarom®). Los hidrocoloides utilizados, en diferentes partes del estudio, fueron: goma xantana (Frutarom®) y goma de tara (Molinos Asociados S.A.C). Los insumos utilizados en el proceso de panificación fueron: Agua (San Mateo®), sal (Lobos®), aceite de soya (Primor®), azúcar blanca (Cartavio®) y levadura seca (*Saccharomyces cerevisiae*) (Fleischmann®).

3.3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

A continuación, se detallan los procedimientos realizados para evaluar tanto las materias primas, las masas y los panes obtenidos en cada parte de la investigación. El diagrama general de la investigación se muestra en la Figura 8.

3.3.1. Acondicionamiento de la materia prima

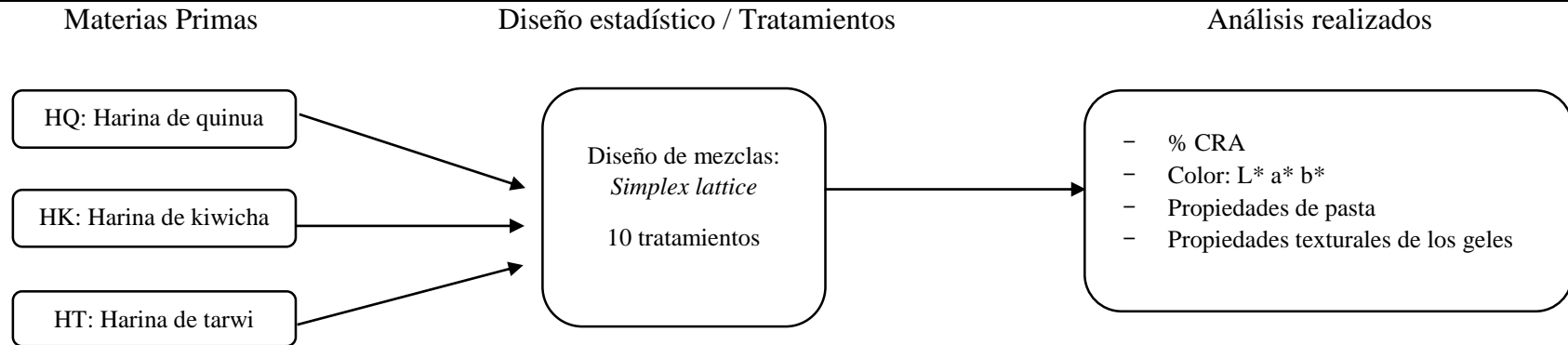
Para obtener harinas integrales, los granos de quinua y kiwicha fueron lavados y secados con la finalidad de eliminar la saponina en el caso de la quinua y residuos en el caso de la kiwicha. Los granos de tarwi se sometieron al proceso de desamargado siguiendo el procedimiento descrito por Jacobsen y Mujica (2006), eliminando los alcaloides presentes en el grano. El proceso de desamargado consistió en el lavado de los granos por 12 horas, cocción de los granos por 1 hora, con cambio de agua cada 30 minutos y el remojo por 3 días a flujo constante de agua. Posteriormente, los granos de tarwi fueron secados por 72 horas a 40 °C. Finalmente, todos los granos se molieron en un molino de martillos (Retsch SR 300, Alemania) utilizando la malla de 0,5 um para el caso de los granos quinua y kiwicha, y la malla 0,75 um para los granos de tarwi.

3.3.2. Caracterización físico química de las materias primas

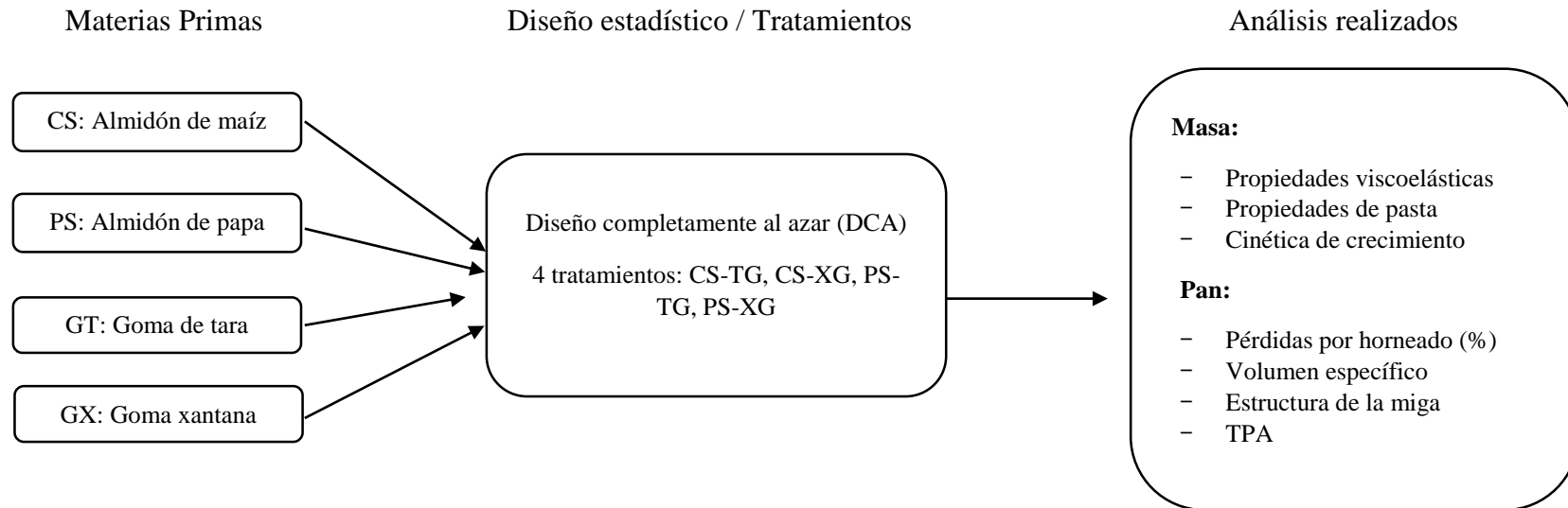
3.3.2.1. Composición proximal

Se caracterizaron las materias primas, en su composición proximal. Se determinó el contenido de proteínas, utilizando el método ISO 20483: 2013. El contenido de grasa fue determinado utilizando el método NTP 205.006:2017. El contenido de fibra dietaria fue determinado utilizando el método AOAC 985.29; el contenido de ceniza fue determinado NTP 205.004:2011;

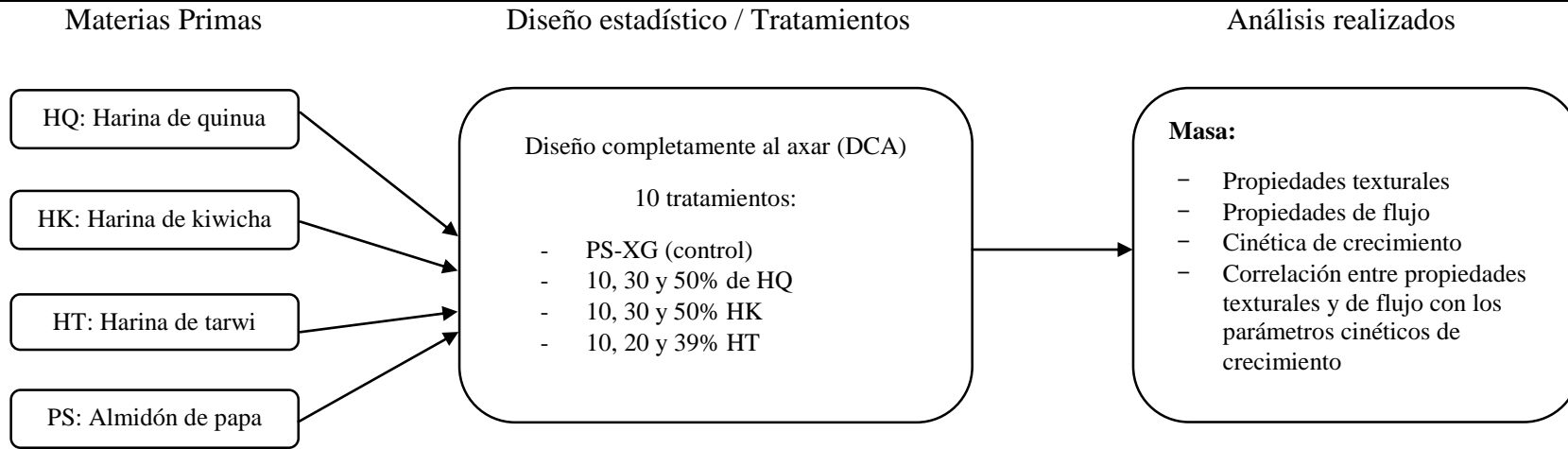
Primera parte de la investigación



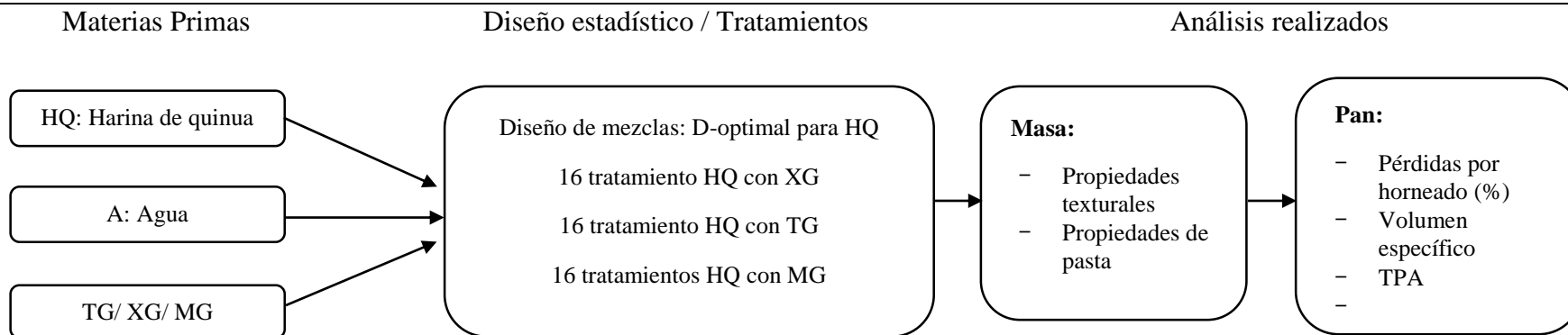
Segunda parte de la investigación



Tercera parte de la investigación



Cuarta parte de la investigación



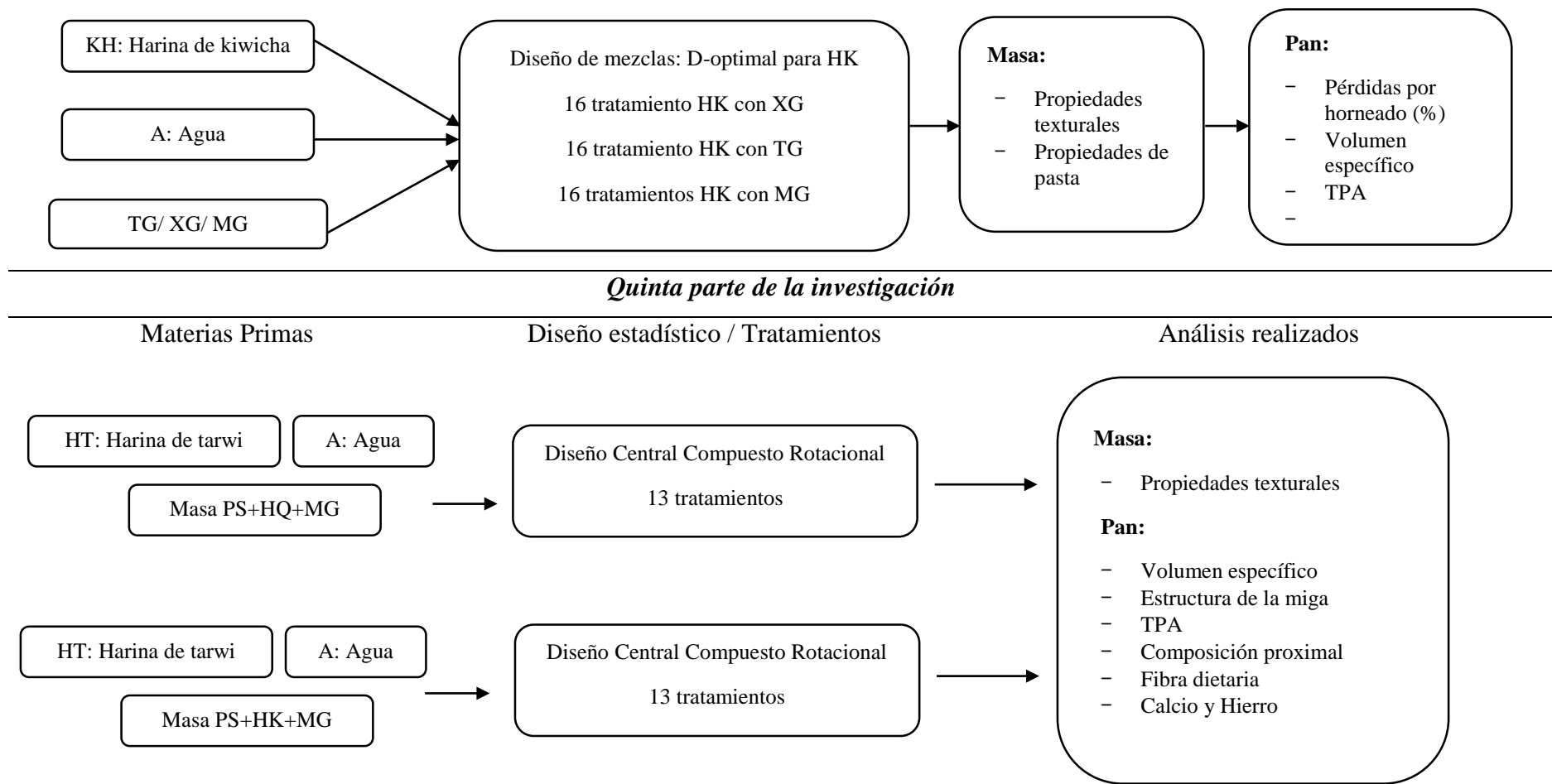


Figura 8: Diagrama general de la investigación realizada en la presente tesis

la humedad fue determinada utilizando el método NTP 205.002 1979 (Revisada 2011) y el contenido de carbohidratos se determinó utilizando el método PNTE-LTG-29. Rev.0, el cual fue realizado en el laboratorio TYPASA.

3.3.2.2. Capacidad de retención de agua

La capacidad de retención de agua (CRA) de los tratamientos se determinó siguiendo el procedimiento descrito por Inglett *et al.* (2009). Se pesaron 2g de muestra de cada tratamiento y se mezclaron con 25 mL de agua destilada en tubos Falcon de 50 mL de capacidad. Los tubos se agitaron vigorosamente usando un vórtice y se dejaron reposar por 2 horas; luego se centrifugaron a 4500 rpm durante 15 minutos (Centrifuga SL40R, Thermo Fisher Scientific, Germany). Se decantó el sobrenadante y se pesó el precipitado. La capacidad de retención de agua se calculó como: % CRA = $([\text{peso de la muestra después de la centrifugación} - \text{peso de la muestra seca}] / \text{peso de la muestra seca}) \times 100$.

3.3.2.3. Color de las harinas y sus mezclas

El color de las harinas y sus mezclas se determinó utilizando el colorímetro CM-5 (Minolta Camera Co., Osaka, Japón). Así mismo, el color de la miga y corteza de los panes se determinó utilizando el colorímetro CR-400 (Minolta Camera Co., Osaka, Japón). La escala utilizada para analizar el color fue CIE L*a*b*.

3.3.2.4. Propiedades de pasta en materias primas y mezclas de harinas

Las propiedades de pasta de las harinas de los cultivos andinos y sus mezclas fueron determinadas según el método AACC-76-21 (AACC, 2010). Se pesó alrededor de 3,5 g de harina y se dispersó en 25 mL de agua (Relación 1:7). Se utilizó un analizador rápido de viscosidad (RVA) (Perten RVA 4500, Australia) y se seleccionó el programa de 23 minutos en total; el cual consistió en un ciclo de calentamiento hasta 95 °C y enfriamiento a 50 °C de la muestra. Mediante la gráfica obtenida se determinaron los valores de: Viscosidad pico (VP), Viscosidad mínima (VM), Viscosidad de retrogradación (VR), Viscosidad final (VF) y el tiempo pico (TP) (Figura 9). El análisis se realizó por triplicado para cada formulación. Dicho análisis fue realizado en la empresa Granotec Perú S.A.

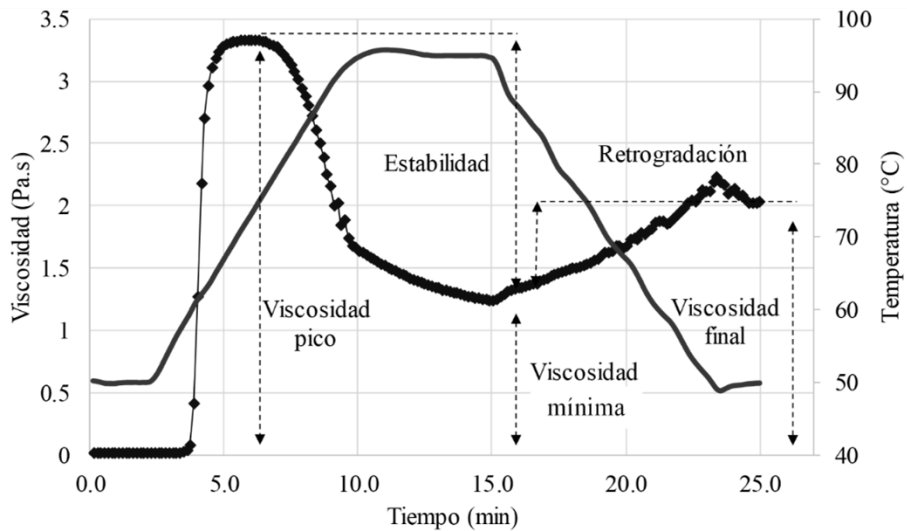


Figura 9: Perfil de viscosidad obtenido en el analizador rápido de viscosidad (RVA), donde (♦) es la viscosidad del almidón o harina y (--) es la rampa de temperatura

La explicación del comportamiento reológico de los almidones está relacionado al proceso de gelatinización y retrogradación cuando son sometidos al ciclo de calentamiento y enfriamiento, respectivamente. El valor de la viscosidad pico (VP) o también conocida como la viscosidad máxima se logra cuando se realiza por completo de hinchamiento de los gránulos de almidón durante la etapa de calentamiento. El valor de viscosidad mínima (VM) o también conocida como viscosidad de caída es el menor valor de viscosidad antes del comienzo de la retrogradación, esto es causado por la ruptura de los gránulos hinchados. Esto se produce al final del tramo de temperatura constante, antes de que comience el enfriamiento. El valor de estabilidad o viscosidad de quiebre (BD) resulta de la diferencia entre VP y VM que se produce en el tramo de temperatura constante. La viscosidad final (VF) se obtiene después del proceso de enfriamiento a 50 °C, este valor está relacionado con la formación de una red espacial por moléculas de amilosa, que se filtraron de los gránulos. En consecuencia, la viscosidad de retrogradación (VR) está relacionado con la retrogradación de la amilosa, la cual se calcula como la diferencia entre VF y VM (Ronda *et al.*, 2017).

3.3.2.5. Propiedades texturales de geles

Para determinar las propiedades texturales de los tratamientos, estos, se transformaron en geles, dispersando las harinas en agua en una proporción 1:7. Las mezclas se agitaron y calentaron utilizando un agitador magnético con sistema de calentamiento (MR-Hei Tec, Alemania), simulando el ciclo de calentamiento y enfriamiento que se utilizó para determinar

las propiedades de pasta. Los geles formados se enfriaron a temperatura ambiente y luego se almacenaron a 4 °C por 24 horas. Las propiedades texturales de los geles fueron determinadas utilizando el accesorio de *Back Extrusion* del texturómetro universal INSTRON (Modelo 3365, Canton MA, USA), siguiendo el procedimiento descrito por Angioloni y Collar (2009). Donde una porción de gel se depositó en el cilindro de *Back Extrusion* (Diámetro 50 mm, altura 70 mm) y se penetró hasta un 30% con un plunger (Diámetro 42 mm) a la velocidad de 1 mm/s y una precarga de 10 gf; finalmente el plunger regresó a su posición original a la misma velocidad. El análisis se realizó por quintuplicado para cada formulación.

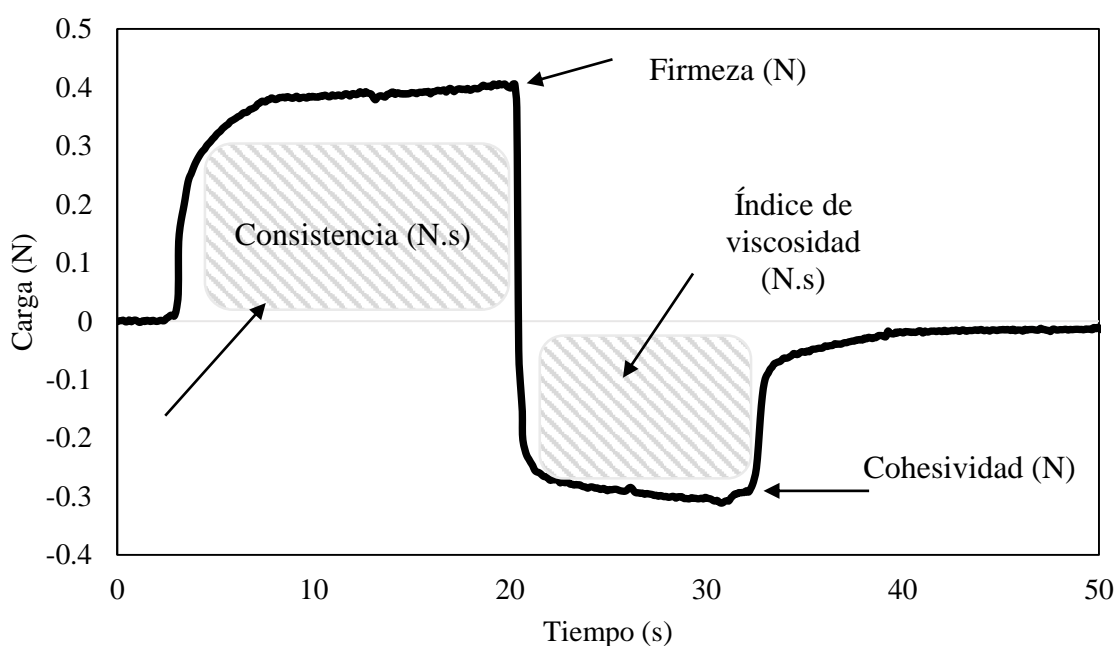


Figura 10: Perfil de textura obtenido de la prueba de Back Extrusion realizada en el texturómetro universal INSTRON

Con los datos obtenidos se determinaron los parámetros texturales de los geles, los cuales fueron: firmeza (fuerza máxima obtenida durante la compresión), consistencia (área bajo la primera curva), cohesividad (valor mínimo obtenido durante el ciclo de retroceso) e índice de viscosidad (área negativa del gráfico, dibujada en el retorno de la sonda) (Figura 10). Para ello se desarrolló una aplicación computacional denominada “*Back Extrusion Analyzer 1.1v*”, la cual permite leer hojas en formato Excel (.xlsx), graficar los resultados y determinar los parámetros texturales, anteriormente mencionados. Para el cálculo de las áreas bajo la curva (consistencia e índice de viscosidad) se programó el método numérico de Simpson

compuesto y para la determinación de los valores mínimos y máximos de la curva (firmeza y cohesividad) se programó las funciones *min* y *max*. Dicha aplicación computacional fue programada utilizando el lenguaje de Visual Basic de la plataforma Visual Studio 2015 (Microsoft Corporation®) (Figura 11). Los códigos de programación se muestran en el ANEXO 1.

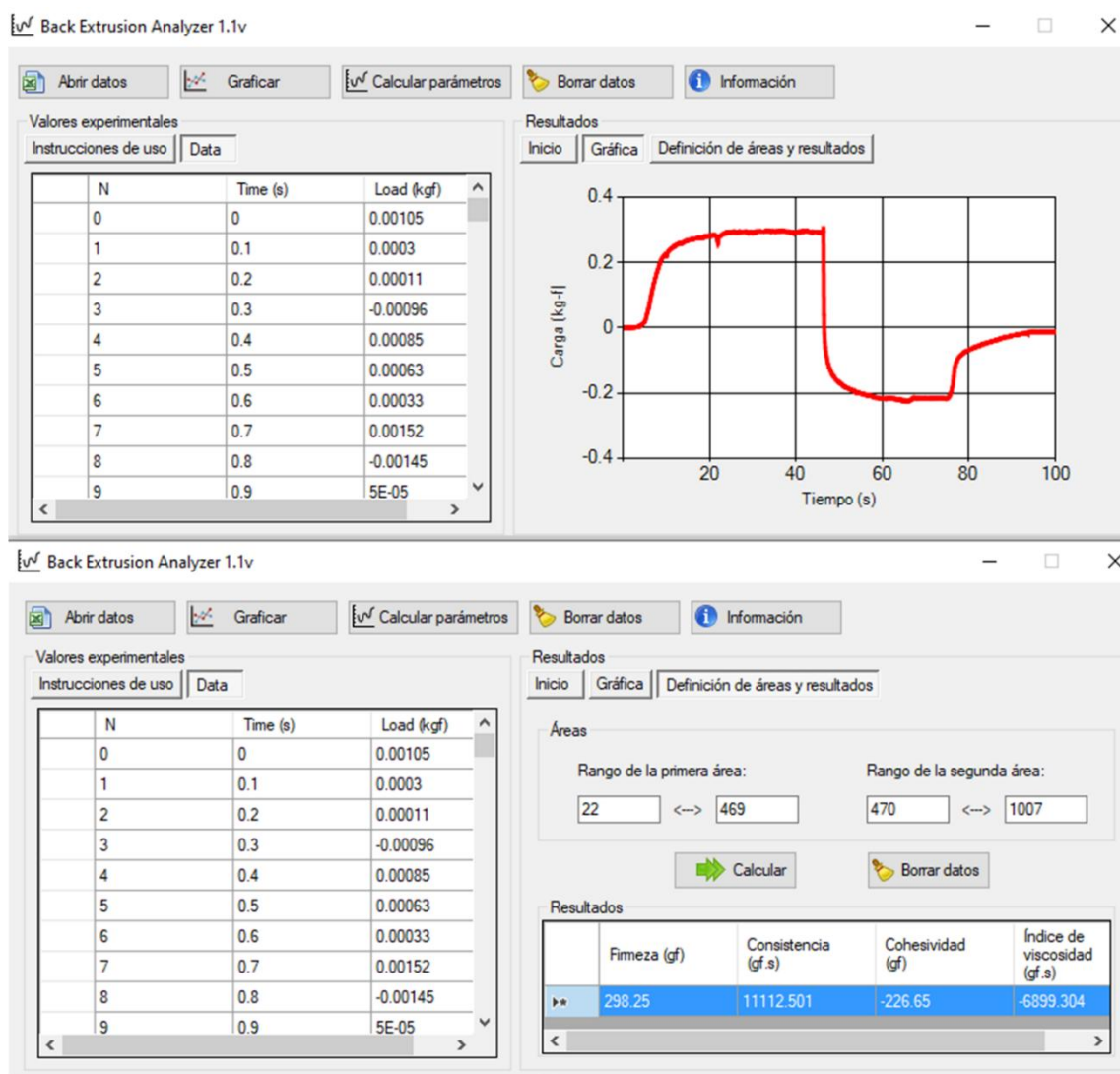


Figura 11: Aplicación computacional “*Back Extrusion Analyzer 1.1v*” desarrollada para la determinación de las propiedades texturales

3.3.2.6. Análisis textural de las masas libres de gluten

El análisis de textura de las masas, fue muy similar al descrito en la sección 3.5.5, con algunas modificaciones. El principio fue el mismo, es decir, se utilizó el accesorio de *Back Extrusion* del texturómetro universal INSTRON (Modelo 3365, Canton MA, USA); donde

una porción de la masa se depositó en el cilindro de *Back Extrusion* (Diámetro 50 mm, altura 70 mm) y se penetró, en este caso, hasta un 50% con un plunger (Diámetro 42 mm) a la velocidad de 1 mm/s y una precarga de 10 gf; finalmente el plunger regresó a su posición original a la misma velocidad. Con el perfil textual se determinaron los parámetros texturales como firmeza (N), consistencia (N.s), cohesividad (N) e índice de viscosidad (N.s). El análisis se realizó por quintuplicado para cada formulación y se utilizó el software “*Back Extrusion Analyzer 1.1v*”, descrito anteriormente.

3.3.3. Análisis reológico de las masas libres de gluten

3.3.3.1. Propiedades de pasta

Las propiedades de pasta de las formulaciones (parte 2, 3, 4 y 5 de la investigación) se determinaron utilizando un reómetro híbrido (HR-3, TA Instruments, EE. UU.). La prueba se realizó en exceso de agua. Aproximadamente 2,8 a 3 g de muestras se pesaron y se disolvieron en 25 a 25,2 ml de agua, de acuerdo con la corrección de los pesos de las muestras y el volumen de agua del método AACC (76 - 21). La muestra se agitó inicialmente a 160 rpm durante 2 minutos a 50 °C, luego se calentó a 95 °C a una velocidad de 6 °C/min y se mantuvo a 95 °C durante 5 minutos. Luego, la muestra se enfrió a 50 °C a una velocidad de 5,3 °C/min y finalmente se mantuvo a 50 °C durante 2 min. La viscosidad pico (VP), la viscosidad mínima (VM), la viscosidad de quiebre (BD), la viscosidad final (VF), la viscosidad de retrogradación (VR) y el tiempo en el que se logra la viscosidad pico (PT) se identificaron a partir de la curva de pasta. Todas las muestras se midieron por duplicado.

3.3.3.2. Propiedades viscoelásticas

Las propiedades viscoelásticas de la masa se midieron a 25 °C utilizando un reómetro de tensión controlada (Haake Mars 60, Thermo Fisher Scientific, Alemania) equipado con un sistema de platos paralelos (diámetro de 35 mm, espacio de 2 mm). Las masas analizadas fueron las formuladas en la segunda parte del estudio, sin la adición de levadura.

Primero, se realizó una prueba de barrido de esfuerzo con un rango de tensión de 0,1 a 100 Pa a una frecuencia constante de 1 Hz para identificar la región viscoelástica lineal. Sobre la base de los resultados obtenidos, se seleccionó una tensión del 0,1 % y las pruebas de barrido de frecuencia se realizaron en el rango de 0,1 a 10 Hz, siguiendo el procedimiento descrito

por Ziobro *et al.* (2013b). Los datos experimentales fueron descritos por el modelo “*Power law*”:

$$G'(\omega) = K' \cdot \omega^{n'} \quad (1)$$

$$G''(\omega) = K'' \cdot \omega^{n''} \quad (2)$$

donde ω es la frecuencia (Hz), K' , K'' , n' , n'' son las constantes experimentales, G' es el módulo de almacenamiento (comportamiento elástico) y G'' es el módulo de pérdida (comportamiento viscoso). La relación entre el comportamiento viscoso y elástico (Tan $\delta = G''/G'$) también se determinó de acuerdo con lo descrito por Tunç y Kahyaoglu (2016). Todos los experimentos de viscoelasticidad se realizaron por triplicado.

3.3.3.3. Propiedades de flujo

Se utilizó la técnica de *Back Extrusion* (BE) para determinar las propiedades de flujo (n y K). Se utilizaron las ecuaciones propuestas por Osorio y Steffe (1987), las cuales han sido explicadas por Toledo (2007) para determinar las propiedades de flujo de los alimentos que experimenten un comportamiento no newtoniano y que sigan la ley de la potencia.

El accesorio de BE del texturómetro INSTRON (Modelo 3365, Canton MA, USA) consta de 2 partes. La primera parte es un cilindro hueco, en el cual se depositó la muestra y la segunda parte es un émbolo de diámetro menor que el cilindro sostenido por un poste (Figura 12). El procedimiento técnico consistió en someter la masa libre de gluten a diferentes velocidades de penetración (V_p) (50, 200, 350, 500, 650, 800 y 1000 mm/min) y se registró la fuerza máxima de la masa (F_t) y el desplazamiento obtenido por el plunger (L_p), como se muestra en la Figura 12.

El primer paso para iniciar los cálculos de las propiedades de flujo, consistió en determinar el área del émbolo que desplazará el fluido (A_p) y el área de la sección transversal por donde fluirá el fluido (annulus) (A_a) (Ec. 3 y 4).

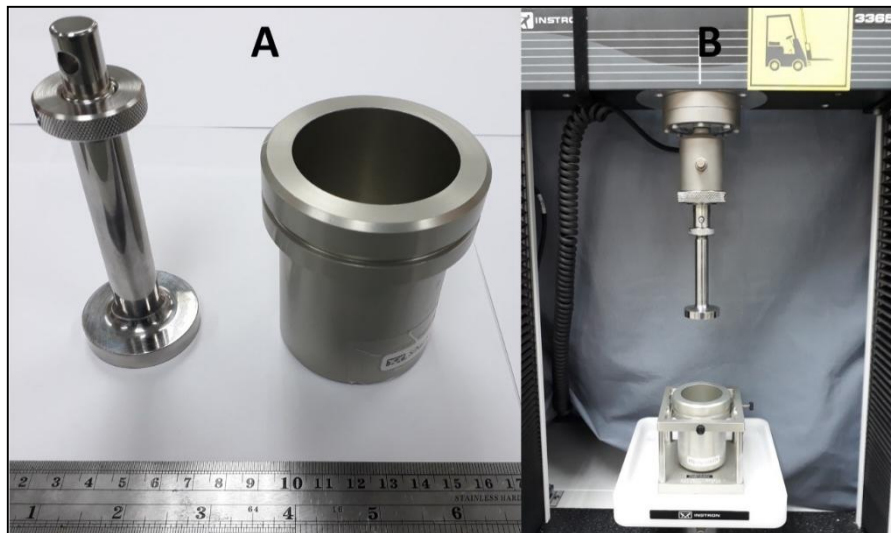
$$A_p = \pi (R_p^2 - R_s^2) \quad (3)$$

$$A_a = \pi (R_c^2 - R_p^2) \quad (4)$$

Donde R_c es el radio interno del cilindro hueco, R_p es el radio del émbolo, y R_s es el radio del poste que coloca al émbolo en el centro del cilindro. El siguiente paso fue determinar la fuerza máxima ejercida (F_n), la cual es la fuerza corregida por la fuerza de la gravedad y se determinó utilizando la siguiente expresión:

$$F_n = F_t - \rho g L \pi (R_c^2 - R_p^2) \quad (5)$$

Donde ρ es la densidad del fluido y g es la constante gravitacional universal (9.8 m/s^2). Una vez que obtenidos los valores de F_n y L_p ; el índice de comportamiento del flujo (n) se determinó conociendo la pendiente del doble logaritmo de la relación F_n/L_p y la velocidad de penetración (V_p).



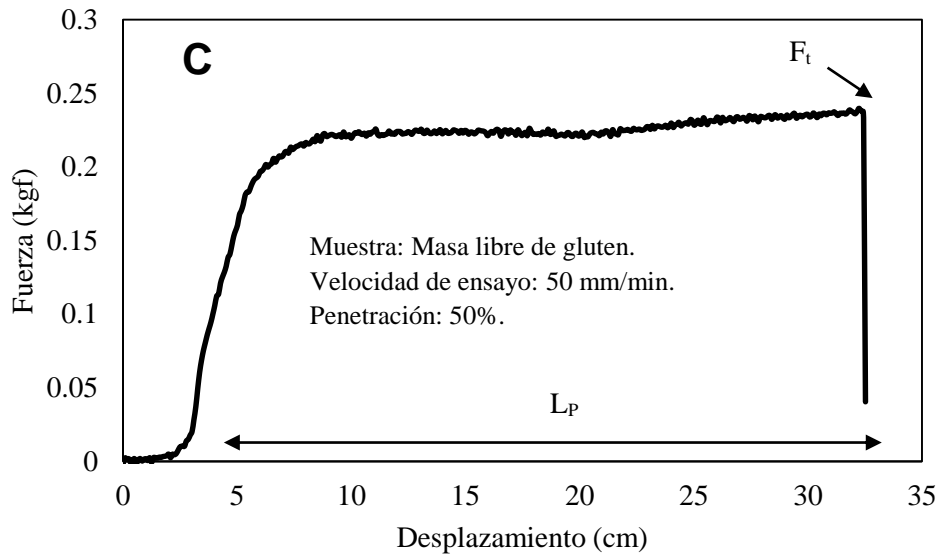


Figura 12: A) Accesorios para la prueba de *Back Extrusion*. B) Sistema montado para la ejecución de la prueba de *Back Extrusion* en el INSTRON. C) Perfil textural obtenido durante la penetración del plunger en la prueba de *Back Extrusion*

Para determinar la velocidad de corte en la pared del émbolo y esfuerzo de corte en este punto implica un conjunto bastante complejo de ecuaciones que fueron derivadas por Osorio y Steffe (1987). La derivación se basa en un radio adimensional (λ), que es la relación entre r_m/R_c , donde r_m es el radio de un punto en la corriente de flujo donde la velocidad es máxima. Las diferentes ecuaciones de balance de momento y masa han sido resueltas simultáneamente para obtener valores de λ a diferentes valores de n y espacios anulares (σ) (ANEXO 2). El espacio anular en mención representa la relación entre el diámetro del émbolo con el diámetro del cilindro (σ). Así mismo se puede encontrar la relación entre diámetro del poste con el diámetro del cilindro (σ_s) para cálculos posteriores (Ec. 6 y 7 respectivamente).

$$\sigma = \frac{R_p}{R_c} \quad (6)$$

$$\sigma_s = \frac{R_s}{R_c} \quad (7)$$

Para determinar la velocidad de corte, primero hay que determinar el valor de θ , el cual es un parámetro adimensional que satisface las expresiones para la integral de la velocidad de punto adimensional del fluido a través del annulus y la cantidad de fluido desplazado por el émbolo. El valor de θ puede ser calculado gráficamente conociendo los valores de n y σ (ANEXO 3).

Una vez que se tenga el valor de θ , la velocidad de corte (σ_c, s^{-1}) para cada análisis realizado se determinará utilizando la ecuación (8) y el esfuerzo cortante (γ, Pa) en la pared del émbolo se calculará a partir de la fuerza neta, F_n , ejercida sobre la base de la columna de fluido para forzarla hacia arriba del annulus utilizando la ecuación (9).

$$\sigma_c = \frac{V_p}{R_c \theta} (\sigma^2 - \sigma_s^2) \left[\frac{\lambda^2}{\sigma} - \sigma \right]^{1/n} \quad (8)$$

$$\gamma = \frac{F_n}{2 \pi L R_p} \left(\frac{\lambda^2 - \sigma^2}{\lambda^2 - \sigma_s^2} \right) \quad (9)$$

Finalmente, el coeficiente de consistencia (K) del fluido se determinó utilizando el modelo de la ley de la potencia (Ec. 10).

$$\sigma_c = K \gamma^n \quad (10)$$

3.3.3.4. Cinética de fermentación

La cinética de fermentación de las masas se realizó mediante análisis de imagen del incremento de área o diámetro de la masa durante el periodo de fermentación, siguiendo el procedimiento descrito por Conte *et al.* (2018) con algunas modificaciones.

Inmediatamente después del batido, una porción de la masa se moldeó en un cilindro hueco ($\emptyset 2,7$ cm) en el centro de una placa de Petri y se fermentó en una cámara climática a $30^\circ C$ y 80-90% de HR durante 60 min. Cada 10 minutos, se escanearon tres placas de Petri a 300 ppp (puntos por pulgada) con un escáner (Canon MG3610, Japón). El aumento del diámetro de la masa (D_t) o el área (A_t) (según la parte de la investigación aplicada) se analizó con el software ImageJ 1.51j8 (National Institutes of Health, EE. UU.) y los resultados se modelaron con la ecuación de Gompertz (Ecuaciones 11 y 12).

$$D_t = D_0 + C \cdot \exp(-\exp(-V_{max} \cdot (t - X))) \quad (11)$$

$$A_t = A_0 + C \cdot \exp(-\exp(-V_{max} \cdot (t - X))) \quad (12)$$

Donde D_0 es el diámetro inicial, A_0 es el área inicial, C representa la cantidad asintótica de aumento que se produce cuando t aumenta indefinidamente, V_{max} es la tasa de máxima de crecimiento del diámetro o área, según la ecuación que corresponda y X es el momento en el que la tasa de crecimiento absoluta es máxima (Figura 13).

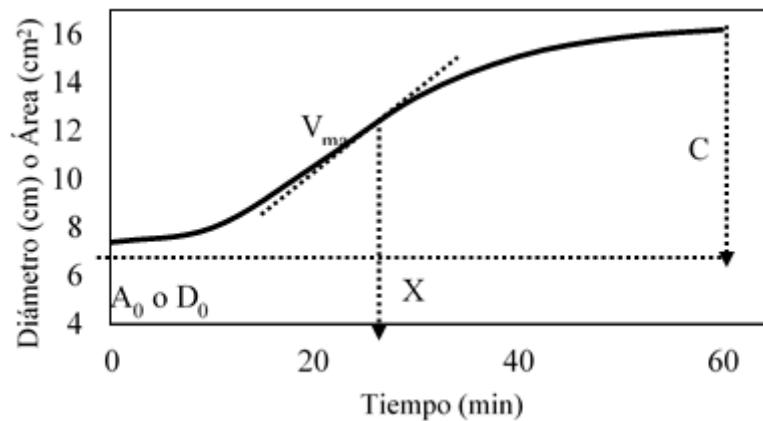


Figura 13: Curva típica de desarrollo de la masa durante el proceso de fermentación con sus parámetros cinéticos, según la ecuación de Gompertz (Ec. 11 y 12)

3.3.4. Análisis de calidad física y química de los panes libres de gluten

3.3.4.1. Pérdida de humedad durante el horneado

La cantidad de agua liberada y el material perdido durante la cocción se calcularon por las diferencias entre el peso inicial de la masa y el peso del pan después de enfriar durante 2 horas, según el procedimiento descrito por Horstmann *et al.* (2018).

$$\% \text{ Pérdidas por horneado} = \frac{\text{Peso de la masa} - \text{Peso del pan después del enfriamiento}}{\text{Peso del pan después del enfriamiento}} \cdot 100 \quad (13)$$

3.3.4.2. Volumen específico

El volumen de pan (mL) se midió por topografía láser (BVM-6610, Perten Instruments, Suecia) y su volumen específico (mL/g) se calculó dividiendo el volumen con el peso del pan.

3.3.4.3. Estructura alveolar de la miga

Se escanearon cuatro rebanadas de cada pan (Canon MG3610, Japón) a una resolución de 600 ppp y luego se procesaron con el software ImageJ 1.51j8 (National Institutes of Health, EE. UU.). Las imágenes se convirtieron a 8 bits, luego se dimensionó la medida del ancho del trozo de pan, se llevó a cabo el proceso de binarización y se analizaron las partículas de forma elíptica. El número de células/cm², el % del área ocupada por las células y el promedio del área celular (mm²) se calcularon según el procedimiento descrito por Sciarini *et al.* (2012).

3.3.4.4. Textura de la miga

El análisis del perfil de textura (TPA) se llevó a cabo en panes 2 h después de hornear usando el texturómetro universal Instron (Modelo 3365, Instron Co., EE. UU.). Las migas de pan en forma de cilindro (2,5 cm de diámetro y 2,5 cm de altura) se obtuvieron de las partes centrales de seis panes. La prueba se realizó a una velocidad de 60 mm/min para comprimir la miga de pan al 50% de su altura original. La dureza, cohesión, elasticidad, gomosidad y masticación de la miga se calcularon a partir de la curva TPA.

3.3.4.5. Composición proximal y contenido de minerales

Se utilizaron los procedimientos descritos en la sección 3.5.1 para determinar el contenido de proteínas, lípidos, fibra, cenizas y carbohidratos de los panes óptimos, con el fin de comparar su perfil nutricional. Así mismo, para la caracterización nutricional de los panes optimizados se analizó el contenido de fibra dietética (soluble e insoluble), siguiendo el procedimiento descrito por la AOAC (991.43) y el contenido de calcio y hierro, según el procedimiento AOAC (2015.01), utilizando la técnica de Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS).

3.3.5. Preparación de geles, masas y panes libres de gluten

La preparación de los geles, masas y panes libres de gluten fue diferente para cada parte del estudio.

Para la primera parte del estudio, se utilizó el diseño de mezclas *simplex lattice* y se formularon 10 tratamientos, con el fin de evaluar los efectos de interacción de las harinas de

quinua (HQ), kiwicha (HK) y tarwi (HT) en sus propiedades reológicas y posteriormente en las propiedades texturales de los geles formados de los tratamientos. Los niveles de los componentes se muestran en la Tabla 4.

En primera instancia se decidió evaluar solamente el comportamiento de las harinas integrales y su efecto de interacción sobre las propiedades reológicas y texturales de los geles, utilizando la propuesta planteada por Yilmaz *et al.* (2015), quienes manifiestan que el estudio de las interacciones de los ingredientes proporciona un panorama sobre el comportamiento de las materias primas en el proceso de panificación. Los hallazgos en esta etapa del estudio fueron decisivos para plantear las posteriores partes de la investigación, la cual consistió en desarrollar por separado panes libres de gluten con quinua y con kiwicha.

Tabla 4: Niveles de los componentes establecidos para evaluar los efectos de interacción de las harinas de quinua, kiwicha y tarwi utilizando el diseño de mezclas

Componentes	Nivel mínimo	Nivel máximo
Harina de quinua (HQ)	0%	100%
Harina de kiwicha (HK)	0%	100%
Harina de tarwi (HT)	0%	100%

En la segunda parte de la investigación se decidió determinar una formulación control apropiada a base de almidón, es por ello, que se evaluó el efecto de dos tipos de almidones (almidón de maíz y almidón de papa) con dos gomas (goma xantana y goma de tara) sobre las propiedades reológicas de la masa y calidad física del pan. Las formulaciones evaluadas fueron: almidón de maíz con goma de tara (CS-TG), almidón de maíz con goma de xantana (CS-XG), almidón de papa con goma de tara (PS-TG) y almidón de papa con goma de xantana (PS-XG). Para cada tratamiento, la concentración de goma fue constante (0.5%), así como los demás componentes, los cuales fueron: agua (75%), levadura (3%), azúcar (3%), sal (2%) y aceite de soya (6%). La proporción de los ingredientes fue adaptada de la investigación desarrollada por Alvarez-Jubete *et al.* (2010a), sin embargo, el contenido de agua fue ajustado en 10% menos a lo que indican estos autores, como consecuencia de pruebas preliminares realizadas.

Para la tercera parte del estudio, se tomó la formulación control que presentó mejores características físicas como producto terminado (PS-XG) y se evaluó el efecto de la sustitución del almidón de papa por diferentes niveles de harina de quinua (10, 30 y 50 %), harina de kiwicha (10, 30 y 50%) y harina de tarwi (10, 20 y 30%) sobre las propiedades reológicas y texturales de las masas. De la misma forma que la segunda parte del estudio, la concentración de goma xantana fue constante (0.5%) y los demás ingredientes también se mantuvieron constantes, los cuales fueron: agua (75%), levadura (3%), azúcar (3%), sal (2%) y aceite de soya (6%).

Esta parte del estudio, solamente se evaluó el efecto de la sustitución del almidón de papa por harinas de cultivos andinos a nivel de la masa, con el fin de tener una idea sobre su comportamiento en el desarrollo de la fermentación. No se evaluó el producto terminado, debido a que se encontró que ninguna masa presentara comportamiento textural parecido al control, lo cual fue objeto de estudio en la siguiente parte del experimento.

En la cuarta parte del estudio, se decidió optimizar los niveles de agua, harina de quinua o harina de kiwicha y goma (goma xantano, goma de tara y mezcla de las dos), para que logre imitar las propiedades texturales de una masa de pan control (PS-XG), para ello se utilizó el diseño de mezclas D-optimal. La justificación de buscar imitar las propiedades texturales de la masa control, se debe a que esta masa tuvo un mayor crecimiento o desarrollo en la etapa de fermentación y produjo panes libres de gluten con elevado volumen específico. Se tomaron como antecedentes las investigaciones realizadas por Korus *et al.* (2009) y Ziobro *et al.* (2013a), quienes utilizaron la técnica de *Back Extrusion* para ajustar el nivel de agua en masas libres de gluten para que logren similar firmeza. Sin embargo, los mencionados autores no consideraron los efectos que podrían tener los demás ingredientes como las harinas o las gomas utilizadas. Los niveles de los componentes para el diseño de mezclas se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Niveles de los componentes establecidos para optimizar el nivel de harina de quinua o kiwicha, goma (goma xantana, goma de tara y mezcla de las gomas) y agua utilizando el diseño de mezclas

Componentes	Nivel mínimo	Nivel máximo
Harina de quinua o kiwicha	10%	50%
Goma xantana (GX)	0,50%	2%
Agua	75%	110%

Componente	Nivel mínimo	Nivel máximo
Harina de quinua o kiwicha	10%	50%
Goma de tara (GT)	0,50%	2%
Agua	75%	110%

Componente	Nivel mínimo	Nivel máximo
Harina de quinua o kiwicha	10%	50%
Mezcla de gomas (GX+GT, 1:1)	0,50%	2%
Agua	75%	110%

Para este caso, el contenido de almidón de papa fue variables para cada tratamiento y se obtuvo de la diferencia de 100% con el contenido de harina de quinua o kiwicha. Para la elaboración de los panes libres de gluten óptimos obtenidos en esta parte del estudio, se siguieron utilizando las mismas proporciones de levadura (3%), azúcar (3%), sal (2%) y aceite de soya (6%).

Finalmente, para la quinta parte del experimento, se utilizaron las formulaciones optimizadas con harina de quinua y kiwicha, obtenidas en la anterior parte del estudio, y se buscó incorporar la harina de tarwi, para ello se utilizó el Diseño Central Compuesto Rotacional (DCCR), considerando como variables el contenido de agua y de harina de tarwi. Se consideró como antecedentes de estos rangos de concentración a las investigaciones realizadas por Sahagún y Gómez (2018) y Ziobro et al. (2013b, 2016), quienes incorporan harina de otras leguminosas, entre 10 a 30 %, a los panes libres de gluten y mencionan que el requerimiento de agua de la masa puede llegar a ser hasta 160%, dependiendo del tipo de proteína que se utilice en la formulación. Los niveles de los componentes, se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Niveles de harina de los componentes establecidos para optimizar el nivel de harina de tarwi y agua utilizando el Diseño Central Compuesto Rotacional (DCCR)

Componente	Niveles del DCCR				
	-1.41	-1	0	+1	+1.41
Harina de tarwi	5,85%	10%	20%	30%	34,14%
Agua	57,39%	75%	117,5%	160%	177,60%

Para esta parte de la investigación, la elaboración de los panes libres de gluten óptimos se utilizó la mezcla de goma de tara y goma xantana (1:1) en un 0,5% y se siguieron utilizando las mismas proporciones de levadura (3%), azúcar (3%), sal (2%) y aceite de soya (6%) que en las anteriores partes del estudio.

Con respecto al proceso de elaboración de los panes se realizó en base a 500g de peso de las harinas o almidones utilizados. Todos los ingredientes secos, tales como, almidón o harina de cultivos andinos, gomas y sal se mezclaron durante 1 minuto a baja velocidad en un mezclador planetario (KMX93, Kenwood). La levadura se disolvió previamente en agua y se mezcló con azúcar. Luego, el agua y el aceite de soya se incorporaron al recipiente y se mezclaron durante otros 3 minutos a alta velocidad.

Luego, 300g de la masa resultante se vertieron en moldes de aluminio; la masa se fermentó durante 30 minutos en un cámara a 30 °C y 80 – 85% HR (Climacell EVO 111, Alemania) y se hornearon a 200 °C durante 60 minutos (Colección Oster® Gourmet Collection, Perú). Después del horneado, los panes libres de gluten se dejaron enfriar a temperatura ambiente durante 2 h y luego se embolsaron en bolsas de polietileno hasta el día siguiente para realizar las mediciones de caracterización física.

3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para la primera parte del estudio se utilizó el *software Design Expert 11,0* (Stat-Ease Inc., Minneapolis, USA) para determinar el modelo matemático de mejor ajuste de los resultados experimentales. El análisis de varianza (ANVA), las pruebas de comparación múltiples (Tukey-HSD) y el análisis de correlación de los resultados fueron realizados utilizando el software Statgraphics Centurion XVI (Statpoint Technologies, Inc. Virginia, USA).

Para la segunda parte del estudio, los datos se analizaron utilizando Statgraphics Centurion XVII (StatPoint Technologies Inc., Warrenton, Virginia, EE. UU.). Se aplicó un análisis de varianza de una vía (ANOVA) con comparación de medias mediante la prueba de Tukey ($p < 0.05$) y un análisis de regresión no lineal para determinar los parámetros reológicos y cinéticos del proceso de fermentación.

Para la tercera, cuarta y quinta parte del estudio se utilizaron los diseños de superficie de respuesta, como el diseño de mezclas y el diseño central compuesto rotacional. Los modelos matemáticos de ajuste a las respuestas, así como el proceso propio de optimización de las variables respuestas se realizaron utilizando el *Software Design Expert 11,0v* (Stat-Ease Inc., Minneapolis, USA). Todos los análisis se llevaron a cabo al menos por triplicado y se presentan los valores medios \pm desviación estándar, indicando si es que existe diferencia significativa entre los resultados.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. PROPIEDADES DE PASTA Y TEXTURALES DE LAS MEZCLAS DE HARINAS DE QUINUA (*Chenopodium quinoa*), KIWICHA (*Amaranthus caudatus*) Y TARWI (*Lupinus mutabilis*) EN UN SISTEMA ACUOSO

4.1.1. Mezclas obtenidas y caracterización de materias primas

En la Tabla 7, se muestran los tratamientos codificados (M1, M2...M10), donde la suma de todos los componentes fue de 100%. Los tratamientos estuvieron compuestos por 3 ingredientes individuales (tratamientos M1, M2 y M3), 3 mezclas binarias (tratamientos M4, M5 y M6) y 4 mezclas ternarias (tratamientos M7, M8, M9 y M10).

Tabla 7: Proporciones de los tratamientos formulados de acuerdo con el diseño de mezcla *simplex lattice*

Tratamiento	Harina de quinua (%)	Harina de kiwicha (%)	Harina de tarwi (%)
M1	100	0	0
M2	0	100	0
M3	0	0	100
M4	50	50	0
M5	50	0	50
M6	0	50	50
M7	67	17	17
M8	17	67	17
M9	17	17	67
M10	33	33	33

La composición proximal de las harinas de quinua, kiwicha y tarwi fueron de 8,0%, 10,2% y 9,9% de humedad, 14,4%, 14,3% y 52,9% de proteína, 5,8%, 12,2% y 21,6% de grasa, 2,3%, 2,6% y 2,8% de ceniza y 7,2%, 2,5% y 8,8% de fibra cruda, y 69,5%, 65,7% y 12,8% de carbohidratos, respectivamente. Las tres harinas presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) en sus contenidos de proteína, grasa, fibra y carbohidratos.

La composición proximal de la quinua y kiwicha fueron muy similares a lo reportado por Repo-Carrasco *et al.* (2010); de la misma forma para el caso del tarwi los altos contenidos de proteínas (52,9%) y grasas (21,6%) de esta leguminosa fueron similares a los reportados por Rosell *et al.* (2009).

4.1.2. Capacidad de retención de agua (CRA) y color de las mezclas

La capacidad de retención de agua de las harinas de quinua, kiwicha y tarwi, así como de sus mezclas binarias y ternarias se muestran en la Tabla 8; donde se puede apreciar el elevado %CRA, de más de 200%, por parte de la harina de tarwi (M3). Moderados valores de %CRA presentó la harina de kiwicha (M2), seguido por la harina de quinua (M1). Estos valores, afectaron linealmente la capacidad de retención de agua de las mezclas binarias y ternarias, como se muestra en la Tabla 11.

Con respecto a la capacidad de retención de agua (%CRA) según Turkut *et al.* (2016), esta propiedad está relacionada al contenido de proteína y fibra de las harinas. El elevado %CRA de la harina de tarwi (222.8%) fue debido al alto contenido de proteínas presentes en su composición. Sathe *et al.* (1982) reportan que la CRA de la harina de la harina de tarwi fue de 120% cuando el contenido de proteína fue de 44.43%. Esta característica puede ser beneficiosa para los panes libres de gluten. De acuerdo con Sciarini *et al.* (2010b), la alta capacidad de retención de agua de la harina de soya, la cual también es una leguminosa, provocó el ablandamiento de la miga y retardó el envejecimiento de los panes libres de gluten. Sin embargo, la elevada capacidad de retención de agua de esta harina también puede afectar negativamente el volumen final de los panes, si es que no se incorpora la cantidad de agua apropiada para lograr la gelatinización completa de los almidones de los demás componentes amiláceos (Sahagún y Gómez, 2018).

Con respecto al color de las harinas y sus mezclas (Tabla 8), el valor de L* (blancura) de la harina de tarwi fue mayor que la harina de kiwicha y la harina de quinua; como era de esperarse en las mezclas que contenían harina de quinua Pasankalla (M1, M4, M7, M8 y M10), predominó el color rojo (a*+); mientras que en mezclas que contenían harina de tarwi (M3, M6 y M9), predominó el color amarillo (b* +). El color de las mezclas se pudo modelar matemáticamente utilizando ecuaciones cuadráticas (Tabla 11).

Según los valores obtenidos de L* y b*, las formulaciones con harinas de kiwicha y tarwi prometen dar productos terminados claros y de color amarillo, mientras que las formulaciones en que predomina la harina de quinua, tendrán colores más oscuros.

Tabla 8: Valores medios de capacidad de retención de agua y color (L*, a* y b*) de los tratamientos preparados con la mezcla de harina de quinua (HQ), harina kiwicha (HK) y harina de tarwi (HT)

Tratamiento	CRA (%)	L*	a*	b*
M1	68,79 ± 1,7 ^a	60,60 ± 0,2 ^a	2,91 ± 0,1 ^f	9,97 ± 0,1 ^a
M2	95,05 ± 2,3 ^c	66,11 ± 0,2 ^e	1,09 ± 0,0 ^c	11,73 ± 0,1 ^c
M3	222,79 ± 3,9 ^h	68,19 ± 0,1 ^f	-0,56 ± 0,0 ^a	14,92 ± 0,1 ^e
M4	80,51 ± 0,5 ^b	61,38 ± 0,4 ^{abc}	2,59 ± 0,0 ^{ef}	10,73 ± 0,0 ^{ab}
M5	136,53 ± 4,4 ^e	62,09 ± 0,3 ^{abc}	2,10 ± 0,1 ^{de}	11,83 ± 0,1 ^c
M6	161,47 ± 0,5 ^f	67,03 ± 0,2 ^{ef}	0,22 ± 0,0 ^b	13,00 ± 0,6 ^d
M7	95,60 ± 1,4 ^c	61,09 ± 0,2 ^{ab}	2,60 ± 0,0 ^{ef}	10,67 ± 0,1 ^{ab}
M8	107,87 ± 2,6 ^d	62,88 ± 1,4 ^{cd}	1,93 ± 0,6 ^d	11,39 ± 0,7 ^{bc}
M9	176,48 ± 5,7 ^g	64,30 ± 0,5 ^d	0,85 ± 0,1 ^c	13,04 ± 0,1 ^d
M10	130,40 ± 0,3 ^e	62,17 ± 0,1 ^{bc}	1,90 ± 0,0 ^d	11,70 ± 0,0 ^c

^{a-h} Las letras minúsculas diferentes en superíndice muestran diferencia significativa ($p < 0.05$) entre los tratamientos. CRA (Capacidad de retención de agua). L*, a*, b* (Coordenadas de color).

4.1.3. Propiedades de pasta de las mezclas

La Tabla 9 muestra los valores promedios de las viscosidades de las formulaciones, cuando fueron dispersas en un exceso de agua y sometidas a un ciclo de calentamiento y enfriamiento. En esta tabla se puede apreciar que las propiedades de pasta de las formulaciones fueron afectadas significativamente ($p < 0,05$) por las interacciones entre las

harinas. De la misma forma en la Figura 14, se muestran mediante gráficos de contorno los efectos de las mezclas binarias y ternarias de las harinas de quinua, kiwicha y tarwi sobre los valores de viscosidad pico (VP), viscosidad mínima (VM), viscosidad de retrogradación (VR) y viscosidad final (VF).

Tabla 9: Valores medios de las propiedades de pasta de las harinas de quinua (HQ), kiwicha (HK), tarwi (HT) y sus mezclas binarias y ternarias

Tratamiento	VP (cP)	VM (cP)	VF (cP)	VR (cP)	PT (°C)
M1	147,50 ± 10,6 ^d	137,50 ± 10,6 ^d	336,50 ± 20,5 ^e	189,00 ± 9,9 ^e	67,73 ± 0,3 ^d
M2	1188,50 ± 4,9 ^h	932,50 ± 3,5 ^h	1194,00 ± 1,4 ⁱ	261,50 ± 2,1 ^f	61,10 ± 0,0 ^b
M3	9,00 ± 1,4 ^a	6,50 ± 0,7 ^a	13,00 ± 0,0 ^a	6,50 ± 0,7 ^a	nd
M4	221,00 ± 4,2 ^e	221,00 ± 4,2 ^e	355,00 ± 5,7 ^f	134,00 ± 1,4 ^d	63,53 ± 0,0 ^{bc}
M5	60,00 ± 2,8 ^b	60,00 ± 2,8 ^b	87,00 ± 4,2 ^b	27,00 ± 1,4 ^b	68,33 ± 0,0 ^d
M6	320,00 ± 7,1 ^f	315,50 ± 7,8 ^f	408,50 ± 9,2 ^g	93,00 ± 1,4 ^c	63,53 ± 0,0 ^b
M7	111,50 ± 4,9 ^c	111,50 ± 4,9 ^c	206,50 ± 7,8 ^c	95,00 ± 2,8 ^c	61,48 ± 0,0 ^{bcd}
M8	365,00 ± 5,7 ^g	352,00 ± 5,7 ^g	483,00 ± 8,5 ^h	131,00 ± 2,8 ^d	65,80 ± 0,9 ^{bc}
M9	52,50 ± 2,1 ^b	52,00 ± 1,4 ^b	79,50 ± 4,9 ^b	27,50 ± 3,5 ^b	66,38 ± 0,0 ^{cd}
M10	136,50 ± 4,9 ^d	137,00 ± 4,2 ^d	232,00 ± 5,7 ^d	95,00 ± 1,4 ^c	63,48 ± 0,0 ^{bc}

^{a-i} Las letras minúsculas diferentes en superíndice muestran diferencia significativa ($p < 0,05$) entre los tratamientos. VP: Viscosidad pico; VM: Viscosidad mínima; VF: Viscosidad final; VR: Viscosidad de retrogradación; PT: Temperatura pico; nd: no determinado.

El mayor valor de la viscosidad pico (VP), o también llamada viscosidad máxima, fue logrado por la harina de kiwicha (1188,5 cP) y el menor valor de VP se manifestó en la harina de tarwi (9,0 cP). Las mezclas binarias (M4, M5 y M6) y ternarias (M7, M8, M9 y M10) manifestaron valores moderados de VP (52,5 – 365,0 cP). La viscosidad pico de las formulaciones se vieron afectadas significativamente por la inclusión de harina de quinua y harina de tarwi.

La viscosidad mínima (VM) siguió un comportamiento similar, siendo la harina de kiwicha (M2) la muestra con mayor VM (932,5 cP); sin embargo, la harina de quinua (M2) presentó un mínimo descenso en el valor de VM (137,5 cP) y esta harina afectó significativamente a las mezclas binarias (M4, 221,0 cP) y ternarias (M7, M8, M9 y M10) que la contenían.

La viscosidad final (VF) de los tratamientos fue mayor que viscosidad pico (VP), siendo la máxima VF lograda por la harina de kiwicha (M2, 1194,0 cP), seguido por la mezcla ternaria (M8, 483,0 cP) y mezcla binaria (M6, 408,5 cP).

Con respecto a la viscosidad de retrogradación (VR), la cual es calculada mediante la resta de la VF y VM, siguió la misma tendencia antes mencionada, sin embargo, todas las formulaciones presentaron valores de VR muy bajos (27,0 – 261,5 cP), lo cual es muy positivo ya que este parámetro está relacionado a la estabilidad durante el almacenamiento y tiempo de vida del producto final.

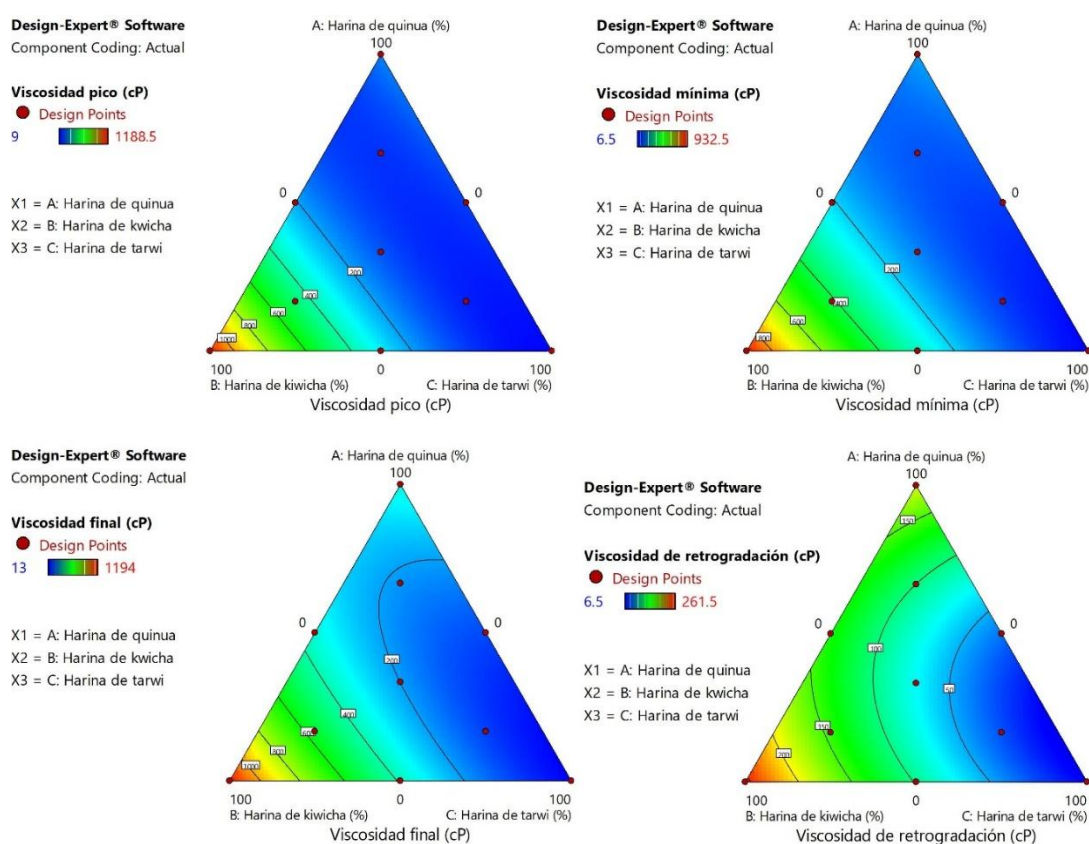


Figura 14: Diagramas de contorno de los efectos de las mezclas de harinas de quinua, kiwicha y tarwi sobre la viscosidad pico (cP), viscosidad mínima (cP), viscosidad de retrogradación (cP) y viscosidad final (cP)

Tanto la VP, VM, VF y VR de las mezclas se pudieron modelar matemáticamente utilizando ecuaciones cuadráticas con valores cercanos a la unidad del coeficiente de determinación ($R^2 = 0.98 - 0.99$), lo que demuestra el buen ajuste del modelo predictivo (Tabla 11).

De acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación, la incorporación de la harina de tarwi disminuyó significativamente los parámetros de viscosidad del sistema cuando se mezcló con las harinas de quinua y kiwicha. De forma similar Sciarini *et al.* (2010b), reportan la disminución de los valores de VP y VR cuando la harina de soya se mezcló con la harina de arroz y almidón de maíz. Según los autores, esta disminución está relacionada con la dilución del almidón causada por la presencia de proteínas. Además, los autores señalan que las proteínas de soya pueden actuar como relleno inactivo interfiriendo la asociación de los enlaces de hidrógeno entre las moléculas del almidón. Julianti *et al.* (2017), también reportan la disminución de la VP y VR cuando la harina de soya se mezcló con la harina de camote y almidón de maíz. Los autores atribuyen la disminución de la viscosidad en las mezclas debido a las interacciones que tienen los almidones con la grasa y proteína de la harina de soya. Por lo tanto, es de esperar que la harina de tarwi, tenga un comportamiento similar a la harina de soya, y que el elevado contenido de proteínas y grasa en su composición afecte significativamente las propiedades de pasta de los tratamientos.

Las interacciones entre las harinas de quinua y kiwicha tuvieron efectos no aditivos y no lineales en los parámetros de viscosidad en el sistema acuoso, según Obanni y Bemiller (1997) este fenómeno se observa cuando los almidones mezclados tienen diferentes temperaturas de gelatinización ya que la amilopectina solubilizada del almidón, que gelatiniza primero, puede formar una red atrapando los gránulos del otro almidón evitando así su correcta gelatinización. Estos mismos efectos no aditivos y no lineales en las propiedades de pasta han sido recientemente informados por Zhu *et al.* (2020), quienes señalan que el almidón con temperatura de gelatinización más baja tiende a unir el agua y gelatinizarse primero, interfiriendo con la gelatinización de los demás almidones en una mezcla.

Según Li *et al.* (2016) la temperatura de gelatinización del almidón de quinua se encuentra entre 56,2 °C y 64,6 °C, mientras que la temperatura de gelatinización del almidón de kiwicha se encuentra entre 65,22 °C y 67,05 °C (Singh *et al.*, 2014); por lo tanto, es de esperar que el almidón de la quinua gelatinice primero que interfiera con la gelatinización de los gránulos de almidón de kiwicha disminuyendo así los parámetros de viscosidad de las mezclas.

Los diferentes parámetros de viscosidad obtenidos de la prueba de pasta, usualmente son correlacionados con el comportamiento del producto durante el proceso y la calidad y estabilidad del producto final, por ejemplo Ragaee y Abdel-Aal (2006) señalan que la viscosidad pico a menudo se correlaciona con la calidad del producto final y comportamiento del producto durante el proceso. De acuerdo con Alvarez-Jubete *et al.* (2010a) la VP de las harinas de quinua y kiwicha estuvieron relacionados con el volumen de los panes sin gluten, manifestando que a mayores valores de VP de los harinas de los pseudocereales se logró mayor volumen en el producto final. Por otro lado, Horstmann *et al.* (2017) afirman que una miga más suave se logra cuando se tienen bajos valores de VP.

De acuerdo con Alvarez-Jubete *et al.* (2010a) la VF es un indicador importante de la resistencia de la pasta formada durante el enfriamiento, y representa un parámetro de calidad importante. Para todas las formulaciones, los valores de VF fueron superiores a los valores de VP, lo cual es ventajoso ya que en las formulaciones de panes sin gluten se desea que la viscosidad de las masas sea estable durante el horneado para que puedan retener el gas producido durante el proceso de fermentación o el aire incorporado durante el batido (Ziobro *et al.*, 2016; Ziobro *et al.*, 2013b)

Los bajos valores de VR obtenidos en las formulaciones indican que las mezclas tendrán una baja tasa de retrogradación y sinéresis del almidón (Ragaee y Abdel-Aal, 2006), lo cual es beneficioso para la calidad del producto terminado.

4.1.4. Propiedades texturales de los geles formados por las mezclas

En la Tabla 10 se muestran los valores promedios de las propiedades texturales de los geles formados a partir del calentamiento y enfriamiento de las harinas en un exceso de agua. Las propiedades texturales de los 10 tratamientos fueron afectadas significativamente por las interacciones de las harinas en estudio. Tal como se puede observar en la Figura 15, donde se muestran mediante gráficos de contorno los efectos de las mezclas de las harinas de quinua, kiwicha y tarwi sobre la firmeza, consistencia, cohesividad e índice de viscosidad de los geles.

Los geles formados por las harinas de quinua (M1) y kiwicha (M2) obtuvieron los máximos valores de firmeza (0,8 N), consistencia (7,19 N.s), cohesividad (0,43 N) e índice de viscosidad (3,54 N.s), sin embargo, se evidenciaron efectos antagónicos en la mezcla binaria

de harina de quinua con harina de kiwicha (M4) debido a que la firmeza de los geles se redujo hasta en dos veces en todas las propiedades texturales. Por otro parte, la harina de tarwi tuvo un efecto significativo ($p < 0.05$) en la firmeza, consistencia, cohesividad e índice de viscosidad de los geles, disminuyendo los valores de estas propiedades texturales hasta en 10 veces, como fue el caso de la cohesividad e índice de viscosidad de la mezcla binaria M5 y la mezcla ternaria M9.

Tabla 10: Valores medios de las propiedades texturales de los geles formados por las harinas de quinua (HQ), kiwicha (HK) y tarwi (HT) y sus mezclas binarias y ternarias

Tratamiento	Firmeza (N)	Consistencia (N.s)	Cohesividad (N)	Índice de viscosidad (N.s)
M1	0.80 ± 0.1^f	7.19 ± 0.9^d	0.41 ± 0.10^a	3.53 ± 0.3^a
M2	0.78 ± 0.1^f	7.18 ± 0.7^d	0.43 ± 0.03^a	3.54 ± 0.2^a
M3	0.22 ± 0.0^{ab}	3.40 ± 0.0^{bc}	0.04 ± 0.01^e	0.11 ± 0.0^f
M4	0.37 ± 0.1^e	3.49 ± 0.6^c	0.20 ± 0.01^b	1.68 ± 0.1^c
M5	0.26 ± 0.0^{abc}	2.83 ± 0.3^{ab}	0.10 ± 0.03^d	0.32 ± 0.0^{ef}
M6	0.37 ± 0.0^e	3.47 ± 0.4^c	0.23 ± 0.01^b	2.33 ± 0.1^b
M7	0.31 ± 0.0^{cde}	2.96 ± 0.4^{abc}	0.22 ± 0.02^b	2.01 ± 0.3^c
M8	0.34 ± 0.0^{de}	3.21 ± 0.3^{bc}	0.17 ± 0.02^c	1.36 ± 0.3^d
M9	0.20 ± 0.0^a	2.65 ± 0.1^a	0.11 ± 0.01^d	0.51 ± 0.1^e
M10	0.27 ± 0.1^{bcd}	2.86 ± 0.1^{ab}	0.11 ± 0.01^d	0.43 ± 0.1^e

^{a-f} Las letras minúsculas diferentes en superíndice muestran diferencia significativa ($p < 0.05$) entre los tratamientos.

Las propiedades texturales de los geles como firmeza, consistencia e índice de viscosidad se pudieron modelar matemáticamente utilizando ecuaciones cuadráticas, mientras que la cohesividad de los geles fue modelada utilizando el modelo especial cuártico. Todos los modelos seleccionados evidenciaron un excelente ajuste de los valores experimentales con el modelo matemático seleccionado, evidenciando valores del coeficiente de determinación cercanos a la unidad ($R^2 = 0.93 - 0.99$) (Tabla 11).

4.1.5. Correlación entre las propiedades texturales y las propiedades de pasta

Según el análisis de correlación realizado, todas las propiedades de texturales se correlacionaron significativamente con las propiedades de pasta. En especial la firmeza de

los geles se correlacionó positivamente con la VR ($r = 0,90$; $p < 0,05$) y la VF ($r = 0,73$; $p < 0,05$); la consistencia de los geles se correlacionó con la VR ($r = 0,83$; $p < 0,05$); la cohesividad de los geles se correlacionó con la VR ($r = 0,92$; $p < 0,05$) y la VF ($r = 0,78$; $p < 0,05$), y el índice de viscosidad se correlacionó con la VR ($r = 0,88$; $p < 0,05$) y la VF ($r = 0,74$; $p < 0,05$).

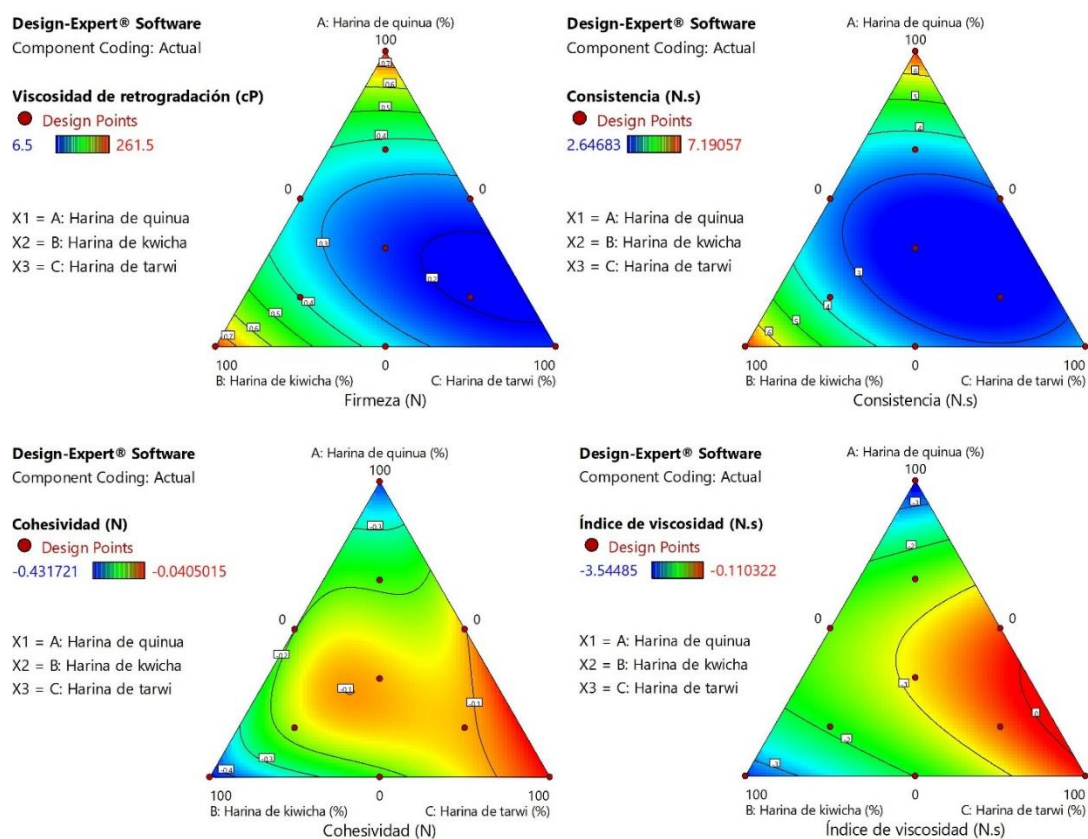


Figura 15: Diagramas de contorno de los efectos de las mezclas de harinas de quinua, kiwicha y tarwi sobre la firmeza (N), consistencia (N.s), cohesividad (N) e índice de viscosidad (N.s) de los geles formados

Las propiedades texturales de los geles formados en esta investigación estuvieron muy correlacionadas con las propiedades de pasta de las formulaciones. Esto significa que las propiedades texturales pueden servir como una herramienta económica y rápida de análisis para el desarrollo de productos ya que, conociendo, por ejemplo, la firmeza o el índice de viscosidad de un gel se podrían conocer los diferentes parámetros reológicos como la viscosidad de retrogradación o viscosidad final de la pasta.

Se evidenció que la incorporación de harina de tarwi disminuyó significativamente la firmeza, consistencia, cohesividad e índice de viscosidad de los geles. Esto es debido al poco porcentaje de almidón que puede tener esta leguminosa (Wrigley, 2003).

Los mayores valores de firmeza, consistencia, cohesividad e índice de viscosidad fueron logrados por las harinas de quinua y kiwicha por separado, sin embargo, cuando estas harinas fueron mezcladas en diferentes proporciones los cuatro parámetros texturales de los geles disminuyeron significativamente. Este fenómeno está relacionado con la interrupción de la gelatinización de los almidones cuando son atrapados por la red de amilopectina o por las interacciones con las proteínas.

Las propiedades texturales de los geles formados por la dispersión de harina o almidones en un exceso de agua y calentados hasta 95 °C han sido estudiados con el fin de evaluar si es que existe sinergia entre las harinas o almidones utilizando el enfoque del diseño de mezclas (Karam *et al.*, 2005; Yilmaz *et al.*, 2015). Según Karam *et al.*, (2005) las mezclas de almidones nativos se pueden usar para obtener propiedades sensoriales especiales, evitando el uso de almidones químicamente modificados. Así mismo, en una reciente investigación, Yilmaz *et al.* (2015) utilizaron el diseño de mezclas para evaluar las propiedades texturales de los geles formados de las mezclas de harina de trigo, harina de trigo sarraceno y harina de arroz. Dichos autores encontraron que la harina de trigo sarraceno, el cual, también es un pseudocereal, disminuyó significativamente los parámetros texturales como dureza, gomosidad y masticabilidad de los geles cuando fue mezclada con la harina de trigo y la harina de arroz. Así mismo, los autores recomiendan utilizar harina de arroz en combinación con harina de trigo sarraceno para aumentar la viscosidad de la mezcla, pero también para disminuir la velocidad de retrogradación y sinéresis de las harinas.

Los resultados obtenidos en la primera parte de la investigación, sirvieron para entender el comportamiento de las materias primas a utilizar y permitieron tomar la decisión de evaluar el comportamiento de las harinas de los cultivos andinos, por separado, con la finalidad de poder entender su comportamiento en las diferentes etapas de elaboración de los panes libres de gluten.

Tabla 11: Modelos matemáticos predictivos que indican el efecto de cada componente de la mezcla y sus interacciones sobre los parámetros de color, % CRA, propiedades de pasta y propiedades texturales de los geles formados al mezclar harina de quinua (HQ), harina de kiwicha (HK) y harina de tarwi (HT)

Parámetros	Modelo matemático predictivo*	R²
<i>Parámetros de color y funcional (Y)</i>		
%CRA	$Y = 65,37 \text{ (HQ)} + 95,29 \text{ (HK)} + 221,99 \text{ (HT)}$	0,9954
L*	$Y = 60,89 \text{ (HQ)} + 65,94 \text{ (HK)} - 68,15 \text{ (HT)} - 9,60 \text{ (HQ) (HK)} - 10,65 \text{ (HQ) (HT)}$	0,9664
a*	$Y = 2,84 \text{ (HQ)} + 1,18 \text{ (HK)} - 0,57 \text{ (HT)} + 2,69 \text{ (HQ) (HK)} + 3,81 \text{ (HQ) (HT)}$	0,9849
b*	$Y = 9,99 \text{ (HQ)} + 11,68 \text{ (HK)} + 14,93 \text{ (HT)} - 2,61 \text{ (HQ) (HT)}$	0,9962
<i>Propiedades de pasta (Y)</i>		
Viscosidad pico (cP)	$Y = 1157,01 \text{ (HK)} - 1817,26 \text{ (HQ) (HK)} - 1169,26 \text{ (HK) (HT)}$	0,9850
Viscosidad mínima (cP)	$Y = 160,28 \text{ (HQ)} + 916,28 \text{ (HK)} - 1322,72 \text{ (HQ) (HK)} - 686,72 \text{ (HK) (HT)}$	0,9911
Viscosidad final (cP)	$Y = 346,82 \text{ (HQ)} + 1172,55 \text{ (HK)} + 13,23 \text{ (HT)} - 1659,45 \text{ (HQ) (HK)} - 818,63 \text{ (HK) (HT)}$	0,9919
Viscosidad de retrogradación (cP)	$Y = 186,54 \text{ (HQ)} + 256,27 \text{ (HK)} - 336,73 \text{ (HQ) (HK)} - 245,36 \text{ (HQ) (HT)}$	0,9830
<i>Propiedades texturales (Y)</i>		
Firmeza (N)	$Y = 0,78 \text{ (HQ)} + 0,77 \text{ (HK)} + 0,23 \text{ (HT)} - 1,72 \text{ (HQ) (HK)} - 1,03 \text{ (HQ) (HT)}$	0,9771
Consistencia (N.s)	$Y = 7,04 \text{ (HQ)} + 7,04 \text{ (HK)} + 3,51 \text{ (HT)} - 15,06 \text{ (HQ) (HK)} - 9,66 \text{ (HQ) (HT)} - 7,06 \text{ (HK) (HT)}$	0,9631
Cohesividad (N)	$Y = -0,41 \text{ (HQ)} - 0,43 \text{ (HK)} - 0,041 \text{ (HT)} + 0,88 \text{ (HQ) (HK)} + 0,49 \text{ (HQ) (HT)} - 2,38 \text{ (HQ)}^2 \text{ (HK)}$ $(\text{HT}) + 8,07 \text{ (HQ) (HK)}^2 \text{ (HT)} - 3,20 \text{ (HQ) (HK) (HT)}^2$	0,9999
Índice de viscosidad (N.s)	$Y = -3,75 \text{ (HQ)} - 3,41 \text{ (HK)} + 8,35 \text{ (HQ) (HK)} + 6,52 \text{ (HQ) (HT)}$	0,9304

* Sólo las variables significativas ($p < 0.05$) fueron seleccionadas para la construcción del modelo matemático predictivo.

4.2. INFLUENCIA DE LA GOMA DE TARA Y LA GOMA XANTANA SOBRE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS Y TEXTURALES DE LA MASA Y EL PAN LIBRE DE GLUTEN A BASE DE ALMIDÓN

4.2.1. Formulaciones y resultados de la evaluación de las masas

En la Tabla 12 se muestran las cuatro formulaciones de masas y panes libres de gluten a base de almidón. Las formulaciones fueron CS-XG, para señalar que fue elaborada con almidón de maíz y goma xantana como hidrocólido; CS-TG, representó a la formulación de almidón de maíz con goma de tara; PS-XG, representó a la formulación de almidón de papa con goma xantana y PS-TG fue la formulación de almidón de papa con goma de tara.

Tabla 12: Formulaciones de panes libres de gluten realizadas para la primera parte de la investigación

Ingredientes (% base Harina/ Almidón)	CS-XG	CS-TG	PS-XG	PS-TG
Almidón de maíz	100	100	0	0
Almidón de papa	0	0	100	100
Levadura	3	3	3	3
Azúcar	3	3	3	3
Sal	2	2	2	2
Aceite de soya	6	6	6	6
Goma xantana	0,5	-	0,5	-
Goma de tara	-	0,5	-	0,5
Agua	75	75	75	75

a) Propiedades viscoelásticas

Las propiedades viscoelásticas de las cuatro formulaciones se muestran en la Tabla 13. En todos los tratamientos, G' (módulo elástico) fue mayor que G'' (módulo viscoso), lo que sugiere que la masa se comporta como un sólido elástico. Un comportamiento similar ha sido reportado en otros trabajos (Demirkesen *et al.*, 2010; Mancebo *et al.*, 2015b). La formulación CS-XG fue la más elástica de todos los tratamientos, mientras que la formulación PS-XG fue la más viscosa. Las masas con goma tara (CS-TG y PS-TG) mostraron valores más bajos de G' y G'' .

Tabla 13: Propiedades viscoelásticas de la masa y parámetros cinéticos durante la fermentación

Masa libre de gluten		CS-XG	CS-TG	PS-XG	PS-TG
Propiedades reológicas	G' (Pa) - 1Hz	17450,00 ± 551,54 ^d	463,20 ± 44,60 ^b	1733,50 ± 116,50 ^c	309,20 ± 14,29 ^a
	k' (Pa.s ^{n'})	12712,00 ± 1402 ^d	350,69 ± 21,62 ^b	603,95 ± 27,78 ^c	260,31 ± 11,16 ^a
	n'	0,82 ± 0,10 ^d	0,43 ± 0,01 ^a	0,48 ± 0,03 ^a	0,66 ± 0,04 ^c
	G'' (Pa) - 1Hz	616,35 ± 57,55 ^c	107,86 ± 16,54 ^a	878,45 ± 42,75 ^d	249,07 ± 17,45 ^b
	k'' (Pa.s ^{n''})	519,60 ± 22,95 ^c	98,89 ± 9,33 ^a	234,86 ± 96,05 ^b	221,78 ± 5,44 ^b
	n''	0,41 ± 0,08 ^b	0,30 ± 0,03 ^a	0,52 ± 0,11 ^c	0,47 ± 0,02 ^b
	Tan (δ) - 1Hz	0,21 ± 0,08 ^a	0,23 ± 0,01 ^a	0,51 ± 0,01 ^b	0,81 ± 0,03 ^c
Parámetros cinéticos	C	1,33 ± 0,10 ^a	1,41 ± 0,23 ^a	2,34 ± 0,36 ^b	1,45 ± 0,15 ^a
	D ₀ (cm)	3,45 ± 0,06 ^a	4,12 ± 0,15 ^b	3,89 ± 0,24 ^a	6,18 ± 0,24 ^c
	V _{max} (min ⁻¹)	0,08 ± 0,01 ^a	0,08 ± 0,02 ^a	0,06 ± 0,01 ^a	0,12 ± 0,04 ^b
	X(min)	21,54 ± 1,12 ^b	19,95 ± 4,84 ^b	16,94 ± 5,60 ^b	6,23 ± 1,67 ^a
	R ²	0,99	0,99	0,98	0,89

* Los valores seguidos de letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los tratamientos. CS-XG: Masa de almidón de maíz con goma xantana; CS-TG: Masa de almidón de maíz con goma de tara; PS-XG: Masa de almidón de papa con goma xantana; PS-TG: Masa de almidón de papa con goma de tara.

El valor de Tan (δ), que indica la relación entre el comportamiento viscoso y elástico, fue menor de 1 para todos los tratamientos. Las formulaciones con goma de xantano obtuvieron los valores más bajos de Tan (δ), mientras que la formulación PS-TG obtuvo el valor de tan (δ) cercano a 1, lo que indica una relación equilibrada entre su comportamiento viscoso y elástico. Este comportamiento es característico de los llamados geles débiles y está de acuerdo con observaciones previas con respecto a las propiedades viscoelásticas de las masas libres de gluten (Lazaridou *et al.*, 2007; Mancebo *et al.*, 2015b).

Según Ziobro *et al.* (2016), es difícil predecir la influencia exacta de las propiedades reológicas de la masa en la estructura y textura de la miga de pan. La baja viscosidad de la masa influye positivamente en la calidad del producto final, ya que mejora la expansión de las celdas de gas durante la fermentación, y de esta manera, afecta positivamente al volumen de la masa y permite obtener una miga bien aireada (Hüttner *et al.*, 2010). Sin embargo, una viscosidad demasiado baja podría provocar un debilitamiento de la estructura y, por lo tanto, disminuir la retención de gas e influir negativamente en la calidad del pan (Houben *et al.*, 2012).

Los resultados obtenidos en esta investigación demostraron que las formulaciones con bajo valor de Tan (δ) (CS-XG, CS-TG y PS-XG) fueron más consistentes, y por lo tanto se espera que estas masas podrían contener el gas producido durante el proceso de fermentación.

b) Cinética de fermentación de las masas

La Tabla 13 muestra los parámetros cinéticos de la evolución del crecimiento de la masa durante el proceso de fermentación. El diámetro inicial (D_0) de la formulación PS-TG fue mayor que los otros tratamientos, esto estuvo relacionado con sus propiedades viscoelásticas, ya que esta masa presentó un comportamiento menos viscoso y elástico que las otras formulaciones, por lo que esta masa se extendió más fácilmente una vez colocada en la placa de Petri (Figura 16). De la misma manera, como esta masa fue más fluida, también experimentó una mayor tasa de crecimiento (V_{\max}) en comparación con las otras formulaciones. La relación entre el comportamiento viscoso y elástico de las masas (Tan δ) se correlacionó negativamente con el tiempo necesario para alcanzar la tasa máxima de crecimiento de la masa (X) durante el proceso de fermentación ($r = -0,97$; $p < 0,05$), lo que indica, que una masa más elástica necesitará un tiempo de fermentación más largo. Las masas sin gluten generalmente se fermentan entre 30 y 45 minutos (Alvarez-Jubete *et al.*, 2010a; Horstmann *et al.*, 2016; Horstmann *et al.*, 2018) y muy pocas veces, este parámetro es considerado como una variable de investigación. Según Cappa *et al.* (2016), si el tiempo de fermentación no es controlado, la estructura de la masa libre de gluten podría debilitarse y causar el colapso de la estructura durante el proceso de horneado.

Se observó una buena concordancia entre los datos experimentales y la ecuación de Gompertz (Ec. 11) en todos los tratamientos (coeficiente de determinación R^2 entre 0,89 y 0,99). Con respecto a los parámetros cinéticos obtenidos; el valor de C, el cual representa la diferencia entre el diámetro máximo y el mínimo alcanzado, fue mayor en la formulación de PS-GX que en las otras formulaciones, lo que indica, que esta masa alcanzó el mayor desarrollo durante el proceso de fermentación. Según Romano *et al.* (2007), el modelamiento matemático del proceso de fermentación proporciona una idea de la velocidad y la intensidad del crecimiento de la masa. Además, puede proporcionar una idea general sobre el tiempo apropiado de fermentación de una masa, ya que este tiempo depende en gran medida de la composición y la consistencia de las masas. Los resultados obtenidos en esta investigación mostraron que el tiempo de fermentación está influenciado por las propiedades reológicas iniciales de la masa.

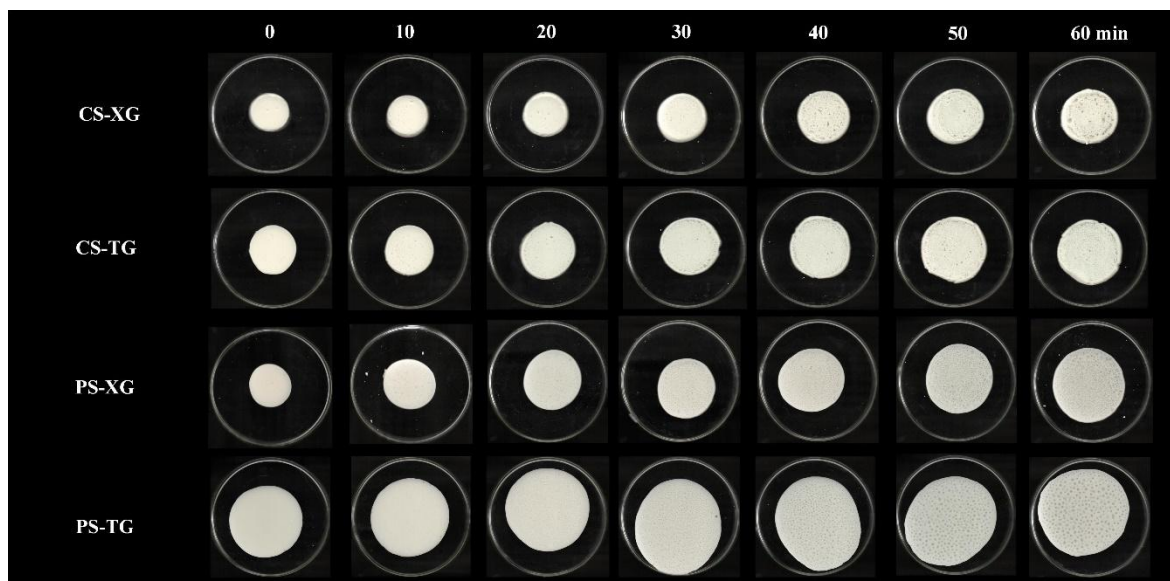


Figura 16: Masas sin gluten durante la fermentación. CS-XG: almidón de maíz con goma xantana; CS-TG: almidón de maíz con goma tara; PS-XG: almidón de papa con goma xantana; PS-TG: almidón de papa con goma tara

c) Propiedades de pasta

Los resultados obtenidos para las propiedades de pegado de las cuatro formulaciones se resumen en Tabla 14. Se debe indicar que apartir de esta sección los resultados de las propiedades de pasta fueron expresados en las unidades de Pa.s, debido a que fueron viscosidades obtenidas de las formulaciones y no de harinas o almidones solamente. Esto fue realizado para poder diferenciar las propiedades de pasta obtenidas en la primera parte de la investigación. Las formulaciones que contenían almidón de papa (PS-XG y PS-TG) mostraron valores más altos de VP, VM, BD y VF en comparación con las formulaciones a base de almidón de maíz, estos resultados son concordantes con hallazgos anteriores (Gularte y Rosell, 2011; Horstmann *et al.*, 2016). Las formulaciones con almidón de maíz (CS-XG y CS-TG) obtuvieron valores de VR más altos en comparación con las formulaciones de almidón de papa, lo que sugiere que las formulaciones a base de almidón de maíz tendrán una mayor tasa de retrogradación y sinéresis en el producto final (Ragae y Abdel-Aal, 2006). No se observaron diferencias significativas para las propiedades de pasta entre las formulaciones CS-XG y CS-TG, pero si entre PS-XG y PS-TG. Aunque, estos resultados podrían explicarse por el diferente contenido de amilosa entre los almidones (Horstmann *et al.*, 2016), pero el efecto diferente de la XG y TG en el almidón de maíz y el almidón de papa no se pudo aclarar completamente.

Tabla 14: Propiedades de pasta de las formulaciones

Formulación	VP (Pa.s)	VM (Pa.s)	BD (Pa.s)	VF (Pa.s)	VR (Pa.s)	PT (min)
CS-XG	1,913 ± 0,00 ^a	0,819 ± 0,00 ^a	1,094 ± 0,01 ^a	1,915 ± 0,01 ^a	1,095 ± 0,01 ^a	8,40 ± 0,0 ^a
CS-TG	1,910 ± 0,02 ^a	0,793 ± 0,00 ^a	1,116 ± 0,02 ^a	1,854 ± 0,01 ^a	1,060 ± 0,01 ^a	8,30 ± 0,0 ^a
PS-XG	3,338 ± 0,01 ^b	1,249 ± 0,01 ^c	2,090 ± 0,00 ^b	2,033 ± 0,00 ^a	0,784 ± 0,00 ^b	6,05 ± 0,2 ^b
PS-TG	3,732 ± 0,09 ^c	1,179 ± 0,02 ^b	2,558 ± 0,07 ^c	2,015 ± 0,11 ^a	0,841 ± 0,09 ^b	6,30 ± 0,0 ^b

* Los valores seguidos de letras diferentes en la misma columna son significativamente diferentes ($p < 0.05$). VP: Viscosidad pico; TV: Viscosidad de caída; BD: Viscosidad de quiebre; FV: Viscosidad final; VR: Viscosidad de retrogradación. PT Tiempo en el que se logra la viscosidad pico.

La formulación PS-TG tuvo mayores valores de VP y BD, seguido por la formulación PS-XG. Estos resultados indican una fuerte interacción entre los galactomananos de la goma de tara y el almidón de la papa. De acuerdo con la literatura, el aumento de la viscosidad pico se puede interpretar suponiendo que el sistema es bifásico, con la goma ubicada en la fase continua su concentración aumenta considerablemente debido a la hinchazón de los gránulos de almidón durante la gelatinización (Achayuthakan y Supphantharika, 2008; Chaisawang y Supphantharika, 2006; Lee *et al.*, 2017). Chaisawang y Supphantharika (2006) evaluaron el comportamiento de los gránulos de almidón de tapioca nativa y aniónicos durante la gelatinización mediante SEM (*Scanning Electron Microscope*) y observó que la goma de guar no atrapaba los gránulos de almidón, sino que formaba una estructura laminar en la fase continua; por lo tanto, los gránulos de almidón pueden hincharse libremente antes de la ruptura física, lo que resulta en un aumento de la viscosidad máxima. Resultados similares fueron reportados por Rodriguez-Sandoval *et al.* (2015) quienes evaluaron el efecto de la goma guar y una mezcla de goma guar / HPMC en las propiedades de pasta de una mezcla de harina de maíz precocida con almidón de tapioca.

En el caso de la goma xantana, está bien documentado que la incorporación de esta goma disminuye la viscosidad del sistema, ya que los gránulos de almidón se encuentran completamente atrapados por una capa de goma apretada que causa una hinchazón restringida a altas temperaturas, limitando el aumento de viscosidad y, posteriormente, retardando la gelatinización de los gránulos de almidón (Chaisawang y Supphantharika, 2006; Horstmann *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2018). Con respecto al VF, todas las formulaciones mostraron valores similares, por lo que se espera que la elasticidad de los productos finales sea muy similar (Numfon, 2017). Como ya se mencionó anteriormente, las masas sin gluten

deben ser lo suficientemente viscosas para que puedan retener el gas producido durante el proceso de fermentación, pero también se desea que la viscosidad de la masa sea estable durante el proceso de horneado. Aunque la formulación PS-TG puede lograr una alta viscosidad durante el proceso de calentamiento, experimenta una alta descomposición (BD: 2,56 Pa.s), lo que sugiere una baja estabilidad durante el proceso de cocción.

4.2.2. Evaluación de la calidad del pan

a) Pérdida de humedad durante el horneado, volumen específico y estructura de miga

En la Tabla 15 se muestran las propiedades del pan obtenidas para las cuatro formulaciones estudiadas. Con respecto a la pérdida de humedad durante el horneado, fue evidente que las formulaciones con goma tara (CS-TG y PS-TG) perdieron más agua que las formulaciones con goma xantana, este resultado está relacionado con la forma en que la goma interactúa con el almidón. Como se mencionó anteriormente, los galactomananos se dispersan en la fase continua, lo que permite la gelatinización completa y la posterior retrogradación del almidón, por lo que el agua absorbida por los almidones está lista para evaporarse. En contraste, la goma de xantana atrapa los gránulos de almidón, lo que retrasa la evaporación del agua durante la cocción. Esto es en gran medida ventajoso porque puede ralentizar el envejecimiento del pan al retrasar la formación de recristalización de amilopectina durante el almacenamiento (Liu *et al.*, 2018). Además, estos resultados pueden deberse a la carga negativa de la molécula de goma xantana. Se sabe que los grupos de ácidos acéticos y pirúvicos disponibles en la estructura química de la molécula de goma xantana permiten una mayor absorción de agua a través de los enlaces de hidrógeno (Encina-Zelada *et al.*, 2018) en comparación con la carga neutra presentada por los galactomananos (Horstmann *et al.*, 2018).

La formulación PS-XG alcanzó el volumen específico más alto seguido de las formulaciones CS-TG, CS-XG y PS-TG. El volumen específico de los panes estuvo altamente correlacionado con el número de células/cm² y el % de área ocupada por los alvéolos, lo que demuestra que el pan con mayor volumen específico obtuvo mejor estructura alveolar.

Tabla 15: Características de calidad de los panes libres de gluten a base de almidón

Parámetros de calidad	CS-XG	CS-TG	PS-XG	PS-TG
Pérdidas por horneado (%)	16,64 ± 2,5 ^a	18,77 ± 1,5 ^b	15,85 ± 0,7 ^a	17,67 ± 0,7 ^{ab}
Volumen específico (mL/g)	2,24 ± 0,04 ^b	2,41 ± 0,01 ^c	2,77 ± 0,05 ^d	1,93 ± 0,03 ^a
N° Cells/cm ²	52,48 ± 5,3 ^a	46,40 ± 10,9 ^a	83,50 ± 8,5 ^b	-
% Área de células	31,04 ± 2,8 ^{ab}	28,11 ± 3,9 ^a	33,20 ± 3,0 ^b	-
Área promedio de las células (mm ²)	2,83 ± 0,3 ^a	2,69 ± 0,5 ^a	2,87 ± 0,3 ^a	-
Dureza de la miga (N)	2,37 ± 0,25 ^b	2,42 ± 0,04 ^b	1,90 ± 0,00 ^a	12,64 ± 0,17 ^c
Cohesividad	0,73 ± 0,03 ^a	0,60 ± 0,01 ^a	3,96 ± 0,01 ^b	0,56 ± 0,06 ^a
Elasticidad	0,98 ± 0,02 ^a	0,93 ± 0,02 ^a	0,99 ± 0,01 ^a	0,96 ± 0,01 ^a
Gomosidad (N)	1,40 ± 0,12 ^a	1,44 ± 0,01 ^a	7,50 ± 0,30 ^c	6,41 ± 0,24 ^b
Masticabilidad (N)	1,37 ± 0,12 ^a	1,33 ± 0,03 ^a	7,38 ± 0,32 ^c	6,45 ± 0,29 ^b

* Los valores seguidos de letras diferentes en la misma columna son significativamente diferentes ($p < 0.05$). CS-XG: pan a base de almidón de maíz con goma xantana; CS-TG: pan a base de almidón de maíz con goma tara; PS-XG: pan a base de almidón de papa con goma xantana; PS-TG: pan a base de almidón de papa con goma tara.

En los panes libres de gluten elaborados con PS-TG, la miga colapsó (Figura 17), por lo tanto, no fue posible medir la estructura de la miga. Según Sciarini *et al.* (2012), este efecto es característico de los sistemas con una rápida pérdida de agua. El colapso de la miga también puede ser causado por la coalescencia de los alvéolos durante la etapa temprana de cocción como resultado de una expansión demasiado rápida de las burbujas de CO₂ (Conte *et al.*, 2018). Este resultado no fue inesperado, porque la masa presentaba una baja viscoelasticidad y una tasa de crecimiento rápida durante el proceso de fermentación. El colapso de la miga podría evitarse disminuyendo el contenido de agua de la formulación o mediante la inclusión de fuentes de proteínas que tengan una alta absorción de agua, otra posibilidad podría eventualmente reducir los tiempos de fermentación de la masa. El área celular promedio fue muy similar en todas las formulaciones. Según Sciarini *et al.* (2012), si el área de la célula oscila entre 2.00 y 10.00 mm², son considerados alvéolos grandes, lo que conduce a la formación de una miga esponjosa.

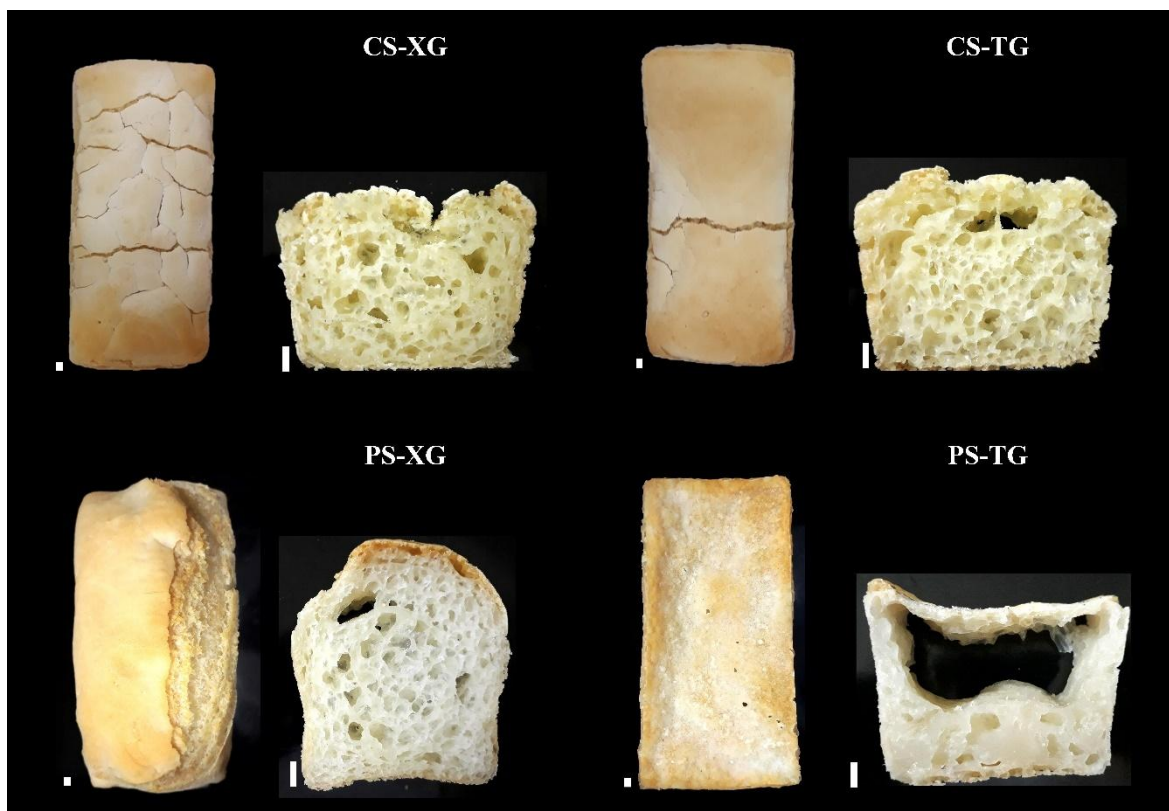


Figura 17: Imágenes representativas de panes sin gluten. CS-XG almidón de maíz con goma xantana, CS-TG almidón de maíz con goma tara, PS-XG almidón de papa con goma xantana, PS-TG almidón de papa con goma tara. La barra blanca representa 1 cm

b) Propiedades texturales del pan libre de gluten

Los resultados del análisis de textura de la miga TPA se muestran en la Tabla 15. La menor dureza en la miga se encontró en la formulación PS-XG, mientras que, la mayor dureza se evidenció en la formulación PS-TG, básicamente debido al colapso de la miga y la consiguiente aglomeración. Se observaron correlaciones negativas entre la dureza de la miga y el volumen específico ($r = -0,81$, $p < 0,05$), N° de células/cm² ($r = -0,85$, $p < 0,05$) y el área de las células ($r = -0,98$; $p < 0,05$). Resultados similares han sido reportados por Horstmann *et al.* (2018) quienes descubrieron que los panes sin gluten elaborados con almidón de papa y goma xantana eran más blandos que los panes hechos de almidón de papa y goma de algarrobo.

En el caso de la cohesividad de la miga, la formulación PS-XG fue más cohesiva que las formulaciones con almidón de maíz. Según Demirkesen *et al.* (2014) y Liu *et al.* (2018), es deseable que los panes sin gluten tengan valores de cohesión moderados porque los panes

con una cohesión demasiado baja son susceptibles a fracturarse y desmenuzarse. La elasticidad de las formulaciones con goma xantana (CS-XG y PS-XG) fue muy similar, sin embargo, se obtuvo un menor valor de elasticidad en la formulación con goma tara (CS-TG). La formulación PS-XG obtuvo los valores más altos de gomosidad y masticabilidad, mientras que no se observaron diferencias significativas de estos parámetros en las formulaciones con almidón de maíz (CS-XG y CS-TG).

Con los resultados obtenidos en esta parte de la investigación, se decidió tomar a la formulación de PS-XG como base o formulación control, con la que se trabajaron en las siguientes partes de la investigación.

4.3. PROPIEDADES REOLÓGICAS Y TEXTURALES DE LAS MASAS LIBRES DE GLUTEN ELABORADAS CON HARINAS DE GRANOS ANDINOS

Tomando como base la formulación control (PS-XG) se evaluó el efecto de adicionar diferentes niveles de sustitución del almidón de papa por las harinas de los granos andinos. En la Tabla 16 se muestran las formulaciones completas de las masas analizadas. A continuación, se muestra el efecto causado en las propiedades reológicas y texturales de las masas.

4.3.1. Propiedades texturales

La evaluación de las propiedades texturales de las masas libres de gluten, no tienen un procedimiento estándar o definido, al contrario de las masas de panificación con trigo, en la cual se puede medir la consistencia (parámetro textural) utilizando el farinógrafo de Brabender (Schober *et al.*, 2005). Diversos métodos empíricos vienen siendo utilizados para evaluar la textura de las masas libres de gluten, desde el uso de simples penetrómetros (Sanchez *et al.*, 2002) hasta equipos más sofisticados como las celdas de extrusión hacia adelante (Forward Extrusion) (Sciarini *et al.*, 2010b) (Moore *et al.*, 2004) o hacia atrás (*Back Extrusion*) (Encina-Zelada *et al.*, 2019; Encina-Zelada *et al.*, 2019; Encina-Zelada *et al.*, 2018). Este último procedimiento, es utilizado con mayor frecuencia en la evaluación de textura de alimentos fluidos y viscosos (Ronda *et al.*, 2017), debido a que se pueden analizar cuatro parámetros texturales: firmeza, consistencia, cohesividad e índice de viscosidad de las masas, los cuales permiten explicar íntegramente las propiedades texturales del alimento.

Tabla 16: Formulaciones de masas libres de gluten con harinas de quinua, kiwicha y tarwi en diferentes proporciones

Ingredientes (% base Harina/ Almidón)	GFD- Control	GFD- HQ- 10%	GFD- HQ- 30%	GFD- HQ- 50%	GFD- HK- 10%	GFD- HK- 30%	GFD- HK- 50%	GFD- HT- 10%	GFD- HT- 20%	GFD- HT- 30%
Almidón de papa	100	90	70	50	90	70	50	90	80	70
Harina de quinua	-	10	30	50	-	-	-	-	-	-
Harina de kiwicha	-	-	-	-	10	30	50	-	-	-
Harina de tarwi	-	-	-	-	-	-	-	10	20	30
Levadura	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Azúcar	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Sal	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Aceite de soya	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Goma xantana	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Agua	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75

*GFD: Masa libre de gluten; HQ: Harina de quinua; HK: Harina de kiwicha; HT: Harina de tarwi.

Las propiedades texturales de las masas libres de gluten elaboradas con diferentes niveles de concentración de harina de quinua (10, 30 y 50%), harina de kiwicha (10, 30 y 50%) y harina de tarwi (10, 20 y 30%) se muestran en la Tabla 17. Según los resultados obtenidos, la masa menos firme (2,07 N) fue la masa control, la cual fue elaborada con 100% de almidón de papa. A medida que se incrementó el nivel de sustitución por harina de quinua, la firmeza de la masa aumentó progresivamente. Para el caso de las masas con harina de kiwicha, la inclusión de 10 y 30%, de esta harina, produjo masas con similar firmeza, esto podría estar relacionado con el contenido de aceite que tiene la kiwicha (7,2%), el cual puede ayudar a disminuir la firmeza de las masas cuando se mezcla con los demás ingredientes. Para el caso de las masas con harina de tarwi, la inclusión de 10% de esta harina registró valores de firmeza (5,07 N) similares a las masas con 10% de harina de quinua (4,83 N) y 10% de kiwicha (5,53 N); sin embargo, a medida que se incrementó el nivel de harina de tarwi, las masas mostraron elevados de firmeza (14,27 N para la masa con 20% de harina de tarwi y 29,63 N para la masa con 30% de harina de tarwi).

Tabla 17: Propiedades texturales de las masas libres gluten elaboradas con diferentes concentraciones de harinas de quinua, kiwicha y tarwi

Formulación	Propiedades texturales de la masa			
	Firmeza (N)	Consistencia (N.s)	Cohesividad (N)	Índice de viscosidad (N.s)
GFD-Control	2,07 ± 0,06 ^a	111,41 ± 5,43 ^a	2,27 ± 0,20 ^g	67,47 ± 0,57 ^f
GFD-HQ-10%	4,83 ± 0,13 ^b	162,92 ± 6,88 ^b	3,73 ± 0,29 ^f	101,80 ± 4,48 ^e
GFD-HQ-30%	7,52 ± 0,31 ^d	253,94 ± 1,39 ^d	6,44 ± 0,41 ^d	148,73 ± 2,27 ^c
GFD-HQ-50%	9,07 ± 0,19 ^e	309,41 ± 4,85 ^e	7,89 ± 0,41 ^c	161,92 ± 9,40 ^c
GFD-HK-10%	5,53 ± 0,25 ^{bc}	163,92 ± 5,71 ^b	3,54 ± 0,33 ^f	92,37 ± 5,53 ^e
GFD-HK-30%	5,76 ± 0,50 ^c	212,99 ± 10,04 ^c	4,96 ± 0,13 ^e	126,33 ± 7,23 ^d
GFD-HK-50%	9,22 ± 0,27 ^e	312,43 ± 10,36 ^e	7,85 ± 0,16 ^c	152,43 ± 6,90 ^c
GFD-HT-10%	5,07 ± 0,15 ^{bc}	184,36 ± 7,76 ^{bc}	4,09 ± 0,21 ^{ef}	125,50 ± 5,22 ^d
GFD-HT-20%	14,27 ± 0,33 ^f	484,51 ± 3,65 ^f	12,81 ± 0,76 ^b	258,16 ± 5,73 ^b
GFD-HT-30%	29,63 ± 0,57 ^g	1012,49 ± 39,54 ^g	23,36 ± 0,47 ^a	361,54 ± 2,08 ^a

Los valores seguidos por letras diferentes en la misma columna son significativamente diferentes (p <0.05).

GFD: Masa libre de gluten; HQ: Harina de quinua; HK: Harina de kiwicha; HT: Harina de tarwi.

En la literatura se pueden encontrar trabajos que determinan la fuerza necesaria para lograr la extrusión de las masas libres de gluten utilizando la prueba de *Forward Extrusion*. Por ejemplo, Sciarini *et al.* (2010b) reportan que la fuerza de extrusión para la masa control libre de gluten, elaborada con 100% harina de arroz, fue de 2,62 N y para las masas libres de gluten que contenían diferentes concentraciones de harina de maíz o harina de soya, la fuerza de extrusión varió entre 0.49 N a 12.27 N. Schober *et al.* (2005) reportan que la fuerza de extrusión de las masas libres de gluten elaboradas con 10 híbridos de harina de sorgo al 70% y 30% almidón de maíz, variaron entre 3,5 – 10,1 N. Así mismo, Moore *et al.* (2004) reportan que la fuerza de extrusión en masas libres de gluten con almidón de trigo, almidón de papa, almidón de maíz y harina de arroz integral varió entre 5,49 a 11,48 N.

La firmeza de las masas libres de gluten, determinada por el método de *Back Extrusion*, ha sido reportada en recientes investigaciones. Los valores de firmeza de las masas elaboradas con harina de arroz (50%), harina de maíz (30%) y harina de quinua (20%) con diferentes niveles de goma xantana (1,5, 2,5 y 3,5%) y agua (90, 100 y 110%) oscilaron entre 5,52 N a

13,29 N (Encina-Zelada *et al.*, 2018) y para el caso de las masas con goma guar (2,5, 3,0 y 3,5%) y agua (90, 100 y 110%) la firmeza de la masa varió entre 9,6 N a 16,95 N. Estos valores se encuentran dentro de los rangos de firmeza encontrados en la gran mayoría de las masas libres de gluten con harinas de granos andinos, a excepción de las masas con harina de tarwi al 30%. Cabe mencionar que las masas elaboradas por Sciarini *et al.* (2010b) contienen elevados contenido de agua (110 a 218% en base a harina y almidón). Estos autores señalan que el uso excesivo de agua se debe al alto contenido de proteínas de la harina de soya, las cuales tienen la capacidad de absorber agua fría disminuyendo de esta manera el agua libre en sistema de la masa. Por esta misma razón, se puede deber que las masas con 20 y 30% de harina de tarwi muestran los valores más altos de firmeza, ya que se ha informado, en la primera parte del estudio, que la capacidad de absorción de agua de la harina de tarwi puede llegar a ser más del 200% (Vidaurre-Ruiz *et al.*, 2019a).

Con respecto a la consistencia, la masa control también mostró menores valores de consistencia (111,41 N.s) que las demás formulaciones. La consistencia de las masas con harina de quinua al 10% y 50%, fue muy similar a las masas con harina de kiwicha al 10% y 50%; sin embargo, la consistencia de la masa con harina de kiwicha al 30% (212,99 N.s) fue menor que la masa con harina de quinua al 30% (253,94 N.s). Este resultado puede estar ligado, según lo anteriormente expuesto, a la diferencia en la composición de estas harinas. Para el caso de las masas con harina de tarwi, la consistencia de la masa con 10% de harina de tarwi (184,36 N.s) fue similar a la consistencia de la masa con 10% de harina de quinua (162,92 N.s) así como a la consistencia de la masa con harina de kiwicha al 10% (163,92 N.s) y 30% (212,99 N.s); sin embargo, a medida que se incrementó el nivel de harina de tarwi en 20 y 30% la consistencia de masa aumentó drásticamente a 483,51 N.s y 1012,49 N.s, respectivamente.

Los valores de consistencia de masas libres de gluten, reportados en la literatura, varían entre 52,5 y 128,23 N.s (Encina-Zelada *et al.*, 2018). Según lo reportado en el presente estudio, la única masa que tiene valores de consistencia en este rango, fue la masa control (111,41 N.s), aunque esto se puede deber al bajo nivel de hidratación (75%) que recibieron las formulaciones a comparación con otros trabajo que utilizan agua entre 90 a 110% (Encina-Zelada *et al.*, 2019; Encina-Zelada *et al.*, 2018).

La cohesividad de la masa control (2.27 N) fue menor que las demás formulaciones. Las masas con quinua al 10% fueron similar de cohesivas que las masas con kiwicha al 10%. En ambos casos a medida que se incrementó el nivel de harina se incrementó la cohesividad, sin embargo, la cohesividad de la masa con harina de kiwicha al 30% (4,96 N) fue mucho menor que la cohesividad de la masa con harina de quinua al 30% (6,44 N). La cohesividad de la masa con harina de tarwi al 10% (4,09 N) fue similar a las masas con harina de quinua y kiwicha al 10% (3,73 N – 3,54 N); sin embargo, a medida que se incrementó el nivel de harina de tarwi en la masa, la cohesividad aumentó a 12.81 N para la masa con 20% de harina de tarwi y 23,36 N para la masa con 30% de harina de tarwi.

Según lo reportado por Encina-Zelada *et al.* (2018) los mínimos y máximos valores de cohesividad de las masas libres de gluten compuestas con harina de arroz, harina de maíz y harina de quinua varían entre 3,92 – 8,36 N cuando se mezclan con diferentes concentraciones de goma xantana y agua. Valores más elevados de cohesividad (12.95 N) se han reportado cuando esta misma masa se ha mezclado con 3,5% de goma guar (Encina-Zelada *et al.*, 2019). La mayoría de los valores de cohesividad determinados en este estudio estuvieron en el rango de lo reportado en otros estudios, con excepción de la masa con 30% de harina de tarwi, la cual fue la más cohesiva (23.36 N).

El índice de viscosidad de la masa control (67,47 N.s) fue mucho menor que en las demás formulaciones. Para el caso de las masas con harina de quinua, el índice de viscosidad de las masas con 30 y 50% fue similar (148,73 – 161,92 N.s), de la misma forma con el índice de viscosidad de la masa con harina de kiwicha al 50% (152,43 N.s). La masa con harina de kiwicha al 30% tuvo similar índice de viscosidad que la masa con harina de tarwi al 10% (126,33 – 125,50 N.s). El mayor valor de índice de viscosidad se obtuvo en la masa con harina de tarwi al 30% (361,54 N).

Todos los valores reportados en la presente investigación fueron más elevados en comparación con los índices de viscosidad de masas libres de gluten con harina de arroz, harina de maíz y harina de quinua con goma xantana o con goma guar, cuyos valores de índice viscosidad, oscilaron entre 15,36 – 37,30 N.s (Encina-Zelada *et al.*, 2018; Encina-Zelada *et al.*, 2019). Esto se podría deber a las diferencias en la concentración de agua y el nivel de goma utilizados en la formulación.

De acuerdo con Encina-Zelada *et al.* (2018) y Encina-Zelada *et al.* (2019) la calidad física de los panes libres de gluten está muy relacionada a las propiedades texturales de la masa, dichos autores demostraron que a mayor concentración de goma (goma guar o goma xantana 3,5%) con un bajo nivel de hidratación (90%) se producen panes con bajo volumen específico y con migas más duras. Por lo tanto, según los resultados obtenidos en la presente investigación se podría esperar que las masas con quinua o kiwicha al 10 y 30% y la masa con harina de tarwi al 10% puedan dar panes libres de gluten de buena calidad; sin embargo, es recomendable incluir dentro de las variables el nivel de agua y goma, con las cuales se podría tener propiedades texturales similares a la masa control y obtener panes libres de gluten con harinas de granos andino con similar volumen específico.

4.3.2. Propiedades de flujo

En la Tabla 18 se muestran las propiedades de flujo de las masas libres de gluten con diferentes concentraciones de harina de quinua (10, 30 y 50%), harina de kiwicha (10, 30 y 50%) y harina de tarwi (10, 20 y 30%), así como las propiedades de flujo de masa control. El índice del comportamiento del flujo (n) de las masas estuvo en el rango de 0,28 – 0,42, evidenciando un comportamiento pseudoplástico. Valores similares de n (0,29 – 0,5) han sido reportados por (Tunç y Kahyaoglu, 2016) en masas libres de gluten a base de harina de arroz, con diferentes sustituciones con harina desgrasada de avellana (5, 10 y 15%) y diferentes gomas como goma de algarrobo, goma guar y goma xantana al 0,25%. Valores más elevados de n (0,43 – 0,70) también se han sido reportados por (Sabanis y Tzia, 2011), en masas libres de gluten a base de almidón de maíz y harina de arroz con diferentes concentraciones de goma xantana, HPMC, goma guar y carragenano (1, 1,5 y 2%) y diferentes niveles de hidratación (75 – 105%). Valores elevados de n , son más frecuentes en masas de *cakes* libres de gluten (0,585 – 0,629) (Aydogdu *et al.*, 2017; Aydogdu *et al.*, 2018). El valor de índice de comportamiento de flujo (n) encontrado guarda relación con lo expuesto por Demirkesen *et al.* (2010) y Ronda *et al.* (2017), quienes señalan que las masas libres de gluten generalmente siguen un comportamiento de fluido pseudoplástico cuando se someten a las pruebas de corte constante.

Con respecto al ajuste de los datos experimentales con los modelos matemáticos que explican el comportamiento del flujo, los datos experimentales se ajustaron correctamente al modelo de la ley de la potencia o también llamado Ostwald de Waele (R^2 : 0,94 – 0,99)

(Tabla 18). Otros modelos como Herschel-Bulkley y Bingham también han sido probados para modelar el comportamiento de flujo en masas libres de gluten con harina de quinua, aunque con menos éxito en el ajuste de los datos experimentales (Turkut *et al.*, 2016).

El coeficiente de consistencia (K) de la masa control (31,38 Pa.sⁿ) fue similar a la consistencia registrada en la masa con harina de kiwicha al 10% (32,56 Pa.sⁿ). Esto podría estar referido al contenido de lípidos de la harina de kiwicha, ya que se ha demostrado que la inclusión de aceite en el sistema disminuye la consistencia de la masa (Moreira *et al.*, 2012; Mancebo *et al.*, 2017). La consistencia de todas las masas se incrementó a medida que se incorporaron las harinas de los granos andinos, el aumento más significativo se evidenció en las masas con harina de tarwi al 20 y 30% (consistencia máxima 436,80 Pa.sⁿ). Esto está relacionado al incremento de proteínas en la masa, las cuales tienen la capacidad de absorber agua fría y disminuir la fluidez de la masa, así como también podría estar influenciado por el contenido de fibra en el sistema (Sabanis *et al.*, 2009).

Tabla 18: Propiedades reológicas de masas libres gluten elaboradas con diferentes concentraciones de harinas de quinua, kiwicha y tarwi

Formulación	Propiedades de flujo de la masa		
	K (Pa.s ⁿ)	n	R ² *
GFD-Control	31,38 ± 2 ^a	0,36 ± 0,04 ^{abc}	0,99
GFD-HQ-10%	40,11 ± 2 ^b	0,40 ± 0,02 ^{bc}	0,98
GFD-HQ-30%	66,27 ± 3 ^c	0,36 ± 0,05 ^{abc}	0,99
GFD-HQ-50%	65,81 ± 4 ^c	0,42 ± 0,04 ^{bc}	0,97
GFD-HK-10%	32,56 ± 3 ^a	0,40 ± 0,01 ^{bc}	0,94
GFD-HK-30%	47,24 ± 3 ^b	0,37 ± 0,02 ^{abc}	0,98
GFD-HK-50%	83,80 ± 6 ^d	0,36 ± 0,02 ^{abc}	0,98
GFD-HT-10%	58,12 ± 8 ^b	0,34 ± 0,05 ^{ab}	0,98
GFD-HT-20%	179,24 ± 27 ^e	0,46 ± 0,07 ^c	0,99
GFD-HT-30%	436,80 ± 45 ^f	0,28 ± 0,04 ^a	0,99

Los valores seguidos por letras diferentes en la misma columna son significativamente diferentes (p <0.05). *El coeficiente de determinación (R²) indica el nivel de ajuste del modelo de ley de la potencia o Ostwald de Waele con los valores experimentales. GFD: Masa libre de gluten; HQ: Harina de quinua; HK: Harina de kiwicha; HT: Harina de tarwi.

Se ha reportado que el salvado de quinua, el cual es rico en fibra dietaria, tiene una alta capacidad de absorción de agua y afecta negativamente al volumen final del pan libre de gluten produciendo migas compactas (Föste *et al.*, 2014). Así mismo, se ha informado que la quinua y kiwicha contienen mayor proporción de fibra insoluble que fibra soluble (Repo-Carrasco-Valencia *et al.*, 2019) y que la fibra insoluble es la responsable de aumentar la capacidad de retención de agua (Kurek *et al.*, 2018), por lo tanto, era de esperarse que mientras más fibra insoluble esté presente en la masa, la consistencia aumentaría. La masa con harina de tarwi (10%) tuvo similar consistencia (58,12 Pa.sⁿ) que la masa con kiwicha al 30% (47,24 Pa.sⁿ) esto está relacionado al elevado contenido de aceite que tiene la harina de tarwi (21,6%) pero a medida que se incrementó el contenido de harina de tarwi en las masas, también se incrementó la consistencia de las mismas. La inclusión de proteína de lupino en panes libres de gluten ha sido investigada recientemente, destacando sus buenas propiedades tecnofuncionales (capacidad de absorción de agua y emulsión) las cuales produjeron panes con migas suaves y buena distribución de alveolos en el pan (Horstmann *et al.*, 2017). También se ha informado que la inclusión de concentrado de proteína de lupino (59% proteína) en un 10% en panes libres de gluten a base de harina de almidón de maíz y almidón de papa proporciona panes con buen volumen específico (Ziobro *et al.*, 2016).

Según la Figura 18, donde se muestran las curvas de flujo, se experimentaron velocidades de corte máximas de 100 s⁻¹. Similares velocidades de corte han sido experimentadas por Tunç y Kahyaoglu (2016), quienes evaluaron las propiedades de flujo de las masas libres de gluten a base de harina de arroz, con diferentes sustituciones con harina desgrasada de avellana (5, 10 y 15%) y diferentes gomas como algarrobo, guar y xantana. Velocidades de corte menores (hasta 50 s⁻¹) también se han experimentado en la evaluación de las propiedades de flujo de las masas libres de gluten, como en el trabajo realizado por Turkut *et al.* (2016), quienes evaluaron las propiedades de flujo de masas libres de gluten con harina de arroz, almidón de papa, harina de quinua, harina de trigo sarraceno y goma xantana. Así mismo, también se han reportado velocidades de corte elevadas (200 s⁻¹), como en el trabajo de Sabanis *et al.* (2009), quienes evaluaron las propiedades de flujo de masas libres de gluten a base de almidón de maíz, harina de arroz e hidroxipropil metil celulosa (HPMC) con diferentes niveles de fibras (3, 6 y 9%) de trigo, maíz, avena y cebada. La amplia variedad de velocidades de corte experimentadas en las investigaciones depende básicamente de la consistencia de las masas.

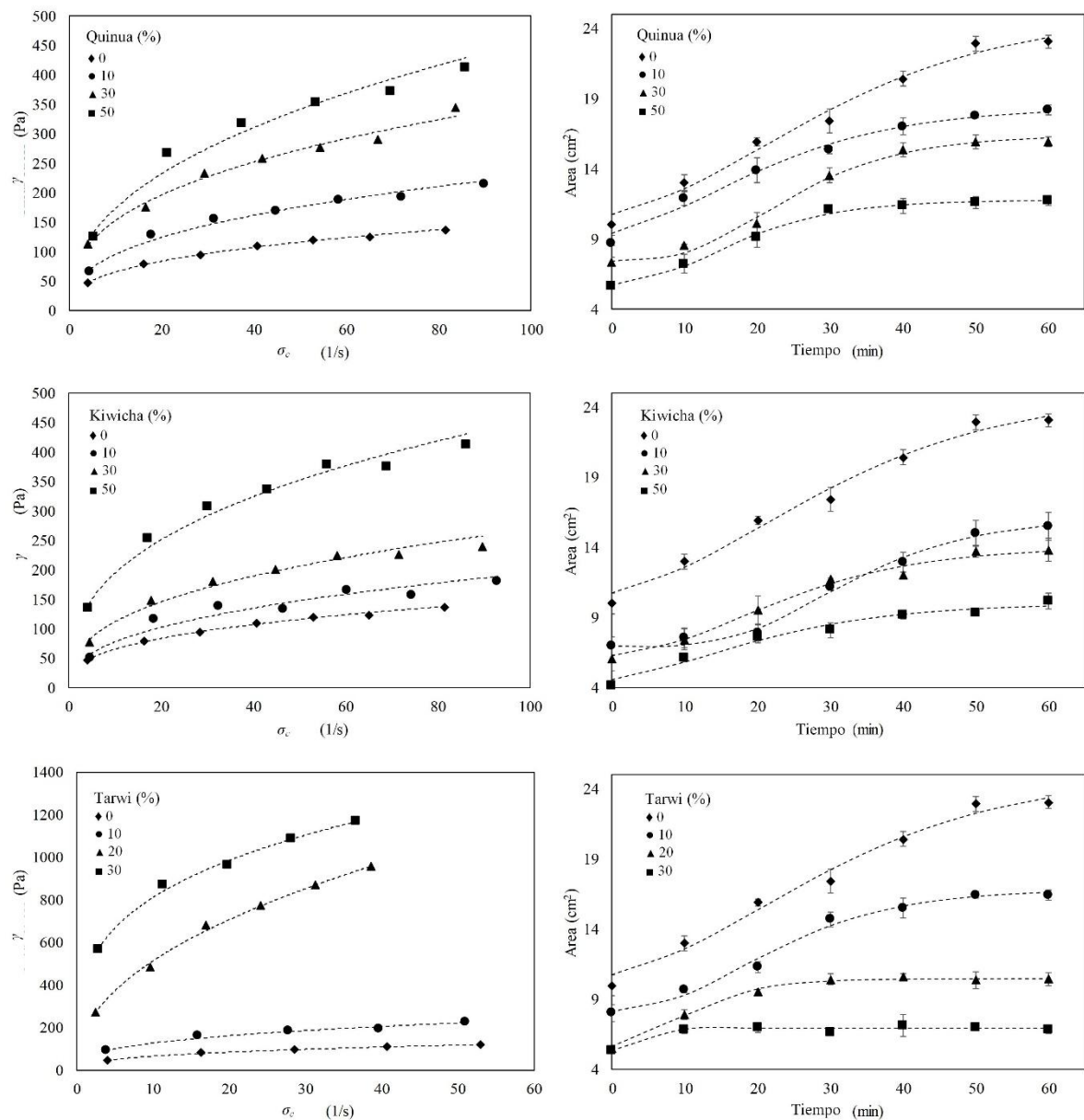


Figura 18: Curvas de flujo y curvas de crecimiento durante el proceso de fermentación de masas libres de gluten elaboradas con granos andinos en diferentes concentraciones

4.3.3. Cinética de crecimiento de las masas durante la fermentación

El crecimiento de las masas libres de gluten con harinas de granos andinos se modeló correctamente utilizando la ecuación de Gompertz (Ec. 12) ($R^2: 0,87 - 0,99$) (Figura 18). Cabe indicar que en esta sección del trabajo se utilizó la Ecuación 6, donde se considera el área como variable a medir, debido a que fue necesario emplear la función de determinación de área en formas irregulares del software ImageJ 1.51j8 ya que algunas masas no se desmoldaron perfectamente en forma circular en la placa Petri.

Los parámetros cinéticos de crecimiento de las masas durante el proceso de fermentación se muestran en la Tabla 19. Según el valor C (cm²), el cual representa la diferencia entre el diámetro máximo y mínimo obtenido, la masa control creció mucho más que las demás formulaciones (15.22 cm²), mientras que las masas con harina de quinua (10 y 30%), las masas con harina de kiwicha (10 y 30%) y la masa con harina de tarwi (10%) lograron un crecimiento moderado (entre 7,91 – 9,73 cm²). Se observó un reducido crecimiento en las masas con quinua al 50%, kiwicha al 50% y tarwi con 20% (entre 4,97 – 6,12 cm²), mientras que la masa con harina de tarwi al 30% fue la que menos creció (1,58 cm²).

Tabla 19: Parámetros cinéticos de fermentación de las masas libres gluten elaboradas con diferentes concentraciones de harinas de quinua, kiwicha y tarwi

Formulación	Parámetros cinéticos de crecimiento de la masa			
	C (cm ²)	V _{max} (min ⁻¹)	X (min)	R ^{2*}
GFD-Control	15,22 ± 1 ^e	0,05 ± 0,01 ^a	21,03 ± 3 ^d	0,99
GFD-Q-10%	9,73 ± 1 ^d	0,07 ± 0,01 ^a	20,97 ± 1 ^d	0,99
GFD-Q-30%	8,95 ± 1 ^d	0,12 ± 0,05 ^a	13,73 ± 2 ^{bc}	0,99
GFD-Q-50%	6,12 ± 0,3 ^{bc}	0,11 ± 0,02 ^a	13,49 ± 2 ^{abc}	0,99
GFD-K-10%	9,50 ± 2 ^d	0,09 ± 0,04 ^a	29,17 ± 3 ^e	0,99
GFD-K-30%	7,91 ± 1 ^{cd}	0,08 ± 0,01 ^a	17,82 ± 3 ^{cd}	0,99
GFD-K-50%	5,89 ± 1 ^{bc}	0,07 ± 0,01 ^a	12,97 ± 1 ^{abc}	0,98
GFD-T-10%	8,91 ± 1 ^d	0,09 ± 0,03 ^a	18,17 ± 1 ^{cd}	0,99
GFD-T-20%	4,97 ± 0,3 ^b	0,16 ± 0,01 ^a	8,26 ± 1 ^{ab}	0,99
GFD-T-30%	1,58 ± 0,3 ^a	2,92 ± 1,27 ^b	7,39 ± 3 ^a	0,87

Los valores seguidos por letras diferentes en la misma columna son significativamente diferentes (p <0.05). *El coeficiente de determinación (R²) indica el nivel de ajuste del modelo de Gompertz con los valores experimentales (ANEXO 4). GFD: Masa libre de glute; Q: Harina de quinua; K: Harina de kiwicha; T: Harina de tarwi.

Con respecto a la velocidad máxima de crecimiento (V_{max}) de las masas, se observó que a medida que se incorporaba la harina de granos andinos la velocidad aumentó. La mínima velocidad de crecimiento se evidenció en la masa control (0,05 min⁻¹), mientras que el máximo valor se obtuvo en la masa con harina de tarwi al 30% (2,92 min⁻¹).

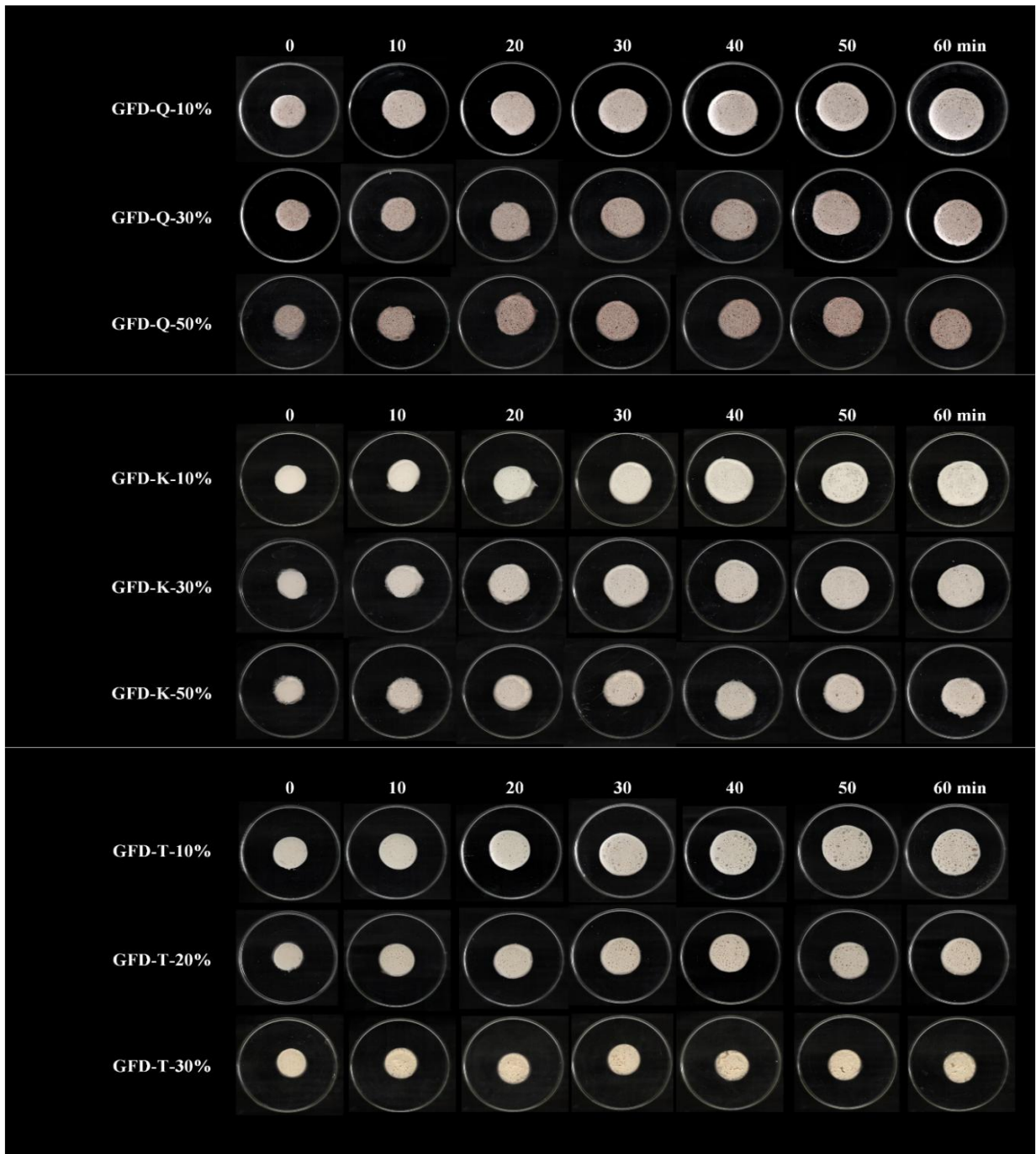


Figura 19: Crecimiento de las masas libres de gluten (GFD) con diferentes concentraciones de harinas de granos andinos. Quinoa (Q). Kiwicha (K), Tarwi (T)

El tiempo para lograr el máximo crecimiento de la masa (X, min) disminuyó a medida que se incrementó el porcentaje de harina de granos andinos, este tiempo estuvo en el margen de 20,97 – 29,17 min para la masa control, la masa con quinoa al 10% y para la masa con kiwicha al 10%.

Para las masas con harina de quinua (30 y 50%), harina de kiwicha (30, 50%) y harina de tarwi (10%), el tiempo necesario para lograr el máximo crecimiento estuvo entre 12,97 – 17,87 min. Mientras que para el caso de las masas con harina de tarwi al 20 y 30% se evidenciaron los tiempos más bajos (7,39 – 8,26 min). Estos resultados demuestran que el tiempo de fermentación de 30 minutos fue suficiente para todas masas, he incluso podría ser menor para masas con mayor porcentaje de harinas de granos andinos (Figura 19). En la Figura 18, se aprecia el tiempo máximo de crecimiento de las masas, cuando la curva se vuelve asintótica. Conocer el tiempo apropiado de fermentación de las masas libres de gluten ayudaría en la optimización de los tiempos del proceso. El control de este parámetro es importante porque si no se controla podría provocar el debilitamiento de la estructura y el colapso de esta durante el horneado (Cappa *et al.*, 2016; Vidaurre-Ruiz *et al.*, 2019b).

4.3.4. Correlación entre los parámetros de cinética de crecimiento de las masas y las propiedades texturales y reológicas de las masas

Los parámetros cinéticos de crecimiento de las masas durante el proceso de fermentación se correlacionaron significativamente ($p < 0.05$) con todas las propiedades texturales y con el coeficiente de consistencia de las masas (Tabla 20). Se encontró que las masas crecían en mayor medida que la firmeza, consistencia (textural), índice de viscosidad y consistencia (reológica) de la masa fuese menor. De forma contraria, se encontró que se lograba mayores velocidades máximas de crecimiento de la masa (V_{max}) cuando la firmeza, consistencia (textural), índice de viscosidad y consistencia (reológica) de la masa fuese mayor. También se encontró que el tiempo máximo de crecimiento de la masa estuvo negativamente correlacionado con los parámetros texturales y reológicos de la masa. Se encontró una mejor correlación de los parámetros cinéticos de crecimiento (C y X) con las propiedades texturales (firmeza e índice de viscosidad) y propiedades reológicas (K) utilizando modelos potenciales (Figura 18). Con estos modelos se puede apreciar que el crecimiento de la masa durante el proceso de fermentación se ve muy influenciada por la firmeza (N), índice de viscosidad (N.s) y consistencia reológica (Pa.sⁿ) de la masa.

Tabla 20: Matriz de correlación (r) entre las propiedades texturales y reológicas de las masas con los parámetros cinéticos de crecimiento de las masas durante el proceso de fermentación

Parámetros cinéticos	Propiedades texturales				Propiedades reológicas	
	Firmeza	Consistencia	Cohesividad	Índice de viscosidad	Índice de flujo (n)	Coefficiente de consistencia (K)
	N	N.s	N	N.s		Pa.s ⁿ
C (cm ²)	-0,81*	-0,80*	-0,82*	-0,85*	0,11	-0,73*
V _{max} (min ⁻¹)	0,86*	0,85*	0,82*	0,77*	-0,52	0,87*
X (min)	-0,64*	-0,66*	-0,69*	-0,72*	0,04	-0,63*

*Nivel de significancia (p <0.05).

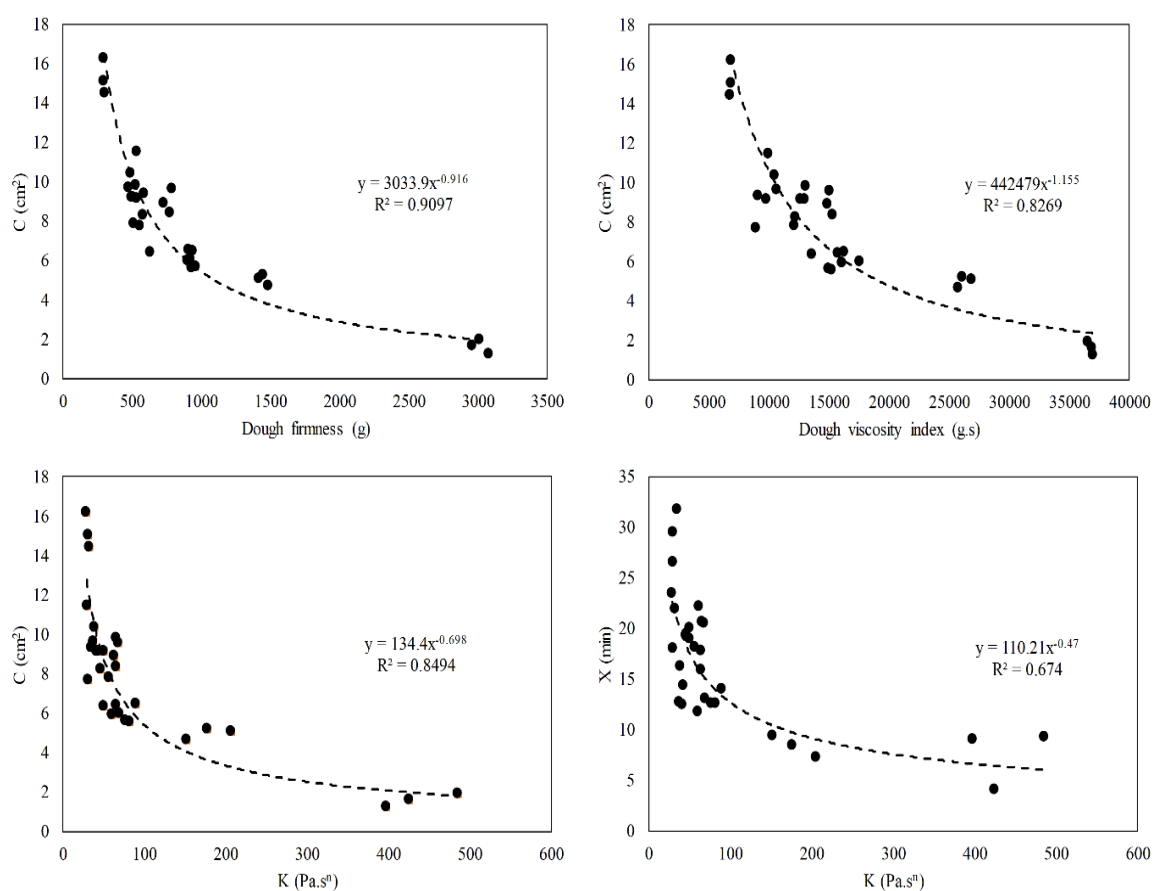


Figura 20: Relación potencial entre los parámetros cinéticos del crecimiento de las masas durante el proceso de fermentación con la firmeza, el índice de viscosidad e índice de consistencia de las masas libres de gluten elaboradas con harinas de granos andinos

De acuerdo con Pruska-ke y Ke (2008), el índice de consistencia de las masas libres de gluten (K) está muy relacionado a los parámetros de retención de CO₂ y serviría para controlar el comportamiento fermentativo de la masa. Por lo tanto, las ecuaciones encontradas podrían

también ser utilizadas para predecir el comportamiento de crecimiento de las masas libres de gluten, con harinas de granos andinos, durante el proceso de fermentación.

Se ha informado que la consistencia de la masa (K) tiene un efecto significativo en el volumen específico del pan (Sciarini *et al.*, 2010a; Sabanis *et al.*, 2009), donde masas menos consistentes no tienen la capacidad de retener el CO₂ producido durante la fermentación o el aire incorporado durante el batido y por lo tanto se producirían panes con bajo volumen específico (Sabanis *et al.*, 2009); sin embargo, es sabido que masas muy consistentes no garantizan su crecimiento durante el proceso de fermentación y podrían producir panes con bajo volumen específico (Sciarini *et al.*, 2010b). Según Ziobro *et al.* (2016) es difícil predecir la influencia exacta de las propiedades reológicas en las características del producto, pero su evaluación durante todo el proceso de panificación, nos podría proporcionar una idea de la influencia en la calidad del producto terminado.

Con los resultados obtenidos en la tercera parte de la investigación, se dedujo que era necesario la optimización del contenido de agua en las formulaciones de masas con granos andinos, así como la evaluación de posibles efectos sinérgicos que pueden tener las gomas y su efecto en las propiedades texturales de las masas.

4.4. OPTIMIZACIÓN DE LAS MASAS LIBRES DE GLUTEN ELABORADAS CON HARINA DE QUINUA O HARINA DE KIWICHA

En la cuarta parte del trabajo de investigación, se decidió utilizar el diseño de mezclas para optimizar las formulaciones de masas con harina de granos andinos. Para ello se trabajaron por separado la optimización de las masas con harina de quinua y las masas con harina de kiwicha. Así mismo, se realizaron tres diferentes experimentos para cada masa (Tabla 21, 22 y 23), con la finalidad de evaluar el efecto que tiene la goma xantana, goma de tara y la mezcla de ambas (relación 1:1) con las propiedades texturales y el producto final, que fue el pan.

Tabla 21: Formulaciones obtenidas del diseño de mezcla D-optimal, realizadas en la cuarta parte de la investigación, para determinar el nivel óptimo de harina de quinua o kiwicha, agua y goma xantana

Mezcla	Harina de quinua o kiwicha (%)	Agua (%)	Goma Xantana (%)
1	50,0	71,5	0,5
2	50,0	70,0	2,0
3	20,9	100,2	0,9
4	40,2	80,9	0,9
5	30,4	90,4	1,3
6	36,7	83,8	1,5
7	10,0	110,0	2,0
8	50,0	70,0	2,0
9	10,0	110,0	2,0
10	37,2	84,3	0,5
11	30,4	90,4	1,3
12	30,0	90,0	2,0
13	30,4	90,4	1,3
14	30,0	90,0	2,0
15	24,3	97,2	0,5
16	11,5	110,0	0,5

Tabla 22: Formulaciones obtenidas del diseño de mezcla D-optimal, realizadas en la cuarta parte de la investigación, para determinar el nivel óptimo de harina de quinua o kiwicha, agua y goma de tara

Mezcla	Harina de quinua o kiwicha (%)	Agua (%)	Goma Tara (%)
1	50,0	71,5	0,5
2	50,0	70,0	2,0
3	20,9	100,2	0,9
4	40,2	80,9	0,9
5	30,4	90,4	1,3
6	36,7	83,8	1,5
7	10,0	110,0	2,0
8	50,0	70,0	2,0
9	10,0	110,0	2,0
10	37,2	84,3	0,5
11	30,4	90,4	1,3
12	30,0	90,0	2,0
13	30,4	90,4	1,3
14	30,0	90,0	2,0
15	24,3	97,2	0,5
16	11,5	110,0	0,5

Tabla 23: Formulaciones obtenidas del diseño de mezcla D-optimal, realizadas en la cuarta parte de la investigación, para determinar el nivel óptimo de harina de quinua o kiwicha, agua y goma mezcla de goma xantana y goma de tara en relación 1:1 (GX+GT)

Mezcla	Harina de quinua o kiwicha (%)	Agua (%)	GX+GT, 1:1 (%)
1	50,0	71,5	0,5
2	50,0	70,0	2,0
3	20,9	100,2	0,9
4	40,2	80,9	0,9
5	30,4	90,4	1,3
6	36,7	83,8	1,5
7	10,0	110,0	2,0
8	50,0	70,0	2,0
9	10,0	110,0	2,0
10	37,2	84,3	0,5
11	30,4	90,4	1,3
12	30,0	90,0	2,0
13	30,4	90,4	1,3
14	30,0	90,0	2,0
15	24,3	97,2	0,5
16	11,5	110,0	0,5

4.4.1. Propiedades texturales de las masas libres de gluten con harina de quinua y goma xantana

Los valores promedios y la desviación estándar de las propiedades texturales de las masas con diferentes concentraciones de harina de quinua, agua y goma xantana se muestran en la Tabla 24. El análisis de los valores promedios muestra que la masa con menor firmeza (0,85 N), consistencia (12,56 N.s), cohesividad (0,40 N) e índice de viscosidad (6,05 N.s) fue lograda en la mezcla que contenía 11,5% de harina de quinua, 110% de agua y 0,5% de goma xantana. Mientras que la masa con mayores valores de firmeza (48,62 N), consistencia (679,37 N.s), cohesividad (32,89 N) e índice de viscosidad (327,61 N.s) fue lograda por la mezcla que contenía 50% de harina de quinua, 70% de agua y 2% de goma xantana.

Estos resultados pueden ser explicados por las diferencias entre las proporciones de los ingredientes de las formulaciones; ya que las masas con elevado contenido de agua (110%) y poca cantidad de goma xantana (0,5%) es lógico pensar que el resultado sea una masa aguada o poco consistente, mientras que para el otro caso, las formulaciones con poco

contenido de agua (70%), elevado contenido de harina de quinua (50%) y elevado contenido de goma xantana (2%) resultarán en masa demasiado consistentes porque al aumentar el contenido de harina y por ende el contenido de proteínas en la formulación, aumentará la absorción de agua por parte de la harina y se verá reforzada con la capacidad que tiene la goma xantana de ligar agua a temperatura ambiente. El estudio recientemente realizado por Encina-Zelada *et al.*, (2018), muestra cuales son los efectos combinados que tiene la goma xantana (1.5, 2.5 y 3.5% en base harinas) y el agua (90, 100 y 110% en base harinas) sobre las propiedades texturales de las masas libres de gluten de una formulación a base de harina de arroz (50%), harina de maíz (30%) y harina de quinua (20%), en dicha investigación muestran que tanto la goma xantana como el agua tienen efectos significativos en las propiedades de textura de las masas libres de gluten, observando que el efecto del agua en la textura de la masa fue más perceptible cuando el contenido de goma xantana se incrementa en la formulación. Así mismo, los autores señalan que las globulinas 11S de la quinua (chenopodin) podrían tener la capacidad de absorber agua fría y eso podría contribuir al aumento de la firmeza de las masas, ya que de acuerdo con Abugoch *et al.* (2009) y Ruiz *et al.* (2016), la globulina 11S de la quinua tiene una estructura similar a la glicinina de la soya. Estudios con masas libres de gluten con harina de soya, muestran que su inclusión aumenta la consistencia de las masas, debido a la capacidad que tienen sus proteínas de absorber agua fría, la cual puede ser ventajosa en cierta parte, si es que se optimiza el nivel apropiado de agua, para que no compita con el agua necesaria para lograr la gelatinización de los almidones (Sciarini *et al.*, 2010b).

Para modelar el comportamiento de las respuestas (propiedades texturales) se tuvo que realizar una transformación de los resultados en logaritmo natural, esto fue sugerido por el propio programa “*Design Expert 11,0v*” debido a que la relación (*ratio*) entre los valores máximos y mínimos de las propiedades texturales fue mayor de 10. Este proceso de transformación matemático de los resultados se realizó con la finalidad de acortar el rango de las respuestas y ajustar a un modelo matemático apropiado. De acuerdo con la Tabla 27, donde se muestra el resumen del análisis de varianza del modelo; el modelo cuadrático fue significativo ($p < 0.0001$) para explicar el comportamiento de la firmeza, consistencia, cohesividad e índice de viscosidad de las masas; demostrando que existen efectos significativos en la interacción de los ingredientes experimentados (harina de quinua, agua y goma xantana). Así mismo, la prueba de falta de ajuste del modelo (*lack of fit*) fue no significativa ($p > 0,05$) para todas las variables, lo cual demuestra que el orden del modelo

seleccionado fue correcto. También se pudo verificar el ajuste del modelo cuadrático seleccionado mediante los coeficientes de determinación (R^2 , R^2 ajustado y R^2 predicho), los cuales variaron entre 0,994 – 0,999. Por lo tanto, se puede decir que el 99% de la variación observada en las propiedades texturales de las masas con quinua (firmeza, consistencia, cohesividad e índice de viscosidad) es explicada por el modelo cuadrático y la calidad del ajuste fue satisfactorio.

Las ecuaciones matemáticas que describen el comportamiento de las variables, así como de sus interacciones se muestran en la Tabla 28. En esta Tabla se puede observar que los variables por sí solas (HQ: Harina de quinua, A: Agua; GX: Goma xantana) así como las interacciones HQ: A; HQ: GX y A: GX fueron significativas, por lo tanto, fueron contempladas en las ecuaciones de predicción.

Con la finalidad de evaluar la influencia de los variables (HQ, A y GX) en las propiedades texturales se hizo uso de los gráficos de trazas (Cox) (Figura 21), los cuales muestran cual es el comportamiento de la firmeza, consistencia, cohesividad e índice de viscosidad, cuando se disminuye o aumenta el contenido de cada ingrediente. El efecto más pronunciado en las variables respuestas fue ocasionado por el agua.

En la Figura 21, se evidencia que el incremento de la firmeza y consistencia de la masa se logra a medida que disminuye el agua en la masa; de la misma forma, la cohesividad e índice de viscosidad se ven afectadas por el agua, ya que dichos valores disminuyeron a medida que se incrementó el agua en la masa. Un efecto mediano en las propiedades texturales en la masa, fue el que ocasionó la harina de quinua. Según se muestra en los gráficos de trazas (Figura 21), la firmeza y la consistencia de la masa aumentaron en menor medida cuando se incrementa el porcentaje de harina de quinua en la masa. Sin embargo, fue la goma xantana la que evidenció el menor efecto en las propiedades texturales de la masa.

Diversas investigaciones han puesto de manifiesto que el contenido apropiado de agua en las masas libres de gluten es crucial para la correcta gelatinización de los almidones e hidratación de los ingredientes, influyendo en la calidad del pan y el tiempo de vida útil del producto terminado, en términos de suavidad de la miga y crocantez de la corteza (Mancebo *et al.*, 2015b; Cappa *et al.*, 2013). Sin embargo, si se utiliza excesivamente en las masas, esta

se puede sobreexpandir durante el horneado y producir el colapso de la estructura o alveolos demasiados grandes (de la Hera *et al.*, 2014).

Tabla 24: Propiedades texturales de masas libres de gluten a base de almidón de papa con diferentes proporciones de harina de quinua, agua y goma xantana

Mezcla	Proporción de ingredientes			Propiedades texturales de las masas libres de gluten			
	Harina de quinua (%)	Agua (% Base Almidón / Harina)	Goma xantana (% Base Almidón / Harina)	Firmeza (N)	Consistencia (N.s)	Cohesividad (N)	Índice de viscosidad (N.s)
1	30,00	90,00	2,00	10,76 ± 0,2	159,44 ± 2,1	8,84 ± 0,1	98,56 ± 4,5
2	10,75	110,00	1,25	2,47 ± 0,0	36,48 ± 0,4	1,73 ± 0,1	23,97 ± 0,9
3	10,00	110,00	2,00	4,21 ± 0,0	62,36 ± 0,9	3,24 ± 0,1	40,13 ± 0,1
4	50,00	70,00	2,00	42,87 ± 1,6	588,34 ± 14,1	30,29 ± 0,6	277,67 ± 44,1
5	50,00	71,50	0,50	8,04 ± 0,6	113,02 ± 4,6	6,99 ± 0,5	74,25 ± 2,4
6	40,19	80,94	0,88	7,11 ± 0,3	102,55 ± 3,0	6,12 ± 0,3	66,84 ± 2,8
7	30,00	90,00	2,00	10,85 ± 0,4	159,27 ± 2,1	8,66 ± 0,4	99,11 ± 2,8
8	30,38	90,38	1,25	5,98 ± 0,1	86,46 ± 2,1	5,00 ± 0,0	54,90 ± 1,8
9	20,19	100,19	1,63	5,76 ± 0,2	78,39 ± 3,6	4,26 ± 0,3	47,54 ± 6,9
10	50,00	71,50	0,50	8,52 ± 0,4	120,73 ± 8,8	7,49 ± 0,4	78,34 ± 7,1
11	11,50	110,00	0,50	0,82 ± 0,0	12,56 ± 0,4	0,41 ± 0,0	6,59 ± 0,4
12	50,00	70,75	1,25	23,87 ± 0,8	333,48 ± 24,7	21,02 ± 2,4	190,46 ± 15,5
13	11,50	110,00	0,50	0,85 ± 0,0	13,18 ± 0,7	0,40 ± 0,0	6,05 ± 1,4
14	50,00	70,00	2,00	48,62 ± 2,8	679,37 ± 47,4	32,89 ± 1,5	327,61 ± 6,1
15	10,00	110,00	2,00	4,40 ± 0,3	65,20 ± 1,8	3,39 ± 0,2	40,63 ± 0,9
16	40,19	80,19	1,63	15,10 ± 0,2	221,82 ± 2,1	12,93 ± 0,4	136,13 ± 8,5

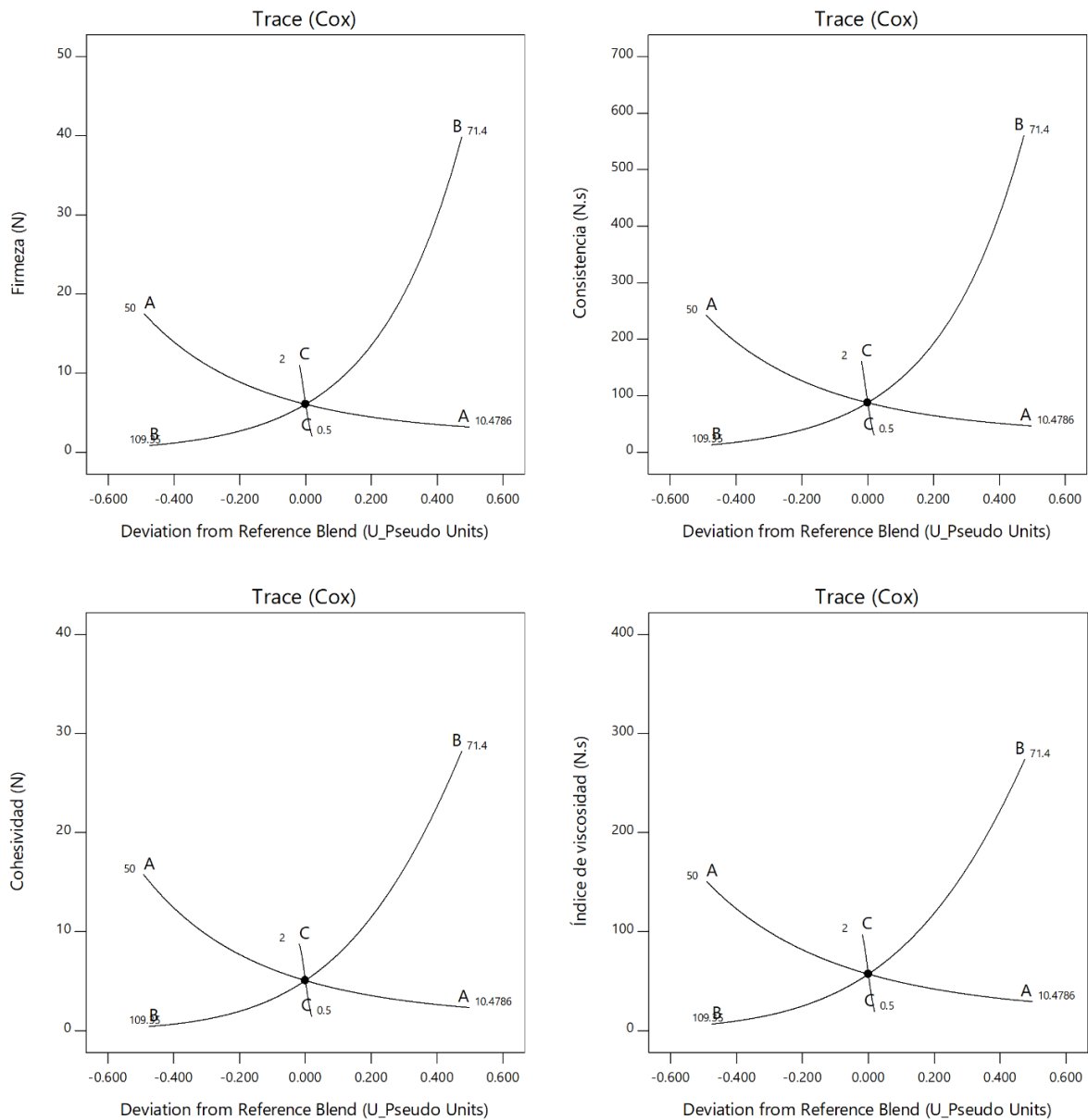


Figura 21: Gráficos de traza (Cox) para evaluar la influencia de los ingredientes (A: Harina de quinua; B: Agua, C: Goma xantana) en los parámetros de textura en las formulaciones de masas libres de gluten

La técnica de *Back Extrusion* ha sido utilizada para ajustar el nivel de agua de las formulaciones de panes libres de gluten, como en la investigación realizada por Korus *et al.*, (2009) quienes evaluaron el efecto de la inclusión de almidones resistentes de maíz y yuca sobre las propiedades reológicas de las masas y la calidad del producto terminado. Dichos autores estandarizaron el nivel de agua (103 – 117% peso de almidones), utilizada en las formulaciones, cuando la firm

eza de la masa fue de 400 gf o 3,9 N. Coincidentemente este valor de firmeza de la masa fue similar al obtenido en la tercera y cuarta parte de esta investigación, y dicha masa fue seleccionada como masa control, con la finalidad de imitar sus propiedades texturales utilizando los diseños de optimización. De la misma forma Ziobro *et al.*, (2013a), evaluaron los efectos de la inclusión de inulina de diferentes grados de polimerización en masas libres de gluten, ajustando el nivel de agua (119 – 130% peso de almidón) para que las formulaciones proporcionen la misma firmeza (3,9 N).

Con respecto a la influencia de la harina de quinua sobre las propiedades texturales de la masa, diversas investigaciones han puesto de manifiesto que el incremento de la harina de quinua produce un aumento de la consistencia de la masa, debido al aumento de la capacidad de absorción de agua de la masa producido por el incremento de la fracción de fibra dietaria en el sistema (Föste *et al.*, 2014; Turkut *et al.*, 2016). Sin embargo, también se ha reportado que los demás ingredientes como el contenido de lípidos (monoglicéridos, ácidos grasos libres) y bajo contenido de amilosa de su almidón pueden contribuir como emulsionantes naturales en la masa produciendo panes con migas suaves (Alvarez-Jubete *et al.*, 2010a).

En la Figura 22 se muestra el efecto de la concentración mínima (0.5%) y máxima (2%) de la goma xantana sobre la consistencia de las diferentes mezclas de harina de quinua y agua. En esta figura se puede observar que la inclusión de 0,5% de goma xantana tuvo un menor efecto en la consistencia de las masas; mientras que la inclusión de 2% de goma xantana produjo un incremento de la consistencia de la masa entre 5 a 6 veces.

Este efecto está referido a la naturaleza química de la goma xantana, ya que esta goma es un hidrocoloide aniónico con dos grupos carboxilo cargados negativamente en sus cadenas laterales que le permite interactuar con el almidón y el agua mediante enlaces de hidrógeno. Se conoce que los grupos hidroxilos de la columna vertebral de la goma xantana se asocian con el agua y el almidón así como con otras cadenas de goma xantana formando un gel rígido a altas concentraciones (Crockett *et al.*, 2011).

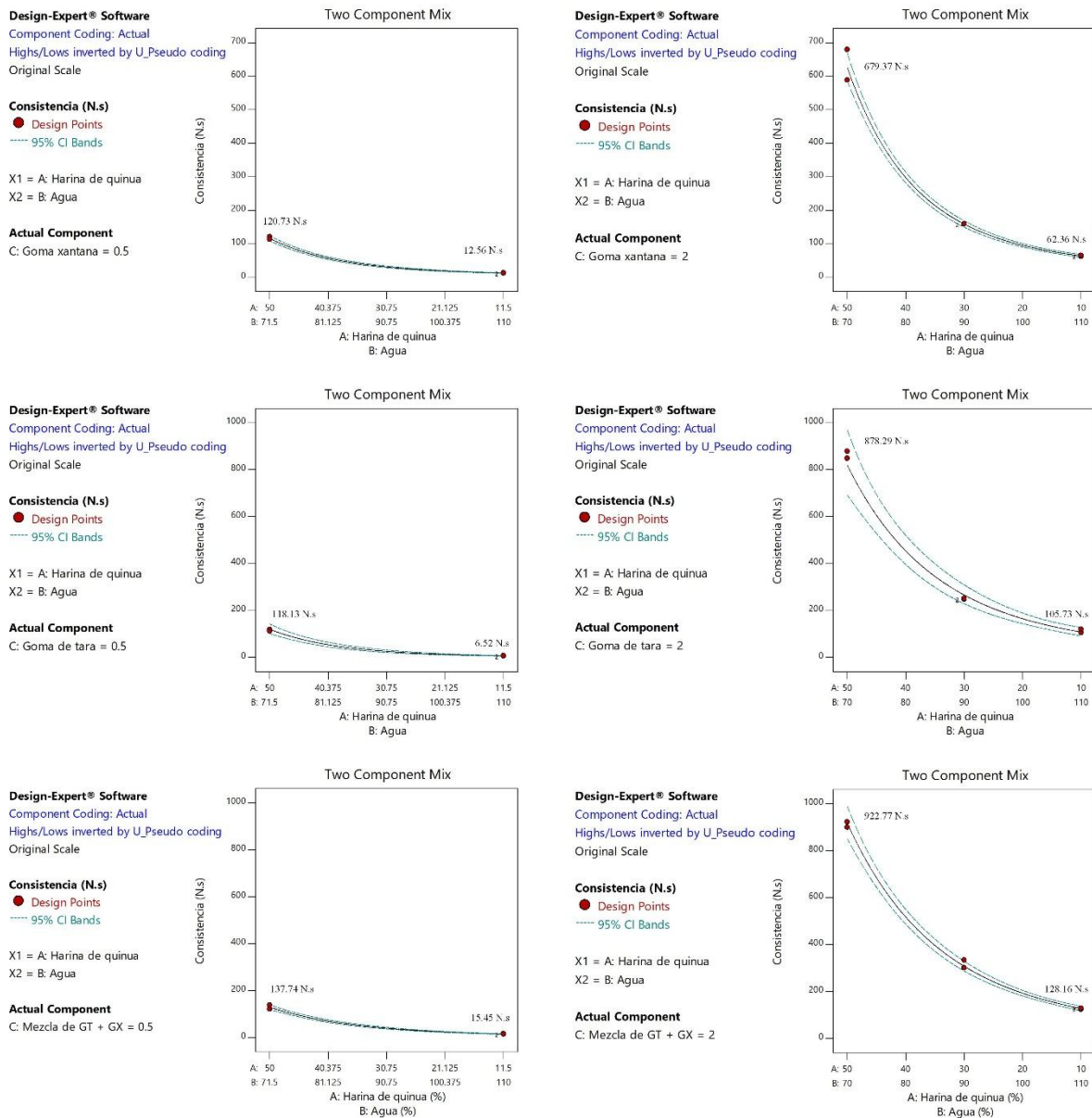


Figura 22: Efecto de la concentración mínima (0.5%) y máxima (2%) de la goma xantana, goma de tara y mezcla de ambas gomas en la consistencia de las masas cuando se mezclan la harina de quinua y agua

De esta figura también se puede observar que la consistencia de la masa con elevado contenido de harina de quinua (50%), 71,5% de agua y 0,5% de goma xantana fue casi 6 veces menor que cuando se adiciona 2% de goma xantana. Este resultado demuestra que los componentes de la quinua como los lípidos y las proteínas funcionan como emulsionantes naturales contribuyendo en disminuir la consistencia de la masa (Alvarez-Jubete *et al.*, 2010a). Así mismo, debido a las propiedades de los gránulos de almidón de la quinua, que

son pequeños y con bajo contenido de amilosa (8-9%) y tienen menor capacidad de retención de agua (Steffolani *et al.*, 2013), por lo que dejan agua libre en el sistema y provocan que la masa experimente menor consistencia.

4.4.2. Propiedades texturales de las masas libres de gluten con harina de quinua y goma de tara

Los valores promedio y la desviación estándar de las propiedades texturales de las masas con diferentes concentraciones de harina de quinua, agua y goma tara se muestran en la Tabla 25. El análisis de los valores promedios muestra que la masa con menor firmeza (0,42 N), consistencia (6,52 N.s), cohesividad (0,17 N) e índice de viscosidad (1,70 N.s) fue lograda en la mezcla que contenía 11,5% de harina de quinua, 110% de agua y 0,5% de goma de tara. Mientras que la masa con los máximos valores de firmeza (60,96 N), consistencia (878,29 N.s), cohesividad (52,94 N) e índice de viscosidad (533,69 N.s) fue lograda en la mezcla que contenía 50% de harina de quinua, 70% de agua y 2% de goma de tara.

En comparación con las masas libres de gluten con goma xantana, la goma de tara produjo menores valores de propiedades texturales cuando se utilizó la mínima concentración (0,5%), pero produjo mayores valores de propiedades texturales cuando se utilizó la máxima concentración. Esto podría estar relacionado con la naturaleza química de la goma de tara, ya que es una molécula neutra que es parcialmente soluble en agua fría (Fox, 1992; Lee *et al.*, 2017).

Tabla 25: Propiedades texturales de masas libres de gluten a base de almidón de papa con diferentes proporciones de harina de quinua, agua y goma de tara

Mezcla	Proporción de ingredientes			Propiedades texturales de las masas libres de gluten			
	Harina de quinua (%)	Agua (% Base Almidón / Harina)	Goma de tara (% Base Almidón / Harina)	Firmeza (N)	Consistencia (N.s)	Cohesividad (N)	Índice de viscosidad (N.s)
1	10,00	110,00	2,00	7,12 ± 0,5	105,73 ± 7,3	6,12 ± 0,3	64,29 ± 3,8
2	30,38	90,38	1,25	7,74 ± 1,1	113,45 ± 12,9	6,87 ± 0,7	74,97 ± 4,9
3	10,00	110,00	2,00	8,46 ± 0,6	119,60 ± 1,9	6,77 ± 0,3	69,40 ± 3,6
4	30,00	90,00	2,00	16,70 ± 0,9	248,24 ± 5,7	15,73 ± 0,5	160,62 ± 5,7
5	30,00	90,00	2,00	17,39 ± 0,5	250,80 ± 1,7	16,01 ± 0,2	159,46 ± 7,4
6	50,00	71,50	0,50	8,09 ± 0,4	118,13 ± 4,2	7,19 ± 0,6	71,62 ± 3,7
7	50,00	71,50	0,50	7,80 ± 0,2	112,03 ± 3,7	7,59 ± 1,2	76,01 ± 0,8
8	20,19	100,19	1,63	6,63 ± 0,01	99,14 ± 1,9	7,21 ± 2,3	68,68 ± 2,1
9	11,50	110,00	0,50	0,44 ± 0,0	6,84 ± 0,1	0,17 ± 0,0	1,68 ± 0,2
10	40,19	80,94	0,88	9,89 ± 0,0	147,79 ± 1,1	8,91 ± 0,2	100,69 ± 5,2
11	10,75	110,00	1,25	2,33 ± 0,1	35,99 ± 0,9	1,71 ± 0,0	23,98 ± 0,4
12	11,50	110,00	0,50	0,42 ± 0,0	6,52 ± 0,4	0,17 ± 0,0	1,70 ± 0,2
13	50,00	70,00	2,00	59,13 ± 2,7	848,38 ± 44,0	51,45 ± 2,1	510,63 ± 63,9
14	50,00	70,75	1,25	26,60 ± 1,2	366,29 ± 25,4	26,34 ± 2,6	220,58 ± 15,6
15	40,19	80,19	1,63	21,36 ± 0,2	307,71 ± 4,9	19,45 ± 0,3	225,87 ± 4,7
16	50,00	70,00	2,00	60,96 ± 0,7	878,29 ± 7,8	52,94 ± 0,5	533,69 ± 41,1

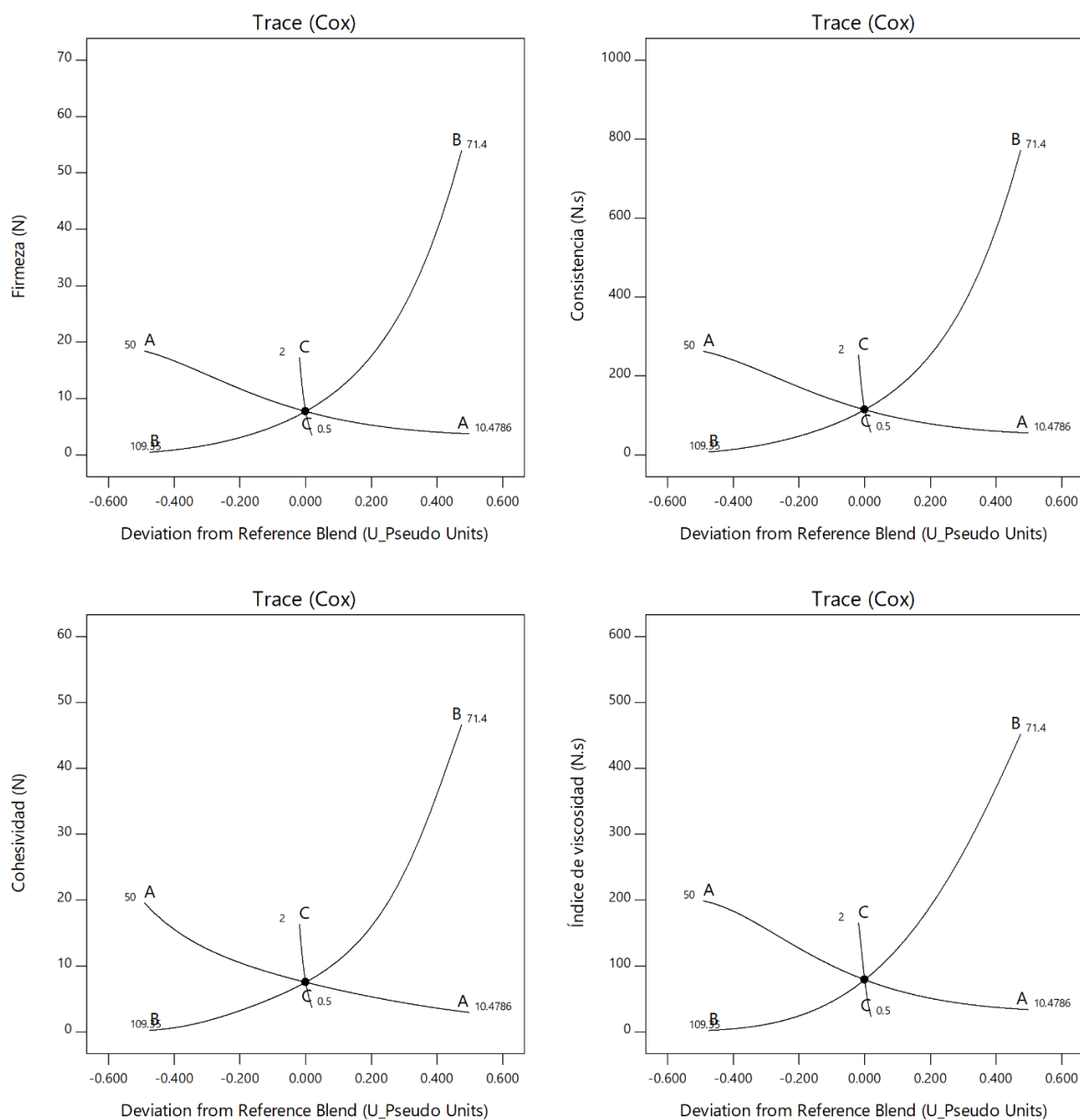


Figura 23: Gráficos de trazas (Cox) para evaluar la influencia de los ingredientes (A: Harina de quinua; B: Agua, C: Goma de tara) en los parámetros de textura en las formulaciones de masas libres de gluten

Para modelar el comportamiento de las propiedades texturales de las masas con harina de quinua y goma de tara se tuvo que realizar una transformación matemática de los resultados en logaritmo natural, según lo sugerido por el propio programa “*Design Expert 11,0v*”, con la finalidad de acortar el rango de las respuestas, para poder ajustar a un modelo matemático apropiado. De acuerdo con la Tabla 27, donde se muestra el resumen del análisis de varianza del modelo, el modelo cuadrático fue significativo ($p < 0,0001$) para explicar el comportamiento de la firmeza, consistencia, cohesividad e índice de viscosidad de las masas;

demostrando que existen efectos significativos en la interacción de los ingredientes experimentados (harina de quinua, agua y goma de tara). Los estadísticos de verificación de ajuste del modelo (R^2 , R^2 ajustado y R^2 predicho) estuvieron en los rangos de 0,97- 0,98, demostrando que el 97% de la variación observada en las propiedades texturales (firmeza, consistencia, cohesividad e índice de viscosidad) de las masas con quinua y goma de tara pudieron ser explicadas por el modelo cuadrático; sin embargo, la prueba de falta de ajuste del modelo (*lack of fit*), para todas las propiedades texturales, fue significativa ($p < 0,05$) lo cual indica que puede existir un modelo de mayor orden que pueda explicar mejor el comportamiento de las respuestas (Granato y de Araújo Calado, 2013; Myers *et al.*, 2016).

Sin embargo, se debe resaltar que, si se elige un modelo de orden superior, con la finalidad de que explique mejor el comportamiento de las respuestas, se puede incurrir en un error de interpretación de las variables, ya que pueden aparecer términos complejos de interacción de los ingredientes que no podrán ser explicados en la realidad. En una reciente publicación Encina-Zelada *et al.*, (2019) presentan un caso similar, en donde el comportamiento de las propiedades texturales de las masas libres de gluten con mezclas de goma xantana, HPMC y goma guar, no pudieron ser explicadas por el modelo cuadrático, sin embargo, el modelo es considerado válido para la optimización de las variables.

Las ecuaciones matemáticas que describen el comportamiento de las variables, así como de sus interacciones se muestran en la Tabla 28. En esta tabla se puede observar que los variables por sí solas (HQ: Harina de quinua, A: Agua; GT: Goma de tara) fueron significativas y por lo tanto son contempladas en las ecuaciones de predicción; sin embargo, las interacciones que fueron significativas, para todas las propiedades texturales, solamente fueron HQ:GT y A:GT.

Con la finalidad de evaluar la influencia de los variables (HQ, A y GT) sobre las propiedades texturales se utilizaron los gráficos de trazas (Cox) (Figura 23), los cuales muestran cual es el comportamiento de la firmeza, consistencia, cohesividad e índice de viscosidad, cuando se disminuye o aumenta el contenido de cada ingrediente. De la misma forma que el efecto surgido en el experimento con harina de quinua y goma xantana, el agua produjo el más pronunciado efecto en las propiedades texturales de las masas; disminuyendo los valores de firmeza, consistencia cohesividad e índice de viscosidad de la masa a medida que se incrementó el contenido de agua. De la misma forma, que el anterior experimento, la harina

de quinua ocasionó un efecto mediano en las propiedades texturales y la goma de tara evidenció el menor efecto en las propiedades texturales de la masa.

En la Figura 22 se presenta el efecto de la concentración mínima (0,5%) y máxima (2%) de la goma de tara sobre la consistencia de las diferentes mezclas de harina de quinua y agua. En la mencionada figura se puede observar que la inclusión de 0,5% de goma de tara tuvo un menor efecto en la consistencia de las masas con diferentes concentraciones de harina de quinua y agua; mientras que la inclusión de 2% de goma de tara produjo un incremento de la consistencia de la masa entre 5 a 6 veces. Este efecto puede estar referido a la estructura química de la goma, la cual consiste en una cadena lineal de unidades de β - (1 \rightarrow 4) D-manosa unida a cadenas laterales de unidades de α - (1 \rightarrow 6) galactosa (M:G = 3:1) (Wüstenberg, 2014). De acuerdo con Fox (1992), la D-manosa difiere de la D-glucosa solo en la estereoquímica en C-2. Por lo tanto, no es sorprendente encontrar que β - (1 \rightarrow 4) D-manano sea un material fibroso insoluble similar a su análogo de D-glucosa en la celulosa.

Este comportamiento se atribuye a la formación de regiones cristalinas estables en el sólido cuando las cadenas lineales se encuentran muy cerca. La inclusión de cadenas laterales estropea esta cristalinidad y, por lo tanto, promueve la penetración del agua y mejora la solubilidad. Por lo tanto, las gomas comerciales que muestran altas relaciones de sustitución, como el guar (M:G = 2:1), tienden a hidratarse completamente en agua fría, mientras que las gomas con sustitución limitada, como la goma de algarroba (M:G = 4:1), se hidratan completamente solo en agua caliente.

De esta figura también se puede observar que la consistencia de la masa con elevado contenido de harina de quinua (50%), 71,5% de agua y 0,5% de goma de tara fue casi 7 veces menor que cuando se adiciona 2% de goma de dicha goma, con lo cual se puede interpretar que la elevada concentración de goma de tara en el sistema tiene efectos significativos ($p < 0,05$) en las propiedades texturales, incrementando la textura de la masa.

4.4.3. Propiedades texturales de las masas libres de gluten con harina de quinua y mezcla de goma xantana con goma de tara (1:1)

Los valores promedio y la desviación estándar de las propiedades texturales de las masas con diferentes concentraciones de harina de quinua, agua y mezcla de gomas se muestran en

la Tabla 26. El análisis de los valores promedios muestra que la masa con menor firmeza (0,90 N), consistencia (14,15 N.s), cohesividad (0,41 N) e índice de viscosidad (6,53 N.s) fue lograda en la mezcla que contenía 11,5% de harina de quinua, 110% de agua y 0,5% de mezcla de gomas. Mientras que la masa con mayores valores de firmeza (64,64 N), consistencia (922,77 N.s), cohesividad (50,89 N) e índice de viscosidad (425,46 N.s) fue lograda en la mezcla que contenía 50% de harina de quinua, 70% de agua y 2% de la mezcla de gomas.

En comparación con las masas de quinua con goma xantana y goma de tara, la mezcla con 2% de ambas gomas produjo los mayores valores de propiedades texturales en las masas, evidenciando sinergismo marcado, cuando se mezclan ambas gomas en la concentración máxima de estudio. Diversas investigaciones han puesto de manifiesto el efecto sinérgico que tiene la goma xantana con la goma guar (Sumnu *et al.*, 2009; Demirkesen *et al.*, 2010) o con la goma de algarroba (Demirkesen *et al.*, 2010) en masas libres de gluten; sin embargo, pocas investigaciones han sido realizadas para el caso de la goma de tara. El efecto sinérgico de la goma xantana con los galactomananos está referido a la relación manosa (M) : galactosa (G). Se conoce que la goma guar, que tiene una relación manosa a galactosa de alrededor de 2:1, exhibe una sinergia débil con la goma xantana, mientras que la goma de algarroba, con una relación de aproximadamente 4:1, reacciona fuertemente con la goma xantana (Urlacher y Noble, 1997). De acuerdo con Renou *et al.* (2013) el efecto sinérgico que presenta la goma xantana con los galactomananos es debido a las uniones intermoleculares entre la región lisa de los galactomananos con los grupos acetatos y piruvatos de la goma xantana, requiriéndose una cantidad mínima de grupos piruvato (35%) para permitir las interacciones.

De forma similar que los anteriores experimentos, para modelar el comportamiento de las respuestas (propiedades texturales), se tuvo que realizar una transformación matemática de los resultados en logaritmo natural. De acuerdo con la Tabla 27, donde se muestra el resumen del análisis de varianza del modelo, el modelo cuadrático fue significativo ($p < 0,0001$) para explicar el comportamiento de la firmeza, consistencia, cohesividad e índice de viscosidad de las masas; demostrando que existen efectos significativos en la interacción de los ingredientes experimentados (harina de quinua, agua y mezcla de gomas). Así mismo, la prueba de falta de ajuste del modelo (*lack of fit*) fue no significativa ($p > 0,05$) para todas las variables, lo cual demuestra que el orden del modelo seleccionado fue correcto. También se pudo verificar el ajuste del modelo cuadrático seleccionado mediante los coeficientes de

determinación (R^2 , R^2 ajustado y R^2 predicho) los cuales variaron entre 0,995 – 0,999. Por lo tanto, se puede decir que el 99% de la variación observada en las propiedades texturales de las masas con quinua (firmeza, consistencia, cohesividad e índice de viscosidad) es explicada por el modelo cuadrático y la calidad del ajuste fue satisfactorio. Las ecuaciones matemáticas que describen el comportamiento de las variables, así como de sus interacciones se muestran en Tabla 28. En esta tabla se puede observar que los variables por sí solas (HQ: Harina de quinua, A: Agua; GM: Mezcla de gomas) así como las interacciones HQ: A; HQ: MG y A: MG fueron significativas, por lo tanto, fueron contempladas en las ecuaciones de predicción.

Según los gráficos de trazas (Cox) (Figura 24), donde se evalúa la influencia de la HQ, A y MG sobre las propiedades texturales de la masa, se muestra que el agua produjo el mayor efecto en las propiedades texturales, disminuyendo la firmeza, la consistencia, la cohesividad y el índice de viscosidad a medida que se aumentó su contenido de agua en la masa. De la misma forma, que los dos anteriores experimentos, la harina de quinua ocasionó un efecto mediano en las propiedades texturales y la mezcla de las gomas produjeron un efecto lineal en las propiedades texturales, pero se pudo evidenciar el efecto sinérgico que tiene estas gomas cuando se mezclan, ya que todas las propiedades texturales fueron mayores, cuando se comparan con las masas que tienen la misma composición.

En la Figura 22 se presenta el efecto de la concentración mínima (0,5%) y máxima (2%) de la mezcla de gomas sobre la consistencia de las diferentes mezclas de harina de quinua y agua. En esta figura se puede observar que la inclusión de 0,5% de mezcla de gomas tuvo un menor efecto en la consistencia de las masas con diferentes concentraciones de harina de quinua y agua; mientras que la inclusión de 2% de la mezcla de las gomas produjo un incremento de la consistencia de la masa entre 6 a 9 veces.

Comparando la consistencia de las masas con la concentración máxima de las gomas (goma xantana, goma de tara y mezcla de gomas) (2%) y concentración máxima de harina (50%) y mínima de agua (70%) se puede apreciar que la inclusión de la mezcla de gomas produce masas más consistentes, seguidos por las masas con goma de tara y goma xantana. Esto demuestra el efecto sinérgico entre las dos gomas, lo cual podría ser ventajoso para aumentar la consistencia de las masas y que puedan retener mejor el gas producido durante el proceso de fermentación.

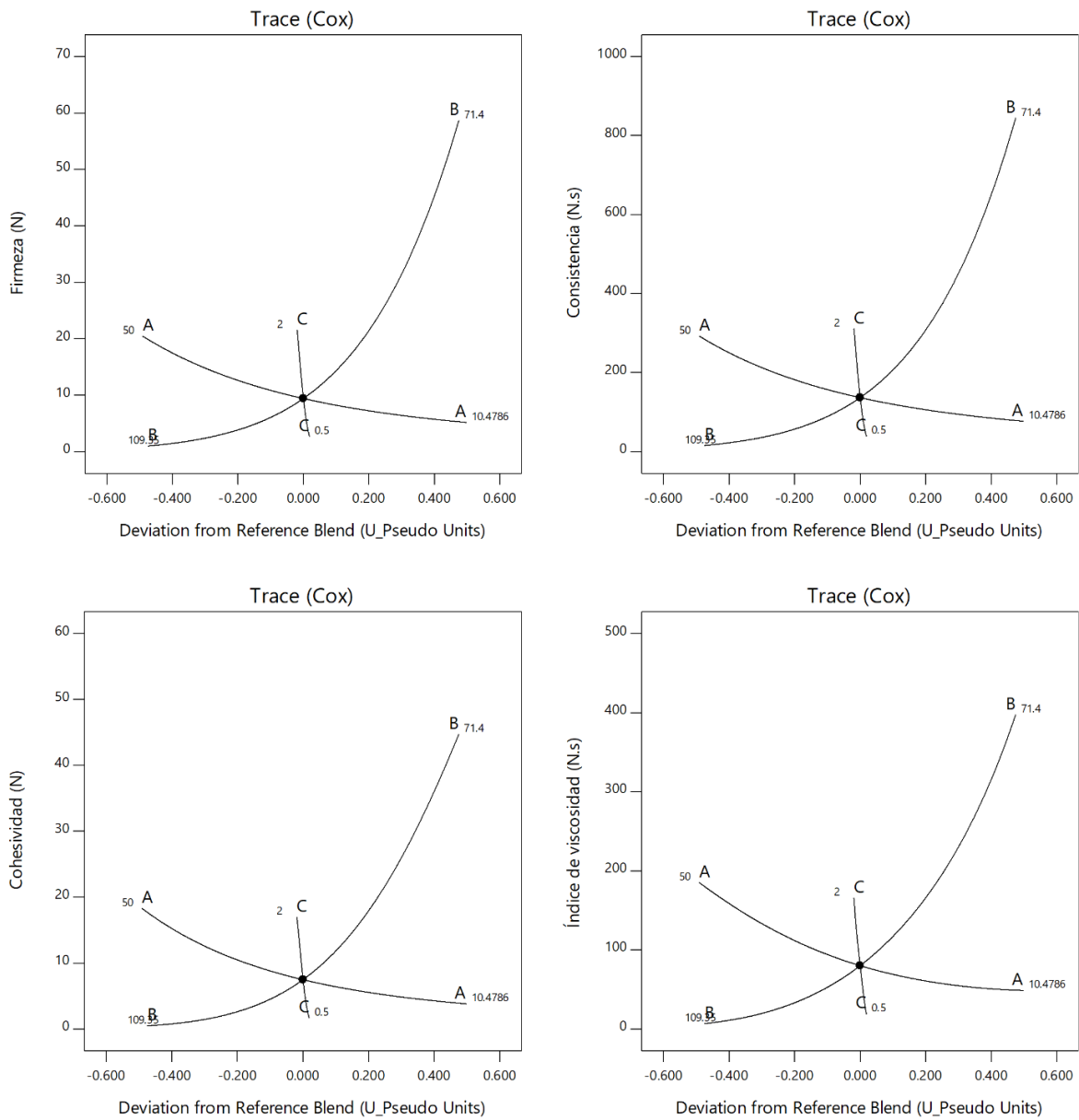


Figura 24: Gráficos de trazas (Cox) para evaluar la influencia de los ingredientes (A: Harina de quinua; B: Agua, C: Mezcla de goma xantana y goma de tara, 1:1) en los parámetros de textura en las formulaciones de masas libres de gluten

Tabla 26: Propiedades texturales de masas libres de gluten a base de almidón de papa con diferentes proporciones de harina de quinua, agua y mezcla de goma (xantana: tara, 1:1)

Mezcla	Proporción de ingredientes			Propiedades texturales de las masas libres de gluten			
	Harina de quinua (%)	Agua (% Base Almidón / Harina)	Mezcla de gomas (% Base Almidón / Harina)	Firmeza (N)	Consistencia (N.s)	Cohesividad (N)	Índice de viscosidad (N.s)
1	40,19	80,19	1,63	24,59 ± 0,9	355,71 ± 22,8	19,65 ± 0,6	194,22 ± 9,5
2	30,00	90,00	2,00	20,79 ± 0,7	301,17 ± 18,0	17,45 ± 2,2	159,06 ± 9,2
3	50,00	70,00	2,00	64,64 ± 1,8	922,77 ± 33,8	50,89 ± 5,4	425,46 ± 53,6
4	50,00	70,75	1,25	30,26 ± 0,5	433,52 ± 11,4	25,65 ± 2,4	238,70 ± 11,7
5	20,19	100,19	1,63	8,88 ± 0,4	126,97 ± 2,1	7,01 ± 0,5	71,28 ± 4,2
6	40,19	80,94	0,88	9,27 ± 0,3	135,56 ± 4,2	7,64 ± 0,3	84,63 ± 4,1
7	50,00	70,00	2,00	62,52 ± 1,9	899,68 ± 28,6	47,46 ± 1,3	413,28 ± 38,5
8	10,00	110,00	2,00	8,71 ± 0,2	128,19 ± 3,3	6,69 ± 0,1	76,15 ± 1,5
9	10,75	110,00	1,25	3,71 ± 0,3	56,13 ± 4,4	2,70 ± 0,2	35,31 ± 3,3
10	10,00	110,00	2,00	8,39 ± 0,2	123,95 ± 8,6	6,53 ± 0,4	76,67 ± 6,4
11	11,50	110,00	0,50	0,90 ± 0,0	14,19 ± 0,8	0,41 ± 0,0	6,32 ± 0,0
12	30,00	90,00	2,00	22,95 ± 0,6	333,82 ± 9,6	17,28 ± 0,8	168,70 ± 10,2
13	50,00	71,50	0,50	8,57 ± 0,1	121,13 ± 0,7	7,19 ± 0,2	79,14 ± 1,8
14	30,38	90,38	1,25	9,41 ± 0,4	135,03 ± 9,1	7,45 ± 0,3	82,53 ± 6,1
15	11,50	110,00	0,50	1,00 ± 0,1	15,45 ± 0,5	0,45 ± 0,0	6,76 ± 0,5
16	50,00	71,50	0,50	9,46 ± 0,2	137,74 ± 4,2	7,85 ± 0,2	86,91 ± 2,5

Tabla 27: Resumen del análisis de varianza y ajuste del modelo matemático seleccionado para explicar el comportamiento de las propiedades texturales de las masas libres de gluten con quinua

Experimentos	Variable respuesta	ANOVA				Ajuste del modelo			
		Modelo	F-value	p-value	Lack of Fit (p-value)	R ²	R ² ajustado	R ² predicho	Adeq Precision
Goma xantana	Firmeza	Cuadrático	1159,38	<0,0001	0,219	0,998	0,997	0,996	109,811
	Consistencia	Cuadrático	1863,59	<0,0001	0,825	0,999	0,998	0,997	139,304
	Cohesividad	Cuadrático	3010,86	< 0,0001	0,408	0,999	0,999	0,998	174,512
	Índice de viscosidad	Cuadrático	986,05	< 0,0001	0,477	0,998	0,997	0,994	100,449
Masa libre de gluten con almidón de papa y harina de quinua	Firmeza	Cuadrático	482,68	< 0,0001	0,036	0,996	0,994	0,991	71,132
	Consistencia	Cuadrático	439,79	< 0,0001	0,009	0,995	0,993	0,990	67,874
	Cohesividad	Cuadrático	611,44	< 0,0001	0,003	0,997	0,995	0,993	78,429
	Índice de viscosidad	Cuadrático	240,77	< 0,0001	0,000	0,992	0,988	0,978	49,086
Mezcla de gomas	Firmeza	Cuadrático	2000,98	< 0,0001	0,849	0,999	0,999	0,997	145,528
	Consistencia	Cuadrático	1613,22	< 0,0001	0,790	0,999	0,998	0,997	130,833
	Cohesividad	Cuadrático	1387,37	< 0,0001	0,192	0,999	0,998	0,996	120,080
	Índice de viscosidad	Cuadrático	961,54	< 0,0001	0,074	0,998	0,997	0,995	100,150

Tabla 28: Modelos polinómicos predichos que muestran el efecto de cada ingrediente (HQ: harina de quinua; A: Agua; GX: Goma xantana; GT: Goma de tara; MG: Mezcla de gomas) y sus interacciones significativas sobre las propiedades texturales de las masas

Experimentos	Parámetros	Modelo matemático predictivo*
Masa libre de gluten con almidón de papa y harina de quinua	Firmeza (N)	$\text{Ln (Firmeza)} = 1,48 \text{ (HQ)} + 3,8 \text{ (A)} - 703,38 \text{ (GX)} - 1,01 \text{ (HQ)(A)} + 686,61 \text{ (HQ)(GX)} + 687,81 \text{ (A)(GX)}$
	Goma xantana	
	Consistencia (N.s)	$\text{Ln (Consistencia)} = 4,17 \text{ (HQ)} + 6,44 \text{ (A)} - 637,86 \text{ (GX)} - 0,94 \text{ (HQ)(A)} + 622,54 \text{ (HQ)(GX)} + 622,83 \text{ (A)(GX)}$
	Cohesividad (N)	$\text{Ln (Cohesividad)} = 1,22 \text{ (HQ)} + 3,44 \text{ (A)} - 1012,52 \text{ (GX)} - 0,68 \text{ (HQ)(A)} + 994,61 \text{ (HQ)(GX)} + 1014,90 \text{ (A)(GX)}$
	Índice de viscosidad (N.s)	$\text{Ln (Índice de viscosidad)} = 3,73 \text{ (HQ)} + 5,70 \text{ (A)} - 810,28 \text{ (GX)} - 0,59 \text{ (HQ)(A)} + 794,13 \text{ (HQ)(GX)} + 809,54 \text{ (A)(GX)}$
Masa libre de gluten con almidón de papa y harina de quinua	Firmeza (N)	$\text{Ln (Firmeza)} = 2,00 \text{ (HQ)} + 4,05 \text{ (A)} - 857,42 \text{ (GT)} + 814,68 \text{ (HQ)(GT)} + 841,56 \text{ (A)(GT)}$
	Goma de tara	
	Consistencia (N.s)	$\text{Ln (Consistencia)} = 4,69 \text{ (HQ)} + 6,70 \text{ (A)} - 836,63 \text{ (GT)} + 796,61 \text{ (HQ)(GT)} + 822,01 \text{ (A)(GT)}$
	Cohesividad (N)	$\text{Ln (Cohesividad)} = 1,86 \text{ (HQ)} + 3,87 \text{ (A)} - 1353,15 \text{ (GT)} + 1307,67 \text{ (HQ)(GT)} + 1358,34 \text{ (A)(GT)}$
	Índice de viscosidad (N.s)	$\text{Ln (Índice de viscosidad)} = 4,22 \text{ (HQ)} + 6,14 \text{ (A)} - 1562,60 \text{ (GT)} + 1527,80 \text{ (HQ)(GT)} + 1578,40 \text{ (A)(GT)}$
Masa libre de gluten con almidón de papa y harina de quinua	Firmeza (N)	$\text{Ln (Firmeza)} = 2,16 \text{ (HQ)} + 4,15 \text{ (A)} - 651,03 \text{ (MG)} - 0,3888 \text{ (HQ)(A)} + 617,57 \text{ (HQ)(MG)} + 626,46 \text{ (A)(MG)}$
	Mezcla de gomas	
	Consistencia (N.s)	$\text{Ln (Consistencia)} = 4,85 \text{ (HQ)} + 6,82 \text{ (A)} - 623,38 \text{ (MG)} - 0,4241 \text{ (HQ)(A)} + 593,25 \text{ (HQ)(MG)} + 600,51 \text{ (A)(MG)}$
	Cohesividad (N)	$\text{Ln (Cohesividad)} = 1,92 \text{ (HQ)} + 3,88 \text{ (A)} - 984,69 \text{ (MG)} + 949,22 \text{ (HQ)(MG)} + 975,14 \text{ (A)(MG)}$
	Índice de viscosidad (N.s)	$\text{Ln (Índice de viscosidad)} = 4,35 \text{ (HQ)} + 6,02 \text{ (A)} - 936,01 \text{ (MG)} - 0,4461 \text{ (HQ)(A)} + 909,2 \text{ (HQ)(MG)} + 934,08 \text{ (A)(MG)}$

4.4.4. Optimización de las propiedades texturales de las masas con harina de quinua y diferentes gomas

La optimización de las propiedades texturales de las masas con harina de quinua y diferentes gomas se realizó utilizando el enfoque de la función de deseabilidad, donde el objetivo de la optimización fue determinar la formulación que imite las propiedades texturales de la masa control (100% almidón de papa, 0,5% de goma xantana y 75% de agua), las cuales fueron: $3,69 \pm 0,2$ N de firmeza; $56,46 \pm 3,7$ N.s de consistencia; $2,70 \pm 0,2$ N de cohesividad y $36,18 \pm 2,1$ N.s de índice de viscosidad.

Los valores de las propiedades texturales de la masa control fueron ligeramente superiores a los reportados en la tercera parte del estudio, ya que se cambió de proveedor del almidón de papa, debido a que se buscaba que la firmeza de la masa control tenga un valor más cercano a 400 gf o 3,9 N, como lo reportan Korus *et al.*, (2009) y Ziobro *et al.*, (2013a).

De acuerdo con Buruk *et al.* (2016), en el enfoque de deseabilidad las metas individuales, se combinan en una sola medida objetiva para maximizarse usando una función de media geométrica. Los valores de la función de deseabilidad varían de 0 a 1, siendo 1 el valor perfecto de coincidencia entre la variables respuestas predichas con los modelos matemáticos seleccionados (Myers *et al.*, 2016).

En la Tabla 29 se muestran las formulaciones optimizadas de masas con harina de quinua (OP1 y OP2) para cada experimento con diferentes tipos de gomas. Según el valor de deseabilidad (0,99), las formulaciones OP1 fueron las indicadas por el software, como las que podrían imitar correctamente las propiedades texturales de la masa control. Sin embargo, nuestro objetivo también fue buscar formulaciones que contengan elevado contenido de harina de quinua, es por eso, que se seleccionaron las formulaciones OP2, las cuales llegan a contener, entre 44,5 – 47,1% de harina de quinua. Como se puede observar, las formulaciones de masas libres de gluten con harina de quinua OP2 tienen menores valores de deseabilidad (0,93 – 0,97) que OP1, lo cual indica que el grado de predicción de las propiedades texturales de las masas fue menor. La validación de las propiedades texturales optimizadas se realizó gráficamente (Figura 25) comparando el perfil textural de la masa control con el perfil textural de las formulaciones optimizadas con harina de quinua y diferentes tipos de gomas. En la Figura 25, se puede apreciar que el perfil textural de las

formulaciones optimizadas OP1 con goma xantana, goma de tara y mezcla de gomas fueron muy semejantes al perfil textural de la masa control, demostrando la efectividad de las ecuaciones predictivas encontradas (Tabla 28). Mientras que el perfil textural de las formulaciones de masas optimizadas OP2 con goma xantana, goma de tara y mezcla de gomas fueron ligeramente mayor que el perfil de la masa control. Esto se debe básicamente que estas masas alternativas seleccionados (OP2) contienen mayores niveles de harina de quinua y menores niveles de hidratación (agua); así mismo, las ecuaciones predictivas de los modelos matemáticos seleccionados demuestran que las propiedades texturales de estas masas serán ligeramente mayores que las del control, como se muestra en la Tabla 29.

Al analizar el contenido de las formulaciones de las masas optimizadas con harina de quinua (OP1), fue evidente notar que la inclusión de bajos niveles de harina de quinua (10,7 – 14,4%) a la masa a base de almidón, cambió significativamente su requerimiento de agua (106,2 – 109,3%) y por ende su requerimiento de goma (1,1 – 2%) con la finalidad, de que, la masa con harina de quinua pueda imitar a la masa control.

Tabla 29: Formulaciones óptimas y propiedades texturales predichas de masas libres de gluten con harinas de quinua y diferentes tipos y combinación de gomas

Ingredientes	Óptimos con goma xantana		Óptimos con goma de tara		Óptimos con mezcla de gomas	
	OP1	OP2	OP1	OP2	OP1	OP2
Harina de quinua	10,7	46,3	14,4	47,1	12,6	44,5
Agua	109,3	75,2	106,2	74,4	108,3	77,0
Goma	2,0	0,5	1,4	0,5	1,1	0,5
Respuestas						
Firmeza (N)	4,4	5,1	4,0	7,3	4,0	5,8
Consistencia (N.s)	59,8	56,0	60,1	112,6	57,2	86,8
Cohesividad (N)	3,0	4,2	4,4	5,9	3,5	4,9
Índice de viscosidad (N.s)	38,9	49,2	36,0	84,8	36,0	56,9
Deseabilidad	0,99	0,97	0,99	0,93	0,99	0,96

También se evidenció el efecto sinérgico que presentan la goma xantana y la goma de tara, al requerir menor uso (1,1%) para producir el mismo efecto en las propiedades texturales de las masas que cuando contiene mayores proporciones por sí solas de goma xantana o goma de tara. Aunque algunas investigaciones reportan que elevadas concentraciones de goma

xantana (1-2%) en las masas libres de gluten producen el aumento de la viscosidad de la masa y por ende perjudica la calidad del producto terminado (Lazaridou *et al.*, 2007; Sabanis *et al.*, 2011), según lo encontrado en esta investigación, el nivel de goma óptimo en la masa va a depender directamente del nivel de hidratación en la masa.

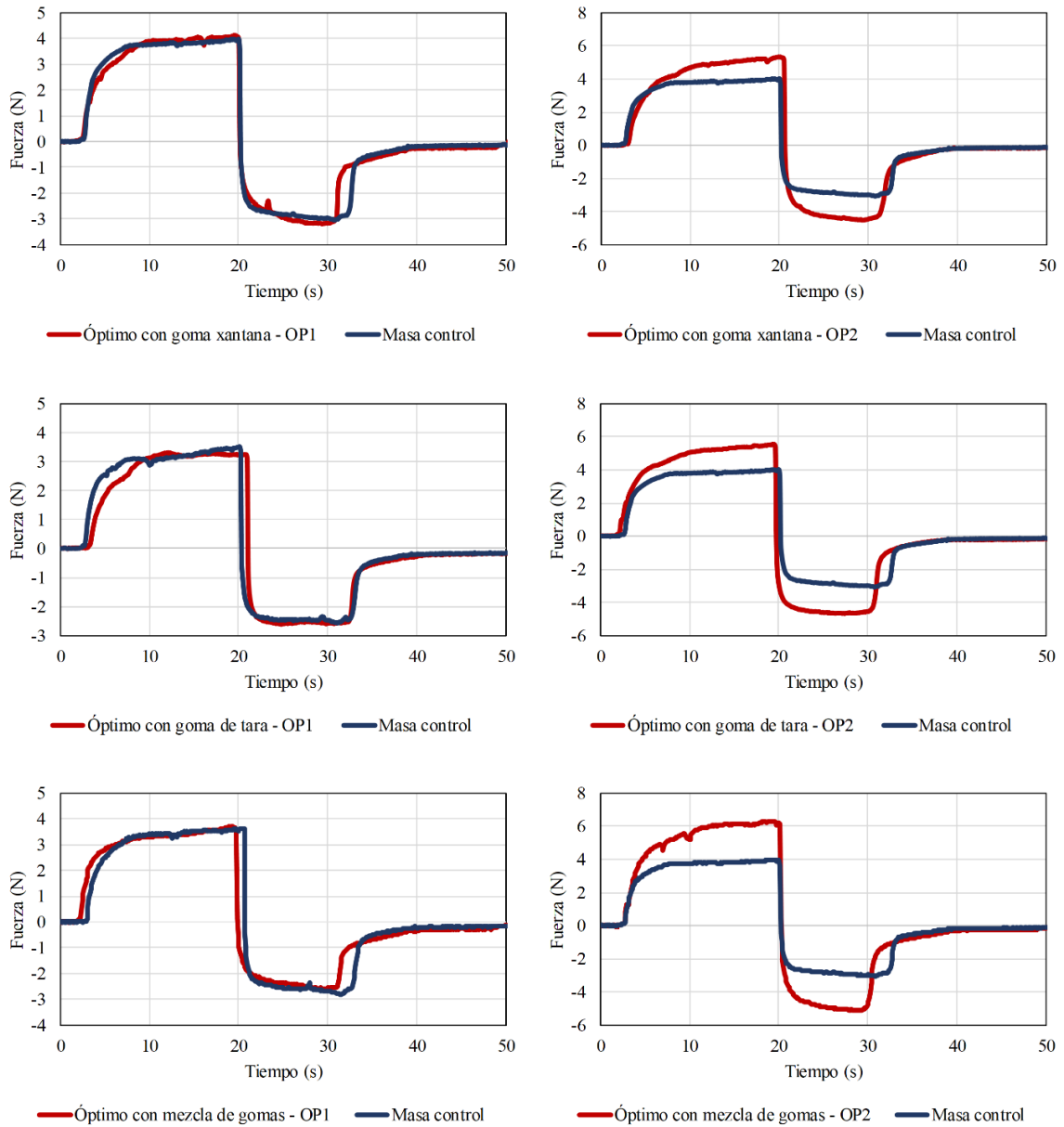


Figura 25: Validación gráfica del perfil textural de la masa control con las formulaciones óptimas (OP1 – OP2) con harina de quinua y diferentes gomas (goma xantana, goma de tara y mezcla de ambas gomas)

Como se demuestra en la reciente investigación realizada por Encina-Zelada *et al.*, (2018), quienes señalan que se podría obtener panes libres gluten (a base de harina de arroz (50%), harina de maíz (30%) y harinas de quinua (20%)) de buena apariencia en términos de mayor volumen específico, menor dureza de la miga, mayor elasticidad de la miga y textura visual de la miga en formulaciones con 110% de agua con 1.5 o 2.5% de goma xantana.

Según la literatura, la inclusión de los galactomananos (goma guar y goma de algarrobo) en panes libres de gluten, también es variable. Se ha reportado el uso de 1,9% de goma guar para imitar el estilo de pan francés pero con harinas libres de gluten con 83,6% de hidratación (Mezaize *et al.*, 2009) y 0,25 – 2% de goma de algarroba para panes libres de gluten a base de almidón de papa, con 63,72 – 89,41% de hidratación respectivamente (Horstmann *et al.*, 2018). También, Encina-Zelada *et al.*, (2019) señalan que se pueden obtener panes sin gluten (a base de harina de arroz (50%), harina de maíz (30%) y harinas de quinua (20%)) de buena apariencia en términos de mayor volumen específico, menor dureza de la miga, mayor elasticidad de la miga y textura visual de la miga en formulaciones con 110% de agua con 2.5 o 3.0% de goma guar. Según los resultados obtenidos, en esta investigación, se puede generalizar diciendo que el nivel de goma utilizado en las formulaciones está íntimamente relacionado con el contenido de agua del sistema y que el uso de las gomas se puede disminuir incrementando el nivel de harina de quinua a la masa, aunque esto conlleva a una disminución de agua en el sistema.

4.4.5. Comportamiento reológico de las formulaciones óptimas con harina de quinua (OP1 y OP2) durante el calentamiento y enfriamiento

Con la finalidad de evaluar el comportamiento reológico de las masas optimizadas con harina de quinua y diferentes gomas durante el calentamiento y enfriamiento, se realizó la prueba de “*pasting*” a las formulaciones OP1 y OP2 sin la adición de levadura. En la Tabla 30 se muestran los valores de viscosidad pico (VP), viscosidad mínima (VM), viscosidad de quiebre (BD), viscosidad final (VF), viscosidad de retrogradación (VR) y la temperatura pico (PT) de las masas optimizadas con harina de quinua y diferentes gomas (goma xantana, goma de tara y mezcla de gomas). En dicho Tabla se puede apreciar que la máxima viscosidad durante el calentamiento, también conocida como VP fue lograda en la masa OP1 con goma de tara, seguida por la masa OP1 con mezcla de goma y OP1 con goma xantana. Por el contrario, las formulaciones OP2 lograron menores valores de VP, esto es debido a

que estas formulaciones tienen mayor contenido de harina de quinua (44,5 – 47,1%) y como se ha reportado en la primera parte del trabajo, esta harina produce menores valores de viscosidad durante el calentamiento. Así mismo, se pudo observar que la VP de las masas OP2 fueron similares y no se evidenció diferencia significativa ($p>0,05$) entre las formulaciones con diferentes tipos de gomas. La razón de que la formulación OP1 con goma xantana presentase menor valor de viscosidad, se explica detalladamente en los resultados de la segunda parte de esta investigación, en donde se pone de manifiesto que la goma xantana inhibe la hinchazón de los gránulos y reduce la viscosidad al posicionarse sobre el gránulo de almidón (Horstmann *et al.*, 2018), mientras que para el caso de los galactomananos, se ha informado que la goma guar forma una estructura laminar en la fase continua; permitiendo de esta manera que los gránulos de almidón pueden hincharse libremente, lo que resulta en un aumento de la VP (Chaisawang y Suphantharika, 2006). Un efecto intermedio se pudo apreciar en el caso de la formulación OP1 con mezcla de gomas, en donde el valor VP de la formulación OP1 fue moderado. Se ha informado que la VP se puede correlacionar la calidad del producto final, sugiriendo que a mayor VP podría proporcionar mejor textura en el producto terminado (Numfon, 2017), por lo tanto, se podría esperar que las formulaciones con goma de tara y mezcla de gomas podrían presentar mejor textura que los panes con goma xantana.

Tabla 30: Propiedades de pasta de las formulaciones optimizadas de harina de quinua (OP1 y OP2) con diferentes gomas

Formulación con harina de quinua		VP	VM	BD	VF	VR	TP
		Pa.s	Pa.s	Pa.s	Pa.s	Pa.s	°C
Óptimos con goma xantana	OP1	5,08 ± 0,03 ^b	1,37 ± 0,00 ^c	3,72 ± 0,03 ^b	2,57 ± 0,08 ^c	1,20 ± 0,08 ^{bc}	70,72 ± 0,00 ^b
	OP2	2,81 ± 0,04 ^a	0,94 ± 0,00 ^a	1,87 ± 0,05 ^a	1,85 ± 0,02 ^a	0,91 ± 0,03 ^a	73,88 ± 0,00 ^c
Óptimos con goma de tara	OP1	6,32 ± 0,05 ^d	1,34 ± 0,08 ^c	4,98 ± 0,13 ^d	2,73 ± 0,00 ^d	1,39 ± 0,09 ^c	66,99 ± 0,60 ^a
	OP2	2,75 ± 0,02 ^a	0,95 ± 0,02 ^a	1,80 ± 0,01 ^a	2,01 ± 0,00 ^b	1,06 ± 0,02 ^{ab}	74,70 ± 1,17 ^c
Óptimos con mezcla de gomas	OP1	5,57 ± 0,01 ^c	1,26 ± 0,02 ^b	4,31 ± 0,03 ^c	2,55 ± 0,02 ^c	1,29 ± 0,00 ^c	69,47 ± 0,62 ^{ab}
	OP2	2,83 ± 0,02 ^a	0,95 ± 0,05 ^a	1,88 ± 0,07 ^a	1,95 ± 0,01 ^{ab}	1,00 ± 0,03 ^{ab}	73,89 ± 1,17 ^c

^{a-c} Las letras minúsculas diferentes en superíndice muestran diferencia significativa ($p<0,05$) entre los tratamientos. VP: Viscosidad pico; VM: Viscosidad mínima; VF: Viscosidad final; VR: Viscosidad de retrogradación; TP: Temperatura pico.

Con respecto a la viscosidad de caída o también conocida como viscosidad mínima (VM), se encontró que todas las formulaciones OP2 mostraron los menores valores de VM,

evidenciando una buena estabilidad durante el calentamiento, mientras que el mayor valor de VM fue logrado por las formulaciones OP1 con goma de tara y con goma xantana. La diferencia entre VP – VM es conocido como la viscosidad de quiebre, por lo tanto, fue lógico encontrar que las formulaciones OP1 obtuvieron mayores valores que las formulaciones OP2. De acuerdo con Ragaee y Abdel-Aal (2006), los valores de viscosidad de quiebre o de descomposición están relacionadas a los altos valores de VP, los cuales a su vez están relacionados con el grado de hinchamiento de los gránulos de almidón durante el calentamiento. Por lo tanto, resulta lógico encontrar que las formulaciones OP1 que tienen mayor proporción de almidón de papa que harina de quinua, tengan una alta capacidad de hinchamiento, dando como elevados valores de VP y de viscosidad de quiebre. Fuentes *et al.* (2019), señalan que los bajos valores de viscosidad de quiebre que tiene los almidones de los granos andinos como la quinua indican que estos almidones tienen una alta capacidad para resistir las fuerzas de corte y el calentamiento a temperaturas elevadas. Siendo esta característica favorable para los productos horneados.

La viscosidad final (VF) de las formulaciones OP1 fueron mayores que las formulaciones OP2, este resultado indica que las formulaciones con mayor proporción de almidón de papa lograrían mayor viscosidad durante el enfriamiento, presumiendo entonces, que las masas seguirían siendo viscosas hasta después del ciclo de calentamiento. Con respecto a la viscosidad de retrogradación (VR) se evidencia que las todas las formulaciones OP2, las cuales contienen elevado contenido de harina de quinua en su composición, obtuvieron menores valores de viscosidad que las formulaciones OP1. Este valor está muy relacionado al proceso de retrogradación de los almidones durante el enfriamiento (Ragaee y Abdel-Aal 2006) y se ha reportado que es un parámetro correlacionado con el endurecimiento de los panes (Rodriguez-Sandoval *et al.*, 2015), por lo tanto, se puede esperar que las formulaciones OP2 tarden más en retrogradarse que las formulaciones OP1.

La temperatura pico (PT) o también conocida como la temperatura en que se logra la máxima viscosidad durante el calentamiento fue mayor en las formulaciones OP2 que las formulaciones OP1. Se ha informado que es preferible que los almidones utilizados en la elaboración de panes libres de gluten tengan PT baja porque así el almidón puede gelatinizar antes, lixiviando amilosa, la cual podría aumentar la viscosidad y la elasticidad de la fase continua de almidón-hidrocoloide produciendo panes con buena distribución alveolar y

elevado volumen específico (Martínez y Gómez, 2017), por lo tanto es de esperar que las formulaciones OP1 desarrollen mejor que las OP2.

4.4.6. Características físicas de los panes libres de gluten óptimos (OP1 y OP2) con harina de quinua

Las características físicas de los panes elaborados con las masas optimizadas con harina de quinua y diferentes gomas se muestran en la Tabla 31. En esta tabla se puede evidenciar que las pérdidas de agua y material después del proceso de cocción fueron mayores en la masa OP1 con goma de tara y OP1 con mezcla de gomas (32,77 y 34,82%). Las menores pérdidas de material por cocción se registraron en las masas optimizadas con goma xantana OP1 y OP2 (29,57 y 26,91%). Este resultado estuvo relacionado con la capacidad de absorción de agua que presentan las gomas utilizadas (goma xantana y goma de tara), el almidón de papa y la harina de quinua. Se ha reportado que la capacidad de absorción de la goma guar y la goma de algarrobo es de 21,05 y 15,02 g/g, mientras que la para la goma xantana es de 18,72 g/g (Horstmann *et al.*, 2018), presumiblemente la capacidad de absorción de agua de la goma de tara esté dentro de este rango, pero es sin lugar a duda, la interacción que puede tener con los demás componentes del sistema, como los almidones, los que determinan su capacidad de absorción de agua después del proceso de horneado de los panes. Como se ha explicado en la segunda parte de la presente investigación, la goma xantana se encuentra en forma de capa en los gránulos de almidón, inhibiendo su completa gelatinización y por ende afectará la menor pérdida de humedad en el proceso de cocción. El efecto contrario se evidencia con la goma de tara, en donde las formulaciones con esta goma exhibieron mayores pérdidas por cocción.

Tabla 31: Características de calidad de las formulaciones óptimas de los panes libres de gluten con harina de quinua

Características físicas	Óptimo con goma xantana		Óptimo con goma de tara		Óptimo con mezcla de gomas	
	OP1	OP2	OP1	OP2	OP1	OP2
Pérdidas por cocción (%)	29,57 ± 0,3	26,91 ± 1,1	34,82 ± 1,2	30,52 ± 0,4	32,77 ± 0,3	30,46 ± 1,8
Volumen específico (mL/g)	2,49 ± 0,1	1,80 ± 0,1	2,44 ± 0,2	1,92 ± 0,1	2,06 ± 0,2	1,82 ± 0,1
Dureza de la miga (N)	5,36 ± 0,3	4,11 ± 0,3	nd	3,13 ± 0,5	3,48 ± 0,6	1,90 ± 0,3
Cohesividad	0,55 ± 0,0	0,55 ± 0,0	nd	0,57 ± 0,0	0,54 ± 0,0	0,68 ± 0,0
Elasticidad	0,95 ± 0,0	0,94 ± 0,1	nd	0,94 ± 0,0	0,95 ± 0,0	0,85 ± 0,1
Gomosidad (N)	2,58 ± 0,2	2,25 ± 0,2	nd	1,76 ± 0,2	1,87 ± 0,3	1,28 ± 0,2
Masticabilidad (N)	1,92 ± 0,2	2,11 ± 0,3	nd	1,66 ± 0,2	1,77 ± 0,3	1,09 ± 0,2

Los panes libres de gluten con harina de quinua con mayores volúmenes específicos, fueron logrados con las formulaciones OP1 (2,06 – 2,49 mL/g), aunque no fueron comparables con el volumen específico del pan control (2,77 mL/g), por otra parte, los panes libres de gluten OP2 fueron los que presentaron menores volúmenes específicos (1,80 – 1,92 mL/g).

Pocos estudios han puesto de manifiesto la relación que existe entre las propiedades texturales de las masas libres de gluten con el volumen final del producto terminado. En el trabajo realizado por Encina-Zelada *et al.* (2018), los máximos volúmenes específicos de los panes libres de gluten a base de harina de arroz (50%), harina de maíz (30%) y harinas de quinua (20%) con 1,5% a 2,5% de goma xantana con 110% fueron de 1,78 – 1,86 mL/g, siendo las propiedades texturales de estas masas las menores de todos los tratamientos de estudio. Las propiedades texturales de sus mejores formulaciones fueron: firmeza (5,5 – 5,7 N), consistencia (52,5 – 62,0 N.s), cohesividad (3,9 – 4,5 N) e índice de viscosidad (15,4 – 19,3 N.s). Si comparamos estos resultados con las propiedades texturales de la masa optimizada OP1 con harina de quinua y goma xantana, las masas optimizadas fueron menos firmes (4,4 N), similares en consistencia (59,8 N.s), similares en cohesividad (3,0 N) y presentaron mayor índice de viscosidad (38,9 N.s).

En otro estudio realizado por Encina-Zelada *et al.* (2019), con la misma formulación de harina de arroz (50%), harina de maíz (30%) y harinas de quinua (20%) pero con 2,5% a 3,0% de goma guar con 110% de agua, los panes con mayores volúmenes específicos (1,79 – 1,84 mL/g) presentaron las siguientes propiedades texturales de las masas: firmeza (9,6 – 10,6 N), consistencia (56,2 – 59,5 N.s), cohesividad (7,7 – 8,2 N) e índice de viscosidad (19,8 – 20,2 N.s). Si comparamos estos resultados con las propiedades texturales de la masa optimizada OP1 con harina de quinua y mezcla de goma xantana con goma de tara, las masas optimizadas fueron menos firmes (4,0 N), similares en consistencia (57,2 N.s), menos cohesivas (3,5 N) y presentaron mayor índice de viscosidad (36,0 N.s).

Los volúmenes específicos de los panes libres de gluten con harinas de arroz, maíz y quinua con goma xantana (Encina-Zelada *et al.*, 2018) o con goma guar (Encina-Zelada *et al.*, 2019) fueron comparables con los volúmenes específicos de los panes optimizados OP2 (1,80 – 1,92 mL/g). Como se ha indicado las masas de los OP2 presentaron mayores valores de textura que la masa control (Figura 25), pero, aun así, pudieron lograr volumen específico comparables con otras investigaciones. Lo que conlleva a deducir, que las formulaciones

optimizadas OP2, que contienen elevadas proporciones de harina de quinua (44,5 – 47,1%) pueden producir panes con aceptables volúmenes específicos.

Con respecto a las propiedades de textura de la miga, el pan OP2 con mezcla de gomas, presentó miga menos firme (1,90 N) que las formulaciones OP2 con goma de tara y OP2 con goma xantana. Mientras que en las formulaciones OP1, la miga menos firme fue obtenida con la formulación OP1 con mezcla de gomas, seguido de la formulación OP1 con goma xantana.

Debido a que las formulaciones OP1 contienen en mayor proporción almidón de papa, la dureza de la miga fue mucho mayor que las formulaciones OP2. Como se ha informado en investigaciones anteriores, los bajos niveles de amilosa de los almidones de la quinua y kiwicha, así como el alto contenido en grasa, son los responsables de la textura suave de la miga (Alvarez-Jubete *et al.*, 2010a), por eso, no necesariamente los panes con elevado volumen específico presentaron menor firmeza, ya que depende en gran medida de las proporciones y tipos de harinas o almidones utilizados en su formulación.

Como se muestra en la Tabla 31, no fue posible medir las propiedades texturales de la miga de las formulaciones OP1 con goma de tara porque la estructura colapsó durante el horneado. Este problema se puede deber a que la viscosidad de la masa con goma de tara se puede ver reducida por efecto de la temperatura y por ende la masa no tuvo la suficiente firmeza para retener el gas formado y produciéndose el fenómeno de coalescencia. De acuerdo con Wu *et al.* (2015), la viscosidad de las soluciones acuosas con goma de tara (0,5, 0,8 y 1%) disminuyó a medida que la temperatura aumenta de 30 °C a 80 °C. Según los autores, este fenómeno se puede atribuir a que los polisacáridos de los galactomananos de la goma de tara pueden hidrolizarse a alta temperatura, produciendo una disminución de la viscosidad.

Todos los panes libres de gluten con harina de quinua y diferentes tipos de gomas (OP1 y OP2), presentaron similares valores de cohesividad y elasticidad ($p > 0,05$). Aunque la miga de los panes OP2 con mezcla de gomas fueron un poco más cohesivas y menos elásticas que las demás formulaciones. Según Monthe *et al.* (2019) la cohesión es la fuerza de los lazos internos de la miga de pan, como los panes libres de gluten OP2, contiene menos agua en su formulación, resulta lógico pensar que las migas resulten ser más compactas y por ende más cohesivas texturalmente.

Las formulaciones OP1 con goma xantana y OP1 con goma de tara obtuvieron valores más elevados de gomosis (2,58 – 1,87 N) que los panes OP2 (2,25 – 1,28 N), esto se debió básicamente al menor contenido de goma que llevan estas formulaciones, debido a que las formulaciones OP2 contenían, aproximadamente, la cuarta parte de goma que las formulaciones OP1. Con respecto a la masticabilidad de la miga, el valor más elevado se obtuvo en la miga de la formulación OP2 con goma xantana, seguido de la formulación OP1 con goma xantana y OP1 con mezcla de gomas. De acuerdo con Patil y Arya (2019), la masticabilidad está relacionada con el número de mordidas necesarias para tragar los alimentos, por lo tanto se puede decir que algunas migas resultaron más difíciles de deglutir que otras.

Comparando las propiedades de textura de la miga de los panes optimizados con harina de goma de quinua y diferentes gomas con otras investigaciones de panes libres de gluten que contengan quinua en su formulación, se evidenció que la dureza de la miga (1,90 – 5,36 N) fue mucho menor comparado con otras investigaciones, por ejemplo, Alvarez-Jubete *et al.* (2010a) reportan que la firmeza de la miga del pan libre de gluten con 50% de harina de quinua y 0,5% de goma xantana fue de 29 N; Encina-Zelada *et al.* (2019) reportan que la firmeza de la miga del pan libre de gluten con 20% de harina de quinua y 2,5% de goma guar fue de 25 N; Encina-Zelada *et al.* (2018) reportan que la firmeza de la miga del pan libre de gluten con 20% de harina de quinua y 1,5% de goma xantana fue de 19,5 N; Föste *et al.* (2014) reportan que la firmeza de la miga del pan libre de gluten con 40% y 80% de harina de quinua con 2% de HPMC fue de 10,63 y 10,70 N, respectivamente. Turkut *et al.*, (2016) reportan que la firmeza de la miga del pan libre de gluten con 25% de harina de quinua y 0,5% de goma xantana fue de 18,9 N. La única publicación que se asemeja a nivel de dureza de la miga, es con la realizada por Alencar *et al.*, (2015), quienes reportan que la dureza de la miga del pan libre de gluten con 20% de harina de quinua y 0,35 de goma xantana estuvo entre 2,5 – 5,6 N. Se debe mencionar que el nivel de hidratación de la formulación propuesta por Alencar *et al.*, (2015) fue de 82,25%.

En la Figura 26 se puede apreciar que los panes elaborados con las formulaciones optimizadas OP1 presentaron cortezas lisas y sin grietas, lo cual resultaría atractivo al consumidor, pero la formulación OP1 con goma de tara presentó el defecto de colapso de la miga, producto de la coalescencia de los alveolos y debilitamiento de la estructura durante el horneado. Para el caso de los panes elaborados con las formulaciones optimizadas OP2,

sus cortezas presentaron grietas y para el caso de la formulación con goma de tara, también se pudo evidenciar el debilitamiento de la estructura durante el horneado, ya que se puede apreciar como especie de depresión en la parte central del pan. Sin embargo, la formulación OP2 con la mezcla de gomas, se muestra prometedora al lograr una buena distribución alveolar y corteza poco agrietada. Las grietas en la corteza del pan indican que el dióxido de carbono producido durante la fermentación ha logrado escapar por la falta de elasticidad de la masa. Según la literatura, este es un defecto común en los panes libres de gluten, al no tener una red viscoelástica, pero se podría evitar utilizando las gomas, las cuales pueden aumentar la viscosidad de la masa, confiriéndole elasticidad y así evitar el agrietamiento de las cortezas (Ari Akin y Miller, 2017; Schober *et al.*, 2005); sin embargo, según los resultados mostrados en esta investigación, tan solo no basta con la adición de las gomas solubles en agua fría para incrementar la viscosidad de la masa, sino también, influye mucho las propiedades texturales de la masa y el comportamiento del hidocoloide durante el proceso de fermentación y horneado.

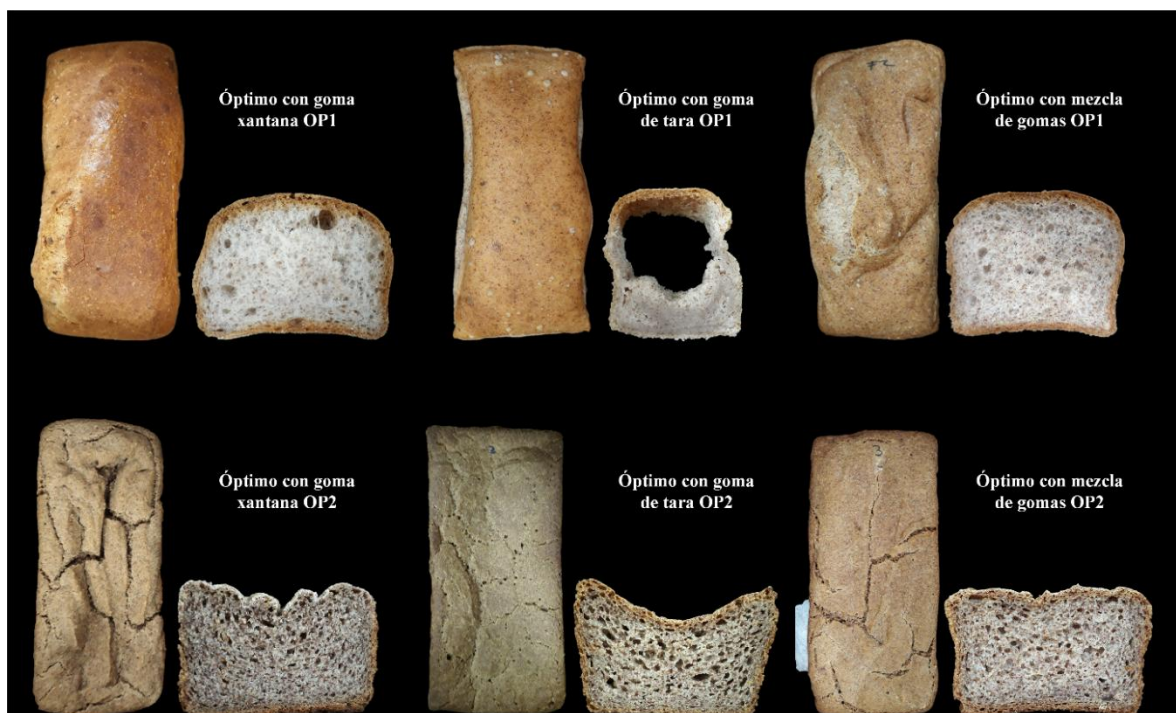


Figura 26: Imágenes representativas de los panes libres de gluten optimizados con harinas de quinua y diferentes tipos de gomas.

La goma xantana ha sido ampliamente utilizada en la elaboración de panes libres de gluten con la finalidad de aumentar la viscosidad de la masa y retener el gas durante el proceso de

fermentación y horneado, por lo tanto, la goma podría aumentar el volumen específico del pan (Hager y Arendt, 2013); sin embargo, en la literatura se pueden encontrar resultados contradictorios cuando se utiliza esta goma en elevadas proporciones en las formulaciones (Lazaridou *et al.*, 2007; Sabanis y Tzia, 2011). Según los resultados obtenidos en esta investigación, el nivel de goma xantana utilizada dependerá del nivel de hidratación de la masa, por ejemplo, masas con reducido nivel de harina de quinua (10,7%) y elevado contenido de almidón de papa (89,3%) necesitarán mayor nivel de hidratación (109,3%) y la máxima concentración de goma xantana (2,0%) para poder imitar las propiedades texturales de una masa control, la cual se caracteriza por ser fluida. Mientras que cuando se utiliza una elevada proporción de harina de quinua (46,3%) será necesario poca cantidad de agua (75,2%) y bajos niveles de goma xantana (0,5%).

Por otro lado, la mezcla de goma xantana con goma de tara se mostró prometedora para el desarrollo de panes libres de gluten con harina de quinua, ya que se evidenció un efecto sinérgico en las propiedades texturales de las masas, incrementando las mismas al ser utilizadas en menores proporciones (0,5 – 1,1 %), que cuando son utilizadas por separado. Así mismo, la mezcla de gomas proporcionó estabilidad a las masas durante el horneado y pudo mantener la estructura alveolar de la miga, incluso, proporcionó propiedades de textura en la miga y volumen del pan, similares a las formulaciones elaboradas con goma xantana.

El uso de bajas proporciones de hidrocoloides o gomas en la elaboración de panes libres de gluten afectaría positivamente en el precio, ya que el uso en elevadas proporciones de este ingrediente encarecería el producto terminado (Cajas *et al.*, 2019).

Si bien los resultados obtenidos en las formulaciones OP1 con goma de tara no proporciona resultados discutibles, se puede indicar que la propuesta de optimizar en función de los parámetros texturales de la masa, depende en gran medida del tipo y estabilidad de la goma durante el horneado.

4.4.7. Propiedades texturales de las masas libres de gluten con harina de kiwicha y goma xantana

Los valores promedio y la desviación estándar de las propiedades texturales de las masas con diferentes concentraciones de harina de kiwicha, agua y goma xantana se muestran en

la Tabla 32. La masa con menor firmeza (0,67 N), consistencia (10,24 N.s), cohesividad (0,31 N) e índice de viscosidad (4,77 N.s) fue lograda en la mezcla que contenía 11,5% de harina de kiwicha, 110% de agua y 0,5% de goma xantana. Mientras que la masa con mayores valores de firmeza (45,12 N), consistencia (636,16 N.s), cohesividad (31,66 N) e índice de viscosidad (333,04 N.s) fue lograda por la mezcla que contenía 50% de harina de kiwicha, 70% de agua y 2% de goma xantana.

Estos resultados pueden ser explicados por las diferencias entre las proporciones de los ingredientes de las formulaciones; ya que masas con elevado contenido de agua (110%) y poca cantidad de goma xantana (0,5%) fue lógico pensar que el resultado sea una masa más fluida, mientras que para el otro caso, formulaciones con poco contenido de agua (70%), elevado contenido de harina de kiwicha (50%) y elevado contenido de goma xantana (2%) resultaron en una masa muy consistente, porque al aumentar el contenido de harina y por ende el contenido de proteínas y fibra en las formulación, aumentó la absorción de agua por parte de la harina y este efecto se vió reforzado con la capacidad de tiene la goma xantana para ligar agua a temperatura ambiente (Crockett *et al.*, 2011).

De acuerdo con D'Amico y Schoenlechner (2017), las proteínas de amaranto consisten en aproximadamente 40% de albúminas, 20% de globulinas, 25% a 30% de glutelinas y solo 2% a 3% de prolaminas. Las globulinas y las albúminas constituyen la fracción proteica principal en el amaranto y se han podido diferenciar dos clases principales de globulinas, las globulinas 7S y 11S. La globulina 11S (amarantina) es la proteína de almacenamiento más abundante en el amaranto y la globulina 7S (conamarantina) está presente en cantidades mucho más bajas. Al igual que la quinua, como se ha explicado en el experimento anterior, se podría presumir que esta globulina también podría tener la capacidad de absorción de agua fría y por ende contribuir con la capacidad de absorción de agua en la masa.

Se ha reportado que las albúminas del amaranto son capaces de interactuar con las proteínas del gluten en la harina de trigo, mostrando efectos similares a las subunidades de gluten. Esto podría contribuir a lograr la retención del gas producido durante la fermentación (Sanz-Penella *et al.*, 2013). Así mismo, el contenido de lípidos en la harina de amaranto, que es 6 veces mayor que en la harina de trigo, podría actuar como un agente tensioactivo, funcionando como un agente estabilizador de gases durante la fabricación del pan, lo que probablemente mejore la elasticidad del pan (Alvarez-Jubete *et al.*, 2010a).

Para modelar el comportamiento de las propiedades texturales se realizó una transformación de los resultados en logaritmo natural, sugerido por el propio programa “*Design Expert 11,0*”, con la finalidad de acortar el rango de las respuestas y ajustar a un modelo matemático apropiado. De acuerdo con la Tabla 35, donde se muestra el resumen del análisis de varianza del modelo; el modelo cuadrático fue significativo ($p < 0,0001$) para explicar el comportamiento de la firmeza, consistencia, cohesividad e índice de viscosidad de las masas; demostrando que existen efectos significativos en la interacción de los ingredientes experimentados (harina de quinua, agua y goma xantana). Sin embargo, la prueba de falta de ajuste del modelo (*lack of fit*) fue significativa ($p < 0,05$) para todas las variables, lo cual sugiere que puede existir un orden de modelo superior que puede explicar mejor el comportamiento de las variables. Se pudo verificar el ajuste del modelo cuadrático seleccionado mediante los coeficientes de determinación (R^2 , R^2 ajustado y R^2 predicho) los cuales variaron entre 0,989– 0,998. Por lo tanto, se puede decir que el 99% de la variación observada en la firmeza, consistencia, cohesividad e índice de viscosidad de las masas con kiwicha y como xantana pudo ser explicada por el modelo cuadrático y la calidad del ajuste fue satisfactorio. Como se ha indicado en la sección anterior, incluir un modelo de orden superior, complicaría la interpretación real de la interacción de las variables, es por eso que se optó con dejar el modelo cuadrático, como máximo orden para interpretar el comportamiento de las respuestas.

Tabla 32: Propiedades texturales de masas libres de gluten a base de almidón de papa con diferentes proporciones de harina de kiwicha, agua y goma xantana

Mezcla	Proporción de ingredientes			Propiedades texturales de las masas libres de gluten			
	Harina de kiwicha	Agua	Goma xantana	Firmeza	Consistencia	Cohesividad	Índice de viscosidad
	(%)	(% Base Almidón / Harina)	(% Base Almidón / Harina)	(N)	(N.s)	(N)	(N.s)
1	30,00	90,00	2,00	10,23 ± 0,2	145,31 ± 0,4	8,11 ± 0,4	84,67 ± 6,4
2	10,75	110,00	1,25	2,28 ± 0,0	32,76 ± 0,8	1,50 ± 0,0	22,10 ± 1,1
3	10,00	110,00	2,00	4,28 ± 0,3	62,41 ± 3,8	3,31 ± 0,3	39,63 ± 1,4
4	50,00	70,00	2,00	45,86 ± 0,8	645,72 ± 23,8	33,04 ± 0,5	345,25 ± 15,0
5	50,00	71,50	0,50	7,35 ± 0,1	108,50 ± 2,9	6,35 ± 0,1	71,80 ± 1,7
6	40,19	80,94	0,88	6,18 ± 0,1	91,49 ± 1,1	5,33 ± 0,0	61,11 ± 0,2
7	30,00	90,00	2,00	9,91 ± 0,5	141,66 ± 6,6	8,08 ± 0,4	88,37 ± 1,8
8	30,38	90,38	1,25	5,06 ± 0,1	74,86 ± 0,6	4,12 ± 0,1	50,86 ± 3,2
9	20,19	100,19	1,63	4,60 ± 0,1	69,29 ± 1,3	3,64 ± 0,0	44,89 ± 0,0
10	50,00	71,50	0,50	7,11 ± 0,0	103,81 ± 2,4	6,13 ± 0,1	68,50 ± 1,1
11	11,50	110,00	0,50	0,67 ± 0,0	10,24 ± 0,2	0,31 ± 0,0	4,77 ± 0,3
12	50,00	70,75	1,25	19,72 ± 0,1	288,63 ± 2,7	16,65 ± 0,1	174,19 ± 4,2
13	11,50	110,00	0,50	0,71 ± 0,0	10,82 ± 0,0	0,30 ± 0,0	4,61 ± 0,2
14	50,00	70,00	2,00	45,12 ± 0,4	636,16 ± 22,7	31,66 ± 0,7	333,04 ± 27,2
15	10,00	110,00	2,00	4,18 ± 0,1	62,90 ± 2,2	3,32 ± 0,1	40,14 ± 0,8
16	40,19	80,19	1,63	13,38 ± 0,4	191,51 ± 8,5	10,88 ± 0,4	111,16 ± 7,4

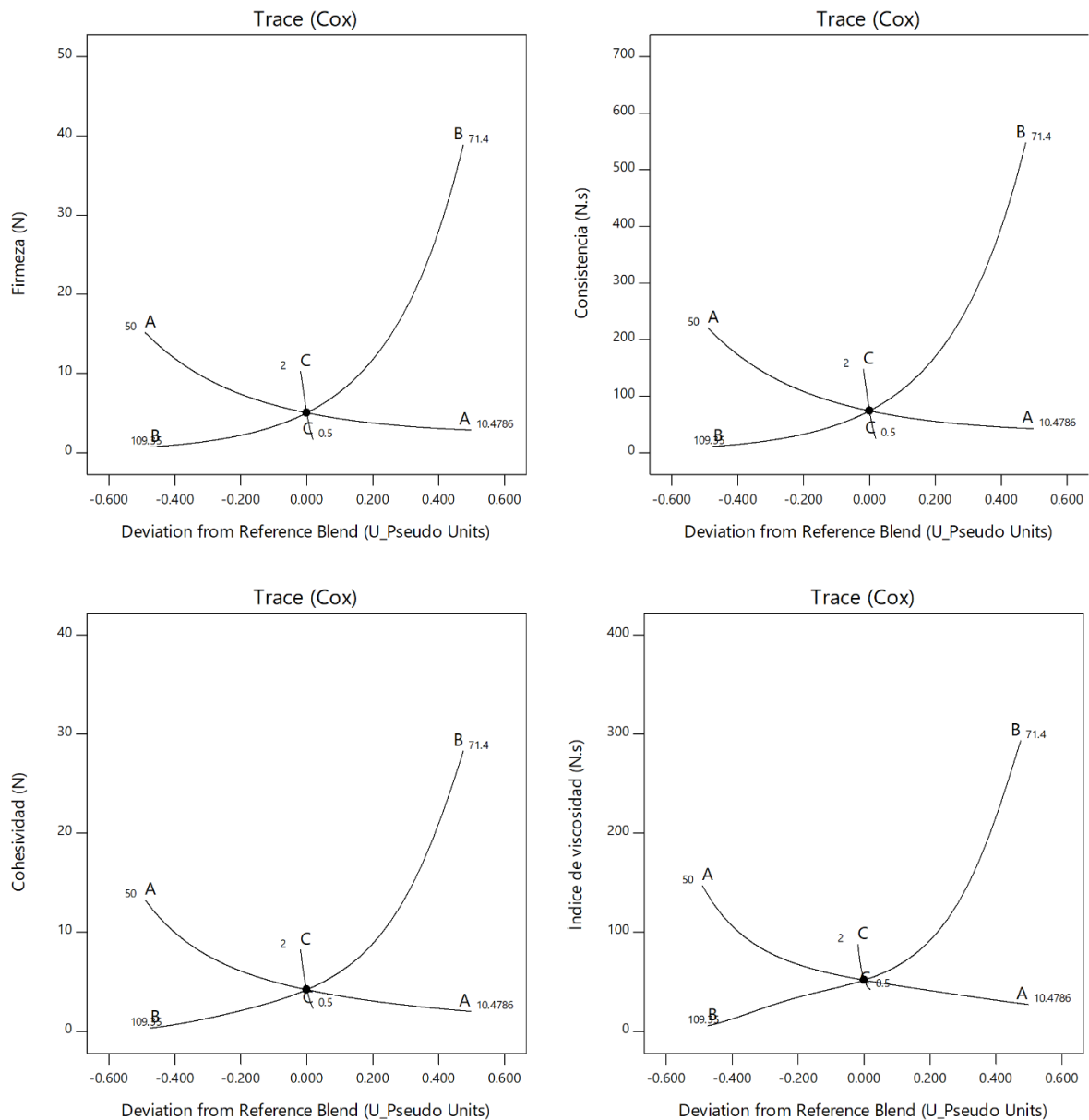


Figura 27: Gráficos de trazas (Cox) para evaluar la influencia de los ingredientes (A: Harina de kiwicha; B: Agua, C: Goma xantana) en los parámetros de textura en las formulaciones de masas libres de gluten

En la Tabla 36, se muestran las ecuaciones matemáticas que describen el comportamiento de las variables respuestas (firmeza, consistencia, cohesividad e índice de viscosidad), con las variables de estudio (HK: Harina de kiwicha, A: Agua; GX: Goma xantana) así como las interacciones HK: A; HK: GX y A: GX, las cuales fueron significativas ($p < 0,05$).

Con la finalidad de evaluar la influencia de los variables (HK, A y GX) en las propiedades texturales se utilizaron los gráficos de trazas (Cox) (Figura 27), los cuales muestran el

comportamiento de las propiedades texturales de la masa cuando se disminuye o aumenta el contenido de cada ingrediente (HK, A y GX).

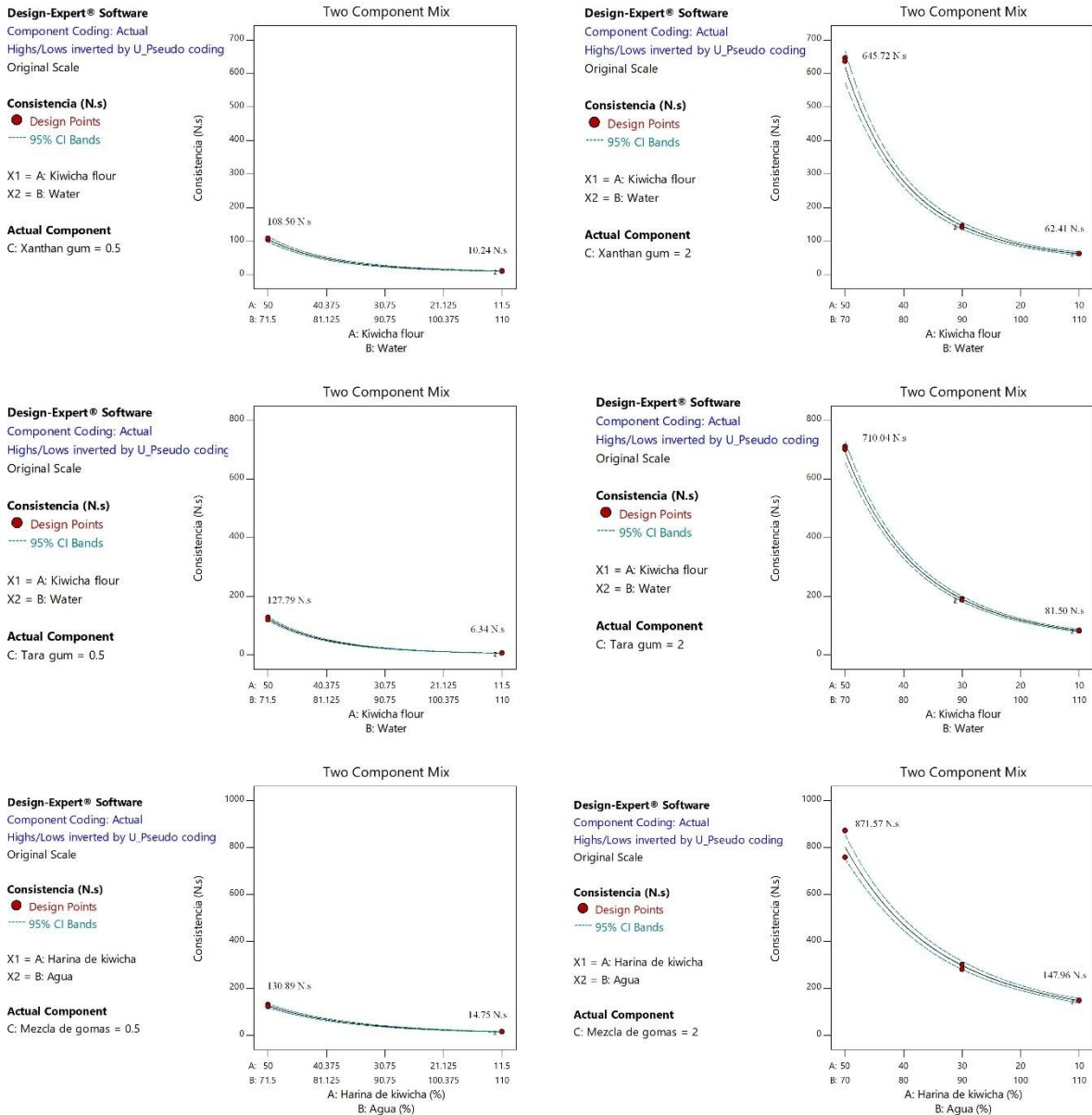


Figura 28: Efecto de la concentración mínima (0.5%) y máxima (2%) de la goma xantana, goma de tara y mezcla de ambas gomas en la consistencia de las masas cuando se mezclan la harina de kiwicha y agua

El efecto más pronunciado en las variables respuestas fue ocasionado por el agua (A), seguido por la harina de kiwicha (HK) y en menor medida por la goma xantana (GX).

En la investigación realizada por Schoenlechner *et al.*, (2010), se señala que el contenido de agua en la formulación de pan sin gluten con harina de amaranto resultó ser un factor determinante para la estructura final del pan. Debido a que influyó significativamente en el tamaño como en el número de alveolos. Así mismo, los autores señalan que podrían producirse diferentes estructuras de la miga si se producen ligeras variaciones en el contenido de agua de la formulación, es por eso que fue necesario la optimización de esta variable, en su estudio.

En la Figura 28 se presenta el efecto de la concentración mínima (0,5%) y máxima (2%) de la goma xantana sobre la consistencia de las diferentes mezclas de harina de kiwicha y agua. En dicha figura se puede observar que la inclusión de 0,5% de goma xantana tuvo un menor efecto en la consistencia de las masas con diferentes concentraciones de harina de kiwicha y agua; mientras que la inclusión de 2% de goma xantana produjo un incremento de la consistencia de la masa entre 5 a 6 veces.

De esta figura también se puede observar que la consistencia de la masa con elevado contenido de harina de kiwicha (50%), 71,5% de agua y 0,5% de goma xantana fue casi 6 veces menor que cuando se adiciona 2% de goma xantana. Este resultado demuestra que los componentes de la kiwicha como los lípidos podrían funcionar como emulsionantes naturales contribuyendo en disminuir la consistencia de la masa (Alvarez-Jubete *et al.*, 2010a).

4.4.8. Propiedades texturales de las masas libres de gluten con harina de kiwicha y goma de tara

Los valores promedio y la desviación estándar de las propiedades texturales (firmeza, consistencia, cohesividad e índice de viscosidad) de las masas con diferentes concentraciones de harina de kiwicha, agua y goma tara se muestran en la Tabla 33. El análisis de los valores promedios muestra que la masa con menor firmeza (0,36 N), consistencia (6,34 N.s), cohesividad (0,13 N) e índice de viscosidad (0,65 N.s) fue logrado en la mezcla que contenía 11,5% de harina de kiwicha, 110% de agua y 0,5% de goma de tara. Mientras que la masa con los máximos valores de firmeza (48,23 N), consistencia (700,60 N.s), cohesividad (41,30 N) e índice de viscosidad (444,69 N.s) fue logrado en la mezcla que contenía 50% de harina de kiwicha, 70% de agua y 2% de goma de tara.

En comparación con las masas libres de gluten con goma xantana, la goma de tara produjo menores valores de las propiedades texturales cuando se utilizó la mínima concentración de la goma xantana (0,5%), pero se produjo similares valores de propiedades texturales cuando se utilizó la máxima concentración (2%). Este resultado, como se ha explicado en la sección de análisis de resultados con harina de quinua, se debe básicamente a la reducida solubilidad de la goma de tara en agua fría.

Para modelar el comportamiento de las propiedades texturales de las masas con harina de kiwicha y goma de tara se tuvo que realizar una transformación de los resultados en logaritmo natural, según lo sugerido por el propio programa “*Design Expert 11,0v*”. De acuerdo con la Tabla 35, donde se muestra el resumen del análisis de varianza del modelo, el modelo cuadrático fue significativo ($p < 0,0001$) para explicar el comportamiento de la firmeza, consistencia, cohesividad e índice de viscosidad de las masas; demostrando que existen efectos significativos en la interacción de los ingredientes experimentados (HK, A y GX). Los estadísticos de verificación de ajuste del modelo (R^2 , R^2 ajustado y R^2 predicho) estuvieron en los rangos de 0,96 – 0,99, demostrando que el 96% de la variación observada en las propiedades texturales (firmeza, consistencia, cohesividad e índice de viscosidad) de las masas con kiwicha y goma de tara puede ser explicada por el modelo cuadrático. La prueba de falta de ajuste del modelo (*lack of fit*), para las variables de firmeza y consistencia fueron no significativas ($p > 0,05$), lo cual indica que el modelo cuadrático seleccionado es el orden apropiado para explicar el comportamiento de las variables; sin embargo, la prueba de falta de ajuste del modelo para las variables de cohesividad e índice de viscosidad fueron significativas ($p < 0,05$), indicando que podría existir un modelo de orden superior que puede explicar mejor el comportamiento de estas respuestas (Granato y de Araújo Calado, 2013; Myers *et al.*, 2016).

Tabla 33: Propiedades texturales de masas libres de gluten a base de almidón de papa con diferentes proporciones de harina de kiwicha, agua y goma de tara

Mezcla	Proporción de ingredientes			Propiedades texturales de las masas libres de gluten			
	Harina de kiwicha	Agua	Goma de tara	Firmeza	Consistencia	Cohesividad	Índice de viscosidad
	(%)	(% Base Almidón / Harina)	(% Base Almidón / Harina)	(N)	(N.s)	(N)	(N.s)
1	30,00	90,00	2,00	12,92 ± 1,0	187,53 ± 0,4	11,52 ± 0,4	128,44 ± 7,6
2	10,75	110,00	1,25	1,79 ± 0,1	27,26 ± 1,5	1,29 ± 0,1	18,99 ± 0,9
3	10,00	110,00	2,00	5,57 ± 0,1	81,50 ± 1,8	4,74 ± 0,1	56,95 ± 1,8
4	50,00	70,00	2,00	48,23 ± 0,5	700,60 ± 5,4	41,30 ± 0,5	444,69 ± 19,1
5	50,00	71,50	0,50	8,82 ± 0,4	127,79 ± 3,3	7,64 ± 0,3	83,82 ± 3,2
6	40,19	80,94	0,88	6,29 ± 0,2	94,89 ± 2,1	5,54 ± 0,1	63,61 ± 1,4
7	30,00	90,00	2,00	13,18 ± 0,7	190,94 ± 3,2	11,90 ± 0,4	132,79 ± 3,3
8	30,38	90,38	1,25	4,96 ± 0,2	75,00 ± 1,3	4,38 ± 0,1	51,71 ± 0,6
9	20,19	100,19	1,63	4,96 ± 0,1	74,01 ± 2,3	4,28 ± 0,1	51,69 ± 1,4
10	50,00	71,50	0,50	7,99 ± 0,3	119,80 ± 3,0	6,92 ± 0,2	80,52 ± 0,7
11	11,50	110,00	0,50	0,36 ± 0,0	6,34 ± 0,1	0,13 ± 0,0	0,65 ± 0,1
12	50,00	70,75	1,25	22,60 ± 0,3	323,62 ± 14,4	19,68 ± 0,6	200,37 ± 7,2
13	11,50	110,00	0,50	0,39 ± 0,0	6,67 ± 0,3	0,12 ± 0,0	0,54 ± 0,0
14	50,00	70,00	2,00	47,80 ± 0,6	710,04 ± 23,7	41,37 ± 0,7	435,14 ± 2,3
15	10,00	110,00	2,00	6,00 ± 0,3	83,65 ± 1,9	4,86 ± 0,1	57,19 ± 1,9
16	40,19	80,19	1,63	15,82 ± 0,1	228,71 ± 4,1	14,55 ± 0,4	159,23 ± 5,1

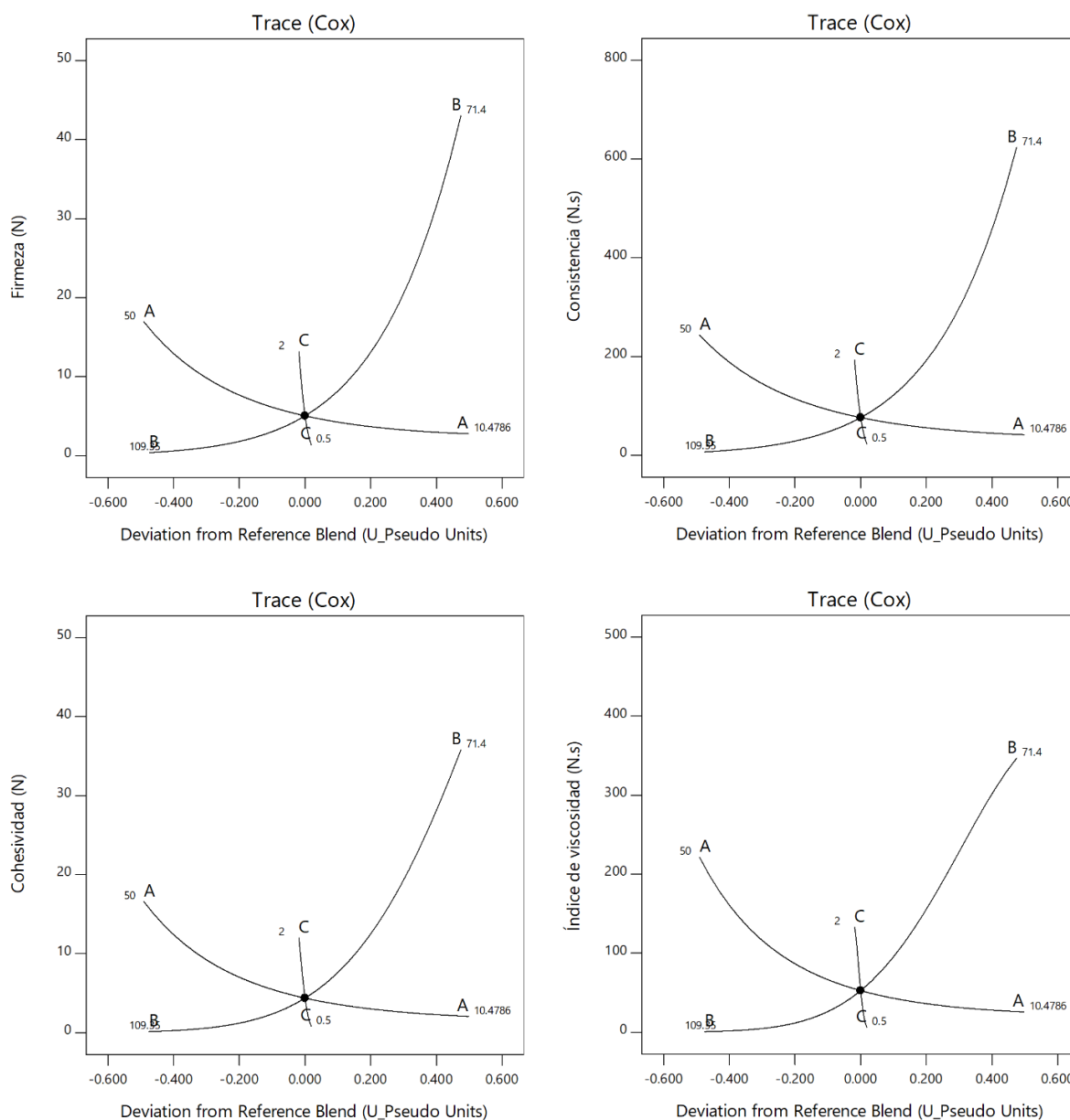


Figura 29: Gráficos de trazas (Cox) para evaluar la influencia de los ingredientes (A: Harina de kiwicha; B: Agua, C: Goma de tara) en los parámetros de textura en las formulaciones de masas libres de gluten

Las ecuaciones matemáticas que describen el comportamiento de las propiedades texturales de la masa con respecto a los efectos de las variables en estudio, por sí solas (HK: Harina de kiwicha, A: Agua; GT: Goma de tara) e interacciones (HK: A, HK:GT y A:GT), se muestran en la Tabla 36.

Con la finalidad de evaluar la influencia de los variables (HK, A y GT) sobre las propiedades texturales se utilizaron los gráficos de trazas (Cox) (Figura 29), los cuales muestran cual es

el comportamiento de la firmeza, consistencia, cohesividad e índice de viscosidad, cuando se disminuye o aumenta el contenido de cada ingrediente. De la misma forma que el efecto surgido en el experimento con harina de kiwicha y goma xantana, el agua produjo el efecto más pronunciado en las propiedades texturales de las masas; disminuyendo los valores de firmeza, consistencia cohesividad e índice de viscosidad a medida que se incrementa su adicción a la masa. El incremento de la harina de kiwicha y goma de tara en las formulaciones también ocasionaron incrementos de las propiedades texturales significativas, pero en menor medida.

En la Figura 28 se presenta el efecto de la concentración mínima (0.5%) y máxima (2%) de la goma de tara sobre la consistencia de las diferentes mezclas de harina de kiwicha y agua. En la figura se puede observar que la inclusión de 0.5% de goma de tara tuvo un menor efecto en la consistencia de las masas con diferentes concentraciones de harina de quinua y agua; mientras que la inclusión de 2% de goma de tara produjo un incremento de la consistencia de la masa entre 5 a 12 veces.

De esta figura también se puede observar que la consistencia de la masa con elevado contenido de harina de kiwicha (50%), 71.5% de agua y 0.5% de goma de tara fue casi 5.5 veces menor que cuando se adiciona 2% de dicha goma, con lo cual se puede interpretar que la elevada concentración de goma de tara en el sistema tuvo efectos significativos ($p < 0,05$) en las propiedades texturales, incrementando la textura de la masa.

4.4.9. Propiedades texturales de las masas libres de gluten con harina de quinua y mezcla de goma xantana con goma de tara (1:1)

En la Tabla 34, se muestran los valores promedio y la desviación estándar de las propiedades texturales de las masas con diferentes concentraciones de harina de kiwicha, agua y mezcla de gomas (goma xatnana con goma de tara, 1:1). El análisis de los valores promedios muestra que la masa con menor firmeza (0,93 N), consistencia (14,75 N.s), cohesividad (0,43 N) e índice de viscosidad (6,17 N.s) fue lograda en la mezcla que contenía 11,5% de harina de quinua, 110% de agua y 0,5% de goma xantana. Mientras que la masa con mayores valores de firmeza (60,60 N), consistencia (871,57 N.s), cohesividad (46,72 N) e índice de viscosidad (473,88 N.s) fue lograda en la mezcla que contenía 50% de harina de quinua, 70% de agua y 2% de la mezcla de gomas.

En comparación con las masas de kiwicha con goma xantana y con goma de tara, la mezcla al 2% de ambas gomas produce los mayores valores de propiedades texturales en las masas, evidenciando sinergismo marcado, cuando se mezclan ambas gomas en la concentración máxima de estudio.

De forma similar que los anteriores experimentos, para modelar el comportamiento de las respuestas (propiedades texturales), se tuvo que realizar una transformación de los resultados en logaritmo natural. De acuerdo con la Tabla 35, donde se muestra el resumen del análisis de varianza del modelo, el modelo cuadrático fue significativo ($p < 0,0001$) para explicar el comportamiento de la firmeza, consistencia, cohesividad e índice de viscosidad de las masas; demostrando que existen efectos significativos en la interacción de los ingredientes experimentados (harina de kiwicha, agua y goma xantana). Así mismo, la prueba de falta de ajuste del modelo (lack of fit) fue no significativa ($p > 0,05$) para todas las variables, lo cual demuestra que el orden del modelo seleccionado fue correcto (Granato y de Araújo Calado, 2013; Myers *et al.*, 2016). También se pudo verificar el ajuste del modelo cuadrático seleccionado mediante los coeficientes de determinación (R^2 , R^2 ajustado y R^2 predicho) los cuales variaron entre 0,995 – 0,999. Por lo tanto, se puede decir que el 99% de la variación observada en las propiedades texturales de las masas con quinua (firmeza, consistencia, cohesividad e índice de viscosidad) pudo ser explicada por el modelo cuadrático y la calidad del ajuste es satisfactorio. Las ecuaciones matemáticas que describen el comportamiento de las variables, así como de sus interacciones se muestran en la Tabla 36. En esta tabla se puede observar que las variables por sí solas (HK: Harina de kiwicha, A: Agua; GM: Mezcla de gomas) así como las interacciones HK: A; HK: MG y A: MG fueron significativas, por lo tanto, son contempladas en las ecuaciones de predicción.

Según los gráficos de trazas (Cox) (Figura 30), donde se evalúa la influencia de la HK, A y MG sobre las propiedades texturales de la masa, se muestra que el agua produjo el mayor efecto en las propiedades texturales, disminuyendo la firmeza, la consistencia, la cohesividad y el índice de viscosidad a medida que aumentó su contenido en la masa. También, el incremento de la harina de quinua y la mezcla de las gomas en la formulación incrementó significativamente las propiedades texturales de las masas, incluso, se pudo evidenciar mayores valores de textura en las masas de ese experimento.

Tabla 34: Propiedades texturales de masas libres de gluten a base de almidón de papa con diferentes proporciones de harina de kiwicha, agua y mezcla de gomas

Mezcla	Proporción de ingredientes			Propiedades texturales de las masas libres de gluten			
	Harina de kiwicha	Agua	Mezcla de gomas (1:1)	Firmeza	Consistencia	Cohesividad	Índice de viscosidad
	(%)	(% Base Almidón / Harina)	(% Base Almidón / Harina)	(N)	(N.s)	(N)	(N.s)
1	30,00	90,00	2,00	19,17 ± 1,8	280,76 ± 1,2	15,31 ± 1,2	159,06 ± 8,1
2	10,75	110,00	1,25	4,05 ± 0,3	59,37 ± 5,5	2,65 ± 0,2	32,53 ± 2,0
3	10,00	110,00	2,00	10,15 ± 0,1	148,05 ± 5,3	7,21 ± 0,3	70,73 ± 3,4
4	50,00	70,00	2,00	52,46 ± 1,9	757,88 ± 26,9	39,80 ± 1,8	436,39 ± 7,9
5	50,00	71,50	0,50	8,86 ± 0,4	130,89 ± 5,6	7,33 ± 0,3	79,62 ± 2,6
6	40,19	80,94	0,88	8,77 ± 0,5	130,26 ± 4,5	6,90 ± 0,0	75,28 ± 1,5
7	30,00	90,00	2,00	20,20 ± 0,6	300,68 ± 10,5	15,91 ± 0,4	170,87 ± 5,4
8	30,38	90,38	1,25	9,23 ± 0,1	139,54 ± 1,3	7,15 ± 0,2	85,52 ± 1,7
9	20,19	100,19	1,63	10,09 ± 0,6	142,92 ± 5,4	8,03 ± 0,3	81,24 ± 5,4
10	50,00	71,50	0,50	8,06 ± 0,1	122,85 ± 0,5	6,78 ± 0,1	77,08 ± 4,4
11	11,50	110,00	0,50	0,97 ± 0,0	15,37 ± 0,6	0,43 ± 0,0	6,53 ± 0,3
12	50,00	70,75	1,25	26,87 ± 0,2	388,77 ± 13,9	22,50 ± 0,7	243,26 ± 3,1
13	11,50	110,00	0,50	0,93 ± 0,0	14,75 ± 0,7	0,43 ± 0,0	6,17 ± 0,1
14	50,00	70,00	2,00	60,60 ± 1,0	871,57 ± 18,0	46,72 ± 1,0	473,88 ± 9,3
15	10,00	110,00	2,00	10,00 ± 0,4	147,96 ± 7,8	7,28 ± 0,3	78,76 ± 7,4
16	40,19	80,19	1,63	23,48 ± 0,3	349,63 ± 2,7	18,89 ± 0,1	218,18 ± 11,1

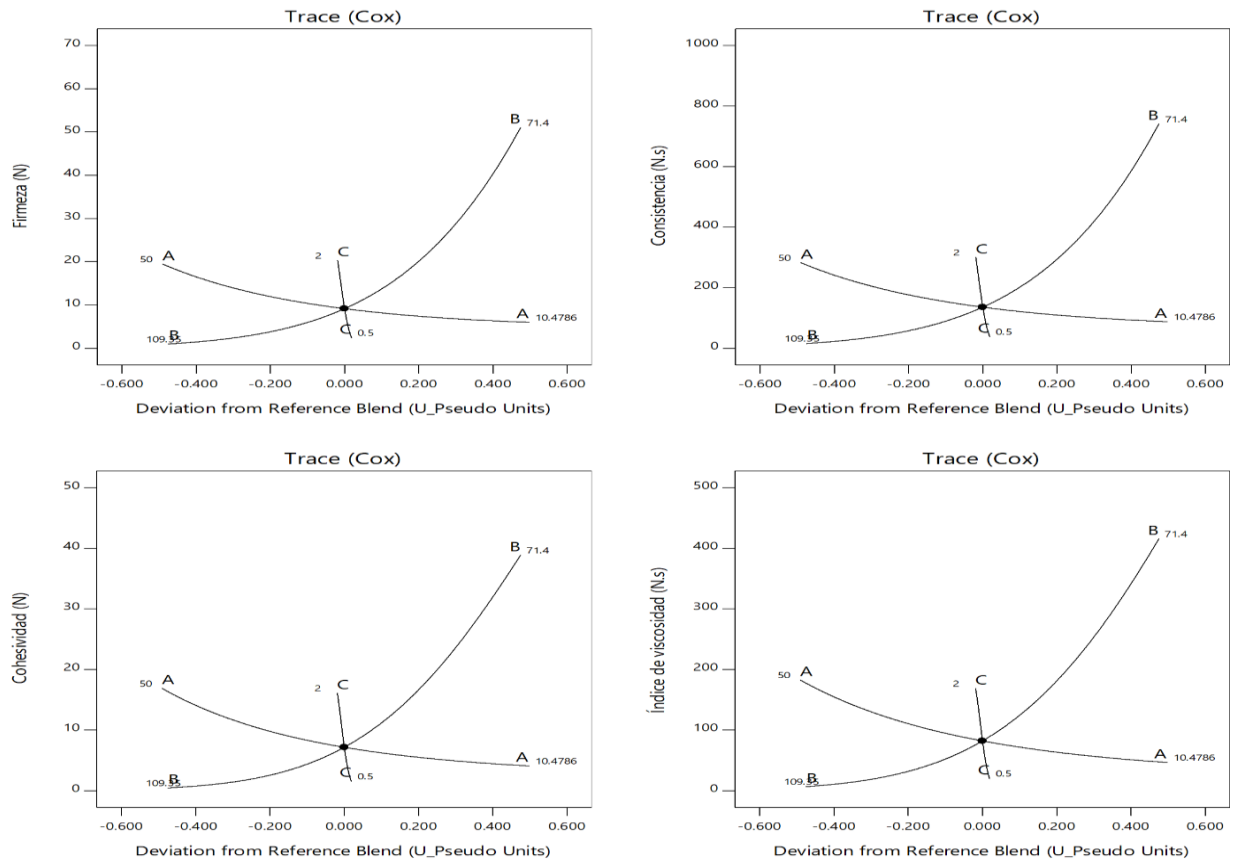


Figura 30: Gráficos de trazas (Cox) para evaluar la influencia de los ingredientes (A: Harina de kiwicha; B: Agua, C: Mezcla de goma xantana y goma de tara, 1:1) en los parámetros de textura en las formulaciones de masas libres de gluten

En la Figura 26 se presenta el efecto de la concentración mínima (0,5%) y máxima (2%) de la mezcla de gomas sobre la consistencia de las diferentes mezclas de harina de kiwicha y agua. En esta figura se puede observar que la inclusión de 0,5% de mezcla de gomas tuvo un menor efecto en la consistencia de las masas con diferentes concentraciones de harina de kiwicha y agua; mientras que la inclusión de 2% de la mezcla de las gomas produjo un incremento de la consistencia de la masa entre 6 a 10 veces.

Comparando la consistencia de las masas con la concentración máxima de las gomas (goma xantana, goma de tara y mezcla de gomas) (2%) y concentración máxima de harina (50%) y mínima de agua (70%) se puede apreciar que la inclusión de la mezcla de gomas produjo masas más consistentes seguidos por las masas con goma de tara y goma xantana. Esto demuestra el efecto sinérgico entre las dos gomas, lo cual podría ser ventajoso para aumentar la consistencia de las masas, pudiendo así retener mejor el gas producido durante el proceso de fermentación y permitir su crecimiento durante el horneado.

Tabla 35: Resumen del análisis de varianza y ajuste del modelo matemático seleccionado para explicar el comportamiento de las propiedades texturales de las masas con kiwicha

Experimentos	Variable respuesta	Modelo	ANOVA			Ajuste del modelo				
			F-value	p-value	Lack of Fit (p-value)	R ²	R ² ajustado	R ² predicho	Adeq Precision	
Goma xantana	Firmeza	Cuadrático	1367.39	<0.0001	0.013	0.9985	0.9978	0.9962	120.4053	
	Consistencia	Cuadrático	1497.37	<0.0001	0.018	0.9987	0.998	0.9969	125.8174	
	Cohesividad	Cuadrático	1119.41	<0.0001	0.003	0.9982	0.9973	0.9956	107.6808	
	Índice de viscosidad	Cuadrático	454.79	<0.0001	0.001	0.9956	0.9934	0.9891	62.0154	
Masa libre de gluten con almidón de papa y harina de kiwicha	Goma de tara	Firmeza	Cuadrático	3206.17	<0.0001	0.624	0.9994	0.9991	0.9982	183.7044
		Consistencia	Cuadrático	4332.16	<0.0001	0.203	0.9995	0.9993	0.9988	213.6007
		Cohesividad	Cuadrático	957.39	<0.0001	0.033	0.9979	0.9969	0.9939	98.5607
		Índice de viscosidad	Cuadrático	189.5	<0.0001	0.001	0.9896	0.9843	0.9686	42.94
Mezcla de gomas	Firmeza	Cuadrático	1612.73	<0.0001	0.799	0.9988	0.9981	0.9965	131.1825	
	Consistencia	Cuadrático	2011.93	<0.0001	0.888	0.999	0.9985	0.9971	146.4606	
	Cohesividad	Cuadrático	1227.38	<0.0001	0.306	0.9984	0.9976	0.9958	112.8897	
	Índice de viscosidad	Cuadrático	1471.8	<0.0001	0.408	0.9986	0.998	0.9963	124.0706	

Tabla 36: Modelos polinómicos predichos que muestran el efecto de cada ingrediente (HK: harina de kiwicha; A: Agua; GX: Goma xantana; GT: Goma de tara; MG: Mezcla de gomas) sobre las propiedades texturales de las masas

Experimentos	Parámetros	Modelo matemático predictivo*
Masa libre de gluten con almidón de papa y harina de kiwicha	Firmeza (N)	$\text{Ln (Firmeza)} = 1.46 (\text{HK}) + 3.78 (\text{A}) - 572.99 (\text{GX}) - 1.23 (\text{HK})(\text{A}) + 546.82 (\text{HK})(\text{GX}) + 549 (\text{A})(\text{GX})$
	Goma xantana	
	Consistencia (N.s)	$\text{Ln (Consistencia)} = 4.15 (\text{HK}) + 6.43 (\text{A}) - 569.04 (\text{GX}) - 1.22 (\text{HK})(\text{A}) + 546.36 (\text{HK})(\text{GX}) + 548.96 (\text{A})(\text{GX})$
	Cohesividad (N)	$\text{Ln (Cohesividad)} = 1.22 (\text{HK}) + 3.43 (\text{A}) - 844.78 (\text{GX}) - 0.8905 (\text{HK})(\text{A}) + 813.28 (\text{HK})(\text{GX}) + 836.74 (\text{A})(\text{GX})$
	Índice de viscosidad (N.s)	$\text{Ln (Índice de viscosidad)} = 3.72 (\text{HK}) + 5.76 (\text{A}) - 904.53 (\text{GX}) - 1.07 (\text{HK})(\text{A}) + 884.71 (\text{HK})(\text{GX}) + 903.39 (\text{A})(\text{GX})$
Masa libre de gluten con almidón de papa y harina de kiwicha	Firmeza (N)	$\text{Ln (Firmeza)} = 1.76 (\text{HK}) + 3.87 (\text{A}) - 488.03 (\text{GT}) - 0.981 (\text{HK})(\text{A}) + 433.06 (\text{HK})(\text{GT}) + 462.81 (\text{A})(\text{GT})$
	Goma de tara	
	Consistencia (N.s)	$\text{Ln (Consistencia)} = 4.42 (\text{HK}) + 6.54 (\text{A}) - 426.04 (\text{GT}) - 0.911 (\text{HK})(\text{A}) + 376.95 (\text{HK})(\text{GT}) + 401.74 (\text{A})(\text{GT})$
	Cohesividad (N)	$\text{Ln (Cohesividad)} = 1.6 (\text{HK}) + 3.67 (\text{A}) - 972.95 (\text{GT}) - 0.654 (\text{HK})(\text{A}) + 911.85 (\text{HK})(\text{GT}) + 967.27 (\text{A})(\text{GT})$
	Índice de viscosidad (N.s)	$\text{Ln (Índice de viscosidad)} = 4.16 (\text{HK}) + 5.91 (\text{A}) - 1750.97 (\text{GT}) + 1697.22 (\text{HK})(\text{GT}) + 1781.23 (\text{A})(\text{GT})$
Masa libre de gluten con almidón de papa y harina de kiwicha	Firmeza (N)	$\text{Ln (Firmeza)} = 2.31 (\text{HK}) + 4.01 (\text{A}) - 780.92 (\text{MG}) - 0.646 (\text{HK})(\text{A}) + 748.34 (\text{HK})(\text{MG}) + 763.25 (\text{A})(\text{MG})$
	Mezcla de gomas	
	Consistencia (N.s)	$\text{Ln (Consistencia)} = 4.99 (\text{HK}) + 6.69 (\text{A}) - 704.72 (\text{MG}) - 0.577 (\text{HK})(\text{A}) + 674.27 (\text{HK})(\text{MG}) + 687.92 (\text{A})(\text{MG})$
	Cohesividad (N)	$\text{Ln (Cohesividad)} = 2.01 (\text{HK}) + 3.73 (\text{A}) - 1032.03 (\text{MG}) - 0.408 (\text{HK})(\text{A}) + 995.6 (\text{HK})(\text{MG}) + 1026.18 (\text{A})(\text{MG})$
	Índice de viscosidad (N.s)	$\text{Ln (Índice de viscosidad)} = 4.33 (\text{HK}) + 6.1 (\text{A}) - 992.7 (\text{MG}) - 0.394 (\text{HK})(\text{A}) + 967.54 (\text{HK})(\text{MG}) + 988.68 (\text{A})(\text{MG})$

4.4.10. Optimización de las propiedades texturales de las masas con harina de kiwicha y diferentes gomas

La optimización de las propiedades texturales de las masas con harina de kiwicha y diferentes gomas se realizó utilizando el enfoque de la función de deseabilidad, donde el objetivo de la optimización fue determinar la formulación que imite las propiedades texturales de la masa control (100% almidón de papa, 0,5% de goma xantana y 75% de agua), las cuales fueron: $3,69 \pm 0,2$ N de firmeza; $56,46 \pm 3,7$ N.s de consistencia; $2,70 \pm 0,2$ N de cohesividad y $36,18 \pm 2,1$ N.s de índice de viscosidad. Como se explicó en la optimización de las masas libres de gluten con harina de quinua, los valores de las propiedades texturales de la masa control fueron ligeramente superiores a los reportadas en la tercera parte del estudio, debido a que se cambió de proveedor del almidón de papa, el cual ventajosamente pudo proporcionar valores de firmeza comparables con los reportados por Korus *et al.*, (2009) y Ziobro *et al.*, (2013a), quienes estandarizan la firmeza de las masas libres de gluten a 3,9 N.

Se utilizó el enfoque de deseabilidad para encontrar las proporciones óptimas de los ingredientes (harina de kiwicha, agua y goma) que puedan imitar las propiedades texturales de una masa control. Como se conoce los valores de la función de deseabilidad varía de 0 a 1, siendo 1 el máximo valor de coincidencia de la predicción de las respuestas (Buruk Sahin *et al.*, 2016) (Myers *et al.*, 2016).

En la Tabla 37 se muestran las formulaciones optimizadas de masas con harina de kiwicha (OP1 y OP2) para cada experimento con diferentes tipos de gomas. Según el valor de deseabilidad (0,99), las formulaciones OP1 fueron las indicadas por el software, como las que podrían imitar correctamente las propiedades texturales de la masa control. Sin embargo, nuestro objetivo también fue buscar formulaciones que contengan elevado contenido de harina de kiwicha, es por eso que seleccionaron las formulaciones OP2, las cuales llegan a contener, entre 40,6 – 46,2% de harina de kiwicha. Como se puede observar, las formulaciones de masas libres de gluten con harina de kiwicha OP2 obtuvieron similares valores de deseabilidad que las formulaciones OP1. La validación de las propiedades texturales optimizadas se realizó gráficamente (Figura 31) comparando el perfil textural de la masa control con el perfil textural de las formulaciones optimizadas con harina de kiwicha y diferentes tipos de gomas. En la Figura 31, se puede apreciar que el perfil textural de las

formulaciones optimizadas OP1 con goma xantana y mezcla de gomas fueron muy semejantes al perfil textural de la masa control, sin embargo, para el caso de la formulación optimizada con goma de tara, el perfil textural de la masa optimizada fue menor que la masa control.

Con respecto al perfil textural de las formulaciones de masas optimizadas OP2, las formulaciones con goma xantana y goma de tara presentaron un perfil textural muy semejante a la masa control, pero el perfil textural de la masa con mezcla de gomas fue ligeramente mayor que la masa control. Por lo tanto, se puede afirmar que las ecuaciones predictivas de los modelos matemáticos seleccionados predijeron satisfactoriamente las propiedades texturales de las masas con harina de kiwicha.

Tabla 37: Formulaciones óptimas y propiedades texturales predichas de masas libres de gluten con harinas de kiwicha y diferentes tipos y combinación de gomas

Ingredientes	Óptimos con goma xantana		Óptimos con goma de tara		Óptimos con mezcla de gomas	
	OP1	OP2	OP1	OP2	OP1	OP2
Harina de kiwicha	10,0	40,6	26,4	41,8	11,6	46,2
Agua	110,0	80,9	94,6	79,7	109,2	75,3
Goma	2,0	0,5	1,1	0,5	1,2	0,5
Respuestas						
Firmeza (N)	4,0	5,1	4,0	4,0	4,0	4,0
Consistencia (N.s)	59,2	71,4	62,9	64,5	58,1	63,8
Cohesividad (N)	3,1	3,0	3,1	3,6	3,0	3,7
Índice de viscosidad (N.s)	37,2	38,6	37,4	51,8	36,6	42,6
Deseabilidad	0,99	0,98	0,99	0,98	0,99	0,99

Al analizar el contenido de las formulaciones de las masas optimizadas OP1 con harina de kiwicha, fue evidente notar que la inclusión de bajos niveles de harina de kiwicha (10 – 26,4%) a la masa a base de almidón, cambió significativamente su requerimiento de agua (94,6 – 110%) y de goma (1,1 – 2%) con la finalidad de que la masa con harina de kiwicha pueda imitar a la masa control.

También, se evidenció el efecto sinérgico que presentó la goma xantana y la goma de tara, al requerir menor concentración (1,2%) para producir el mismo efecto en las propiedades texturales de la masa con goma xantana.

Según los resultados obtenidos, en esta investigación, se puede generalizar diciendo que el nivel de goma utilizado en las formulaciones está íntimamente relacionado con el contenido de agua del sistema y que el uso de las gomas se puede disminuir incrementando el nivel de harina de kiwicha al sistema o mezclando, aunque esto conlleva a una disminución de agua en el sistema.

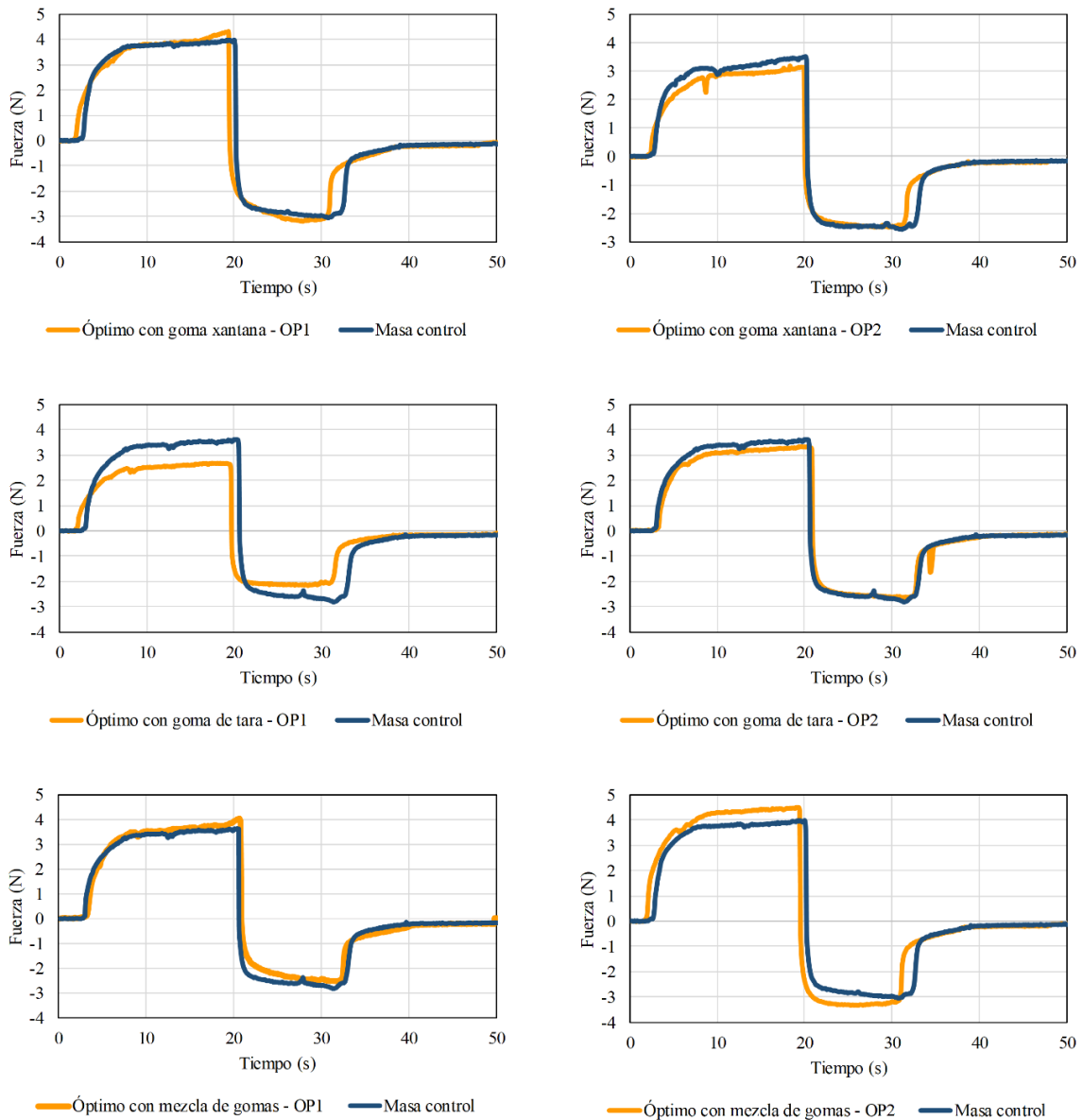


Figura 31: Validación gráfica del perfil textural de la masa control con las formulaciones óptimas (OP1 – OP2) con harina de kiwicha y diferentes gomas (goma xantana, goma de tara y mezcla de ambas gomas)

4.4.11. Comportamiento reológico de las formulaciones óptimas con harina de kiwicha (OP1 y OP2) durante el calentamiento y enfriamiento

Con la finalidad de evaluar el comportamiento reológico de las masas optimizadas con harina de kiwicha y diferentes gomas durante el calentamiento y enfriamiento, se realizó la prueba de “*pasting*” a las formulaciones OP1 y OP2 sin la adición de levadura. En la Tabla 38 se muestran los valores de viscosidad pico (VP), viscosidad mínima (TV), viscosidad de quiebre (BD), viscosidad final (FV), viscosidad de retrogradación (VR) y la temperatura pico (PT) de las masas optimizadas con harina de kiwicha y diferentes gomas (goma xantana, goma de tara y mezcla de gomas). En dicho Tabla se puede apreciar que las formulaciones OP1 obtuvieron mayores valores de VP comparado con las formulaciones OP2, esto fue debido a que las formulaciones OP1 contenían una mayor proporción de almidón de papa. Así mismo, se pudo observar que la VP de las masas OP2 fueron similares y no se evidenció diferencia significativa ($p>0.05$) entre las formulaciones con diferentes tipos de gomas.

Con respecto a la viscosidad de caída o también conocida como viscosidad mínima (VM), se encontró que todas las formulaciones OP2 mostraron los menores valores de VM evidenciando una buena estabilidad durante el calentamiento, mientras que el mayor de VM fue logrado por las formulaciones OP1 con goma xantana. La diferencia entre VP – VM es conocido como la viscosidad de quiebre, por lo tanto, fue lógico encontrar que las formulaciones OP1 obtuvieron mayores valores que las formulaciones OP2. Este parámetro está relacionado con la VP, debido a que mientras más viscosa sea la pasta mayores valores de caída pueden experimentar (Ragae y Abdel-Aal, 2006), por lo tanto, se puede deducir que las formulaciones OP2 que presentan elevadas proporciones de harina de kiwicha, fueron estables al calentamiento.

La viscosidad final (VF) de las formulaciones OP1 con goma xantana fue mayor que las formulaciones OP1 con mezcla de gomas y goma de tara, presumiendo, que esta masa seguirá siendo viscosa después del ciclo de calentamiento. Con respecto a la viscosidad de retrogradación (VR) se evidenció que las todas las formulaciones OP2, las cuales contienen elevado contenido de harina de kiwicha en su composición, obtuvieron menores valores de viscosidad que las formulaciones OP1. Por lo tanto, se esperaría que los panes elaborados con las formulaciones OP2 se endurezcan lentamente (Ragae y Abdel-Aal, 2006; Rodríguez-Sandoval *et al.*, 2015).

No se evidenciaron diferencias significativas ($p > 0,05$) en la temperatura pico (PT) o también conocida como la temperatura en que se logra la máxima viscosidad durante el calentamiento entre las formulaciones OP1 y OP2. La explicación del comportamiento reológico de las formulaciones con harina de kiwicha, están relacionadas a su almidón, el cual presente bajos niveles de amilosa (3,0–12,5%) y por ende evidencia bajos niveles de viscosidad durante el calentamiento y enfriamiento (Rosell *et al.*, 2009).

Tabla 38: Propiedades de pasta de las formulaciones optimizadas de harina de kiwicha (OP1 y OP2) con diferentes gomas

Formulación con harina de kiwicha		VP Pa.s	TV Pa.s	BD Pa.s	FV Pa.s	VR Pa.s	PT °C
Óptimos con goma xantana	OP1	5,41 ± 0,14 ^b	1,63 ± 0,00 ^d	3,78 ± 0,14 ^e	2,89 ± 0,04 ^d	1,26 ± 0,03 ^b	72,75 ± 0,56 ^{ab}
	OP2	3,00 ± 0,07 ^a	1,24 ± 0,02 ^b	1,75 ± 0,09 ^b	2,16 ± 0,03 ^b	0,92 ± 0,05 ^a	70,25 ± 0,58 ^{ab}
Óptimos con goma de tara	OP1	3,54 ± 0,11 ^{ab}	1,28 ± 0,07 ^b	2,26 ± 0,04 ^c	2,44 ± 0,03 ^c	1,16 ± 0,05 ^b	72,31 ± 2,28 ^{ab}
	OP2	2,54 ± 0,05 ^a	1,19 ± 0,01 ^{ab}	1,34 ± 0,06 ^a	2,09 ± 0,03 ^{ab}	0,90 ± 0,04 ^a	73,47 ± 0,56 ^b
Óptimos con mezcla de gomas	OP1	4,87 ± 0,08 ^{ab}	1,45 ± 0,01 ^c	3,42 ± 0,09 ^d	2,58 ± 0,03 ^c	1,13 ± 0,02 ^b	69,03 ± 0,00 ^a
	OP2	2,38 ± 0,05 ^a	1,07 ± 0,04 ^a	1,31 ± 0,01 ^a	1,93 ± 0,09 ^a	0,86 ± 0,05 ^a	71,86 ± 0,58 ^{ab}

^{a-c} Las letras minúsculas diferentes en superíndice muestran diferencia significativa ($p < 0,05$) entre los tratamientos. VP:

Viscosidad pico; VM: Viscosidad mínima; VF: Viscosidad final; VR: Viscosidad de retrogradación; PT: Temperatura pico.

4.4.12. Características físicas de los panes libres de gluten óptimos (OP1 y OP2) con harina de kiwicha

Las características físicas de los panes elaborados con las masas optimizadas con harina de kiwicha y diferentes gomas se muestran en la Tabla 39. En esta tabla se puede evidenciar que las pérdidas de agua y material después del proceso de cocción fueron mayores en la masa OP1 con goma de tara y OP1 con mezcla de gomas (32,58 y 33,89%). Las menores pérdidas de material por cocción se registraron en las masas optimizadas con goma xantana OP1 y OP2 (29,45 y 27,32%). Este resultado estuvo relacionado con la capacidad de absorción de agua que presentan las gomas utilizadas (goma xantana y goma de tara), el almidón de papa y la harina de kiwicha.

Como se ha explicado, en la segunda parte de la presente investigación, la goma xantana puede atrapar a los gránulos de almidón, inhibiendo su completa gelatinización y por ende la menor pérdida de humedad en el proceso de cocción. Mientras que, para el caso de la goma de tara, esta puede localizarse en forma de lámina a los costados del gránulo del

almidón, permitiéndole gelatinizar completamente y por ende le permite perder rápidamente agua, durante el calentamiento (Horstmann *et al.*, 2018). También se ha informado que cuando se incluyen proteínas a las masas libres de gluten que tengan la capacidad de absorber agua, permiten evitar las pérdidas de material durante la cocción, lo cual resultaría ventajoso, ya que mientras más húmeda sea la miga, se espera que esta tenga una textura más suave y se puede ralentizar el proceso de envejecimiento (Horstmann *et al.*, 2017).

Tabla 39: Características de calidad de las formulaciones óptimas de los panes libres de gluten con harina de kiwicha

Características físicas	Óptimo con goma xantana		Óptimo con goma de tara		Óptimo con mezcla de gomas	
	OP1	OP2	OP1	OP2	OP1	OP2
Pérdidas por cocción (%)	29,45 ± 0,4	27,32 ± 0,8	33,89 ± 1,1	30,46 ± 1,3	32,58 ± 0,4	30,58 ± 1,8
Volumen específico (mL/g)	2,48 ± 0,0	2,44 ± 0,1	2,68 ± 0,1	2,79 ± 0,1	2,34 ± 0,1	2,04 ± 0,1
Dureza de la miga (N)	4,42 ± 0,4	3,56 ± 0,3	nd	nd	3,95 ± 0,5	3,48 ± 0,5
Cohesividad	0,32 ± 0,0	0,21 ± 0,0	nd	nd	0,31 ± 0,0	0,31 ± 0,0
Elasticidad	0,95 ± 0,0	0,65 ± 0,0	nd	nd	0,90 ± 0,0	0,83 ± 0,0
Gomosidad (N)	1,47 ± 0,1	0,75 ± 0,1	nd	nd	1,22 ± 0,1	1,09 ± 0,1
Masticabilidad (N)	1,31 ± 0,1	0,49 ± 0,0	nd	nd	1,10 ± 0,1	0,91 ± 0,1

Los panes con más elevados volúmenes específicos fueron logrados con la goma de tara (2,68 – 2,79 mL/g); sin embargo, tanto en las formulaciones OP1 y OP2 con esta goma, se evidenció el colapso de la estructura. En cambio, el volumen específico de los panes elaborados con las formulaciones OP1 con goma xantana y mezcla de gomas (2,34 – 2,48 mL/g) fueron comparables con las formulaciones OP1 con harina de quinua, pero fueron inferiores que el volumen específico del pan control (2,77 mL/g). Por otra parte, el pan OP2 con mezcla de gomas, presentó el menor volumen específico (2.04 mL/g).

Valores similares de volúmenes específicos de panes libres de gluten con harina de amaranto (20%) y 0.35% de goma xantana han sido reportados por Alencar *et al.* (2015), quienes señalan que el volumen específico de los panes desarrollados con diferentes edulcorantes (sucralosa, estevia y mezcla de sucralosa con acesulfame K) exhibieron volúmenes específicos de 2,30, 2,50 y 2,65 mL/g.

Panes con harina de amaranto (50%), almidón de papa (50%) y goma xantana (0.5%) han sido desarrollados por Alvarez-Jubete *et al.* (2010a), con bajos volúmenes específicos (1,31

mL/g). Así mismo, Schoenlechner *et al.* (2010), reportan una formulación optimizada con harina de amaranto (40%), y demás componentes como almidones como maíz, papa y harina de arroz con 80% de agua que presentaron similares volúmenes específico (1,3 mL/g). Dichos autores, también señalan que el agua fue el parámetro más crítico en influir en la calidad final del pan, como el volumen específico, la textura de la miga y la densidad de los poros.

También, se han informado en la literatura formulaciones de panes libres de gluten con harina de amaranto con mayores volúmenes que lo reportado en esta investigación. Por ejemplo, Calderón de la Barca *et al.* (2010), informan que es posible obtener panes libres de gluten con hasta 3,5 mL/g de volumen específico, cuando se formulan con 70% de harina popeada de amaranto y 30% de harina integral de amaranto, sin la adición de emulsionantes y con 58% de agua.

Con respecto a las propiedades de textura de la miga, el pan OP2 con goma xantana y OP2 con mezcla de gomas, presentaron migas menos firmes (3,48 – 3.56 N) que la formulación OP2 con goma de tara. Mientras que en las formulaciones OP1, la miga menos firme fue obtenida con la formulación OP1 con mezcla de gomas, seguido de la formulación OP1 con goma xantana. Como se muestra en la Tabla 39, no fue posible medir las propiedades texturales de la miga de las formulaciones OP1 y OP2 con goma de tara porque la estructura colapsó durante el horneado. Como se ha explicado anteriormente, este problema se puede deber a la reducción de la viscosidad de las formulaciones de masas con goma de tara se puede ver reducida durante el calentamiento, promoviendo el fenómeno de coalescencia de las burbujas de gas.

De acuerdo con Alencar *et al.* (2015), la dureza o firmeza del pan está correlacionada con la mordida humana. Los panes desarrollados, por los autores, con 20% de harina de amaranto y demás ingredientes como harina de arroz, almidón de papa, almidón de yuca y almidón de yuca agria con 0,35% de goma xantana y 82,25% de agua, exhibieron migas con 3,8 – 5,4 N de firmeza. Así mismo, Schoenlechner *et al.* (2010) reportan valores comparables de firmeza de la miga, entre 3 a 5 N, en formulaciones de panes libres de gluten con 40% de harina de amaranto y demás ingredientes como como almidones como maíz, papa y harina de arroz con 80% de agua.

También, se han informado mayores valores de firmeza en las migas de panes libres de gluten con harina de amaranto. Alvarez-Jubete *et al.* (2010a), reportan valores de firmeza de la miga entre 15 a 17 N en panes con 50% de harina de amaranto, 50% de almidón de papa, 87% de agua y 0,5% de goma xantana.

Según Alencar *et al.*, (2015), la dureza o firmeza del pan está relacionada con la fuerza aplicada que causa la ruptura o deformación de las muestras, y está correlacionada con la mordida humana. Hager y Arendt (2013) mostraron que la goma de xantana fortaleció la estructura de la miga del pan sin gluten, es decir, el pan suplementado con goma de xantano mostró un aumento en la dureza.

La miga de los panes con la formulación OP2 con goma xantana fue menos cohesiva y menos elástica que las demás formulaciones. Comparables valores de cohesividad en panes con harina de amaranto (50%), almidón de papa (50%) y goma xantana (0,5%) han sido reportados por Alvarez-Jubete *et al.* (2010a), quienes señalan que la cohesividad del pan con amaranto presentó una cohesividad de 0,35, la cual no se vio afectada significativamente ($p>0,05$) después de 120 horas. De la misma manera, con respecto a la elasticidad de la miga, la cual mantuvo un valor entre 0,7 y 0,8 durante 120 horas. Estos valores fueron comparables con los resultados encontrados en la presente investigación.

Las formulaciones OP1 con goma xantana y OP1 con mezcla de gomas produjeron migas más gomosas (1,47 – 1,22 N) que los panes OP2 (0,75 – 1,09 N), esto se debió básicamente al menor contenido de goma que llevan estas formulaciones OP2. Con respecto a la masticabilidad de la miga, el valor más elevado se obtuvo en la miga de la formulación OP1 con goma xantana, seguido de la formulación OP1 con mezcla de gomas.

En la Figura 32 se puede apreciar que todos los panes presentaron cortezas lisas y sin grietas, lo cual resultaría atractivo al consumidor, pero las formulaciones (OP1 y OP2) con goma de tara presentaron el defecto de colapso de la miga, producto de la coalescencia de las células de gas y debilitamiento de la estructura durante el horneado.

De los pocos trabajos publicados sobre el desarrollo de panes libres de gluten con harina de kiwicha, las gomas utilizadas fueron goma xantana (0,35 – 0,5%) (Alencar *et al.*, 2015; Alvarez-Jubete *et al.*, 2010a), goma guar (1,9%) (Gambués *et al.*, 2002) goma de algarroba

(cantidad no especificada) (Schoenlechner *et al.*, 2010). Según los resultados obtenidos en esta investigación, el nivel de goma xantana utilizada dependerá del nivel de hidratación de la masa, por ejemplo, masas con bajo nivel de harina de kiwicha (10%) y elevado contenido de almidón de papa (90%) necesitarán elevados niveles de hidratación (110%) y elevadas concentraciones de goma xantana (2,0%) para poder imitar las propiedades texturales de una masa control, la cual se caracteriza por ser fluida. Por otro lado, cuando se utiliza una elevada proporción de harina de kiwicha (40,6%) será necesario bajos niveles de agua (80,9%) y bajos niveles de goma xantana (0,5%).

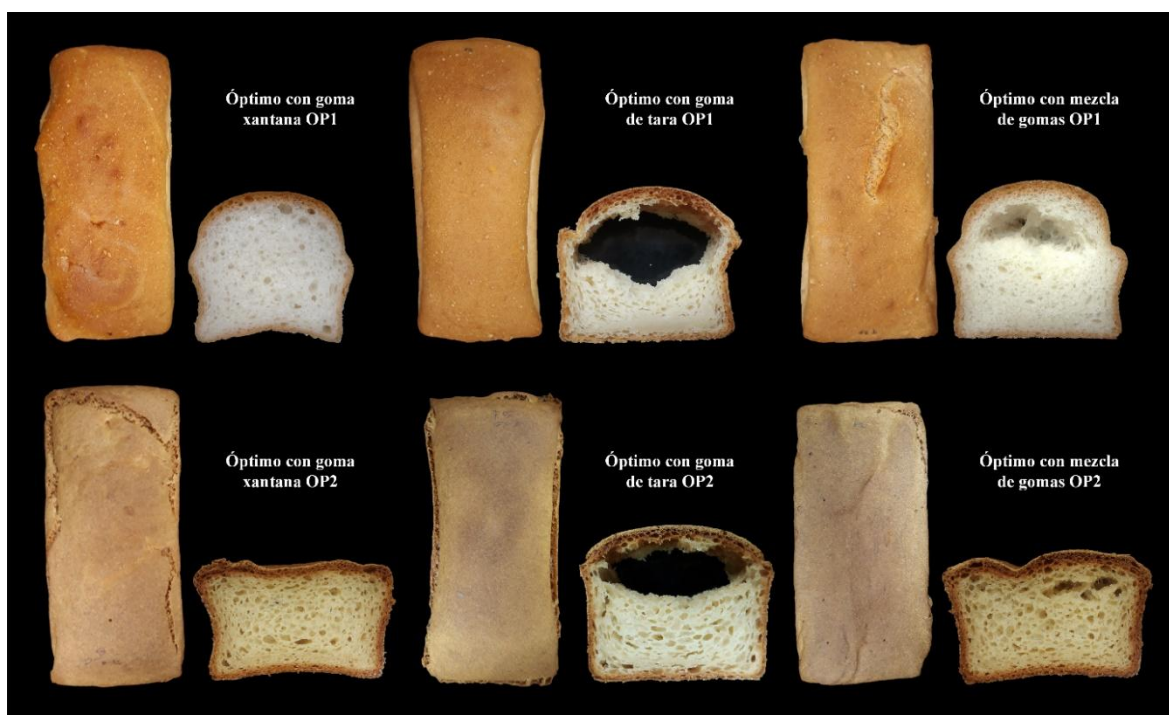


Figura 32: Imágenes representativas de los panes libres de gluten optimizados con harinas de kiwicha y diferentes tipos de gomas

Por otro lado, la mezcla de goma xantana con goma de tara se mostró prometedora para el desarrollo de panes libres de gluten con harina de kiwicha, ya se evidenció un efecto sinérgico en las propiedades texturales de las masas, incrementando las mismas al ser utilizadas en menores proporciones (0,5 – 1,2 %), que cuando son utilizadas por separado. Así mismo, la mezcla de gomas proporcionó estabilidad a las masas durante el horneado y pudo mantener la estructura alveolar de la miga, incluso, proporcionó migas menos duras que la formulación OP1 con goma xantana.

4.5. OPTIMIZACIÓN DEL CONTENIDO DE HARINA DE TARWI Y AGUA EN MASAS LIBRES DE GLUTEN A BASE DE ALMIDÓN DE PAPA CON HARINA DE QUINUA Y ALMIDÓN DE PAPA CON HARINA DE KIWICHA

En la quinta parte del trabajo de investigación se utilizaron como base las formulaciones optimizadas OP2 de quinua y kiwicha con la mezcla de gomas (goma de tara y goma xantana, 1:1), con el objetivo de incluir la harina de tarwi en remplazo parcial del almidón de papa. Para ello, se utilizó el Diseño Central Compuesto Rotacional (DCCR). Con los antecedentes obtenidos en el desarrollo de la presente investigación, con respecto a la elevada capacidad de absorción de agua por parte de la harina de tarwi, así como, los antecedentes de trabajos de investigación que utilizaron cierto nivel de harinas de leguminosas en las formulaciones de panes libres de gluten (Sciarini *et al.*, 2010b; Sciarini *et al.*, 2012; Foschia *et al.*, 2017; Tsatsaragkou *et al.*, 2017). Se decidió experimentar con los niveles entre 10 a 30% de harina de tarwi y 75 – 160% de agua. La decisión de incluir la harina de tarwi en la formulación de masas libres de gluten, es que esta leguminosa es originaria de Perú (Atchison *et al.*, 2016) y tiene un mayor contenido de proteínas (57,4 – 52,9%) que las otras especies de lupinos comerciales (*L. angustifolius*, *L. albus* y *L. luteus*), que pueden contener entre 33,8 - 39% de proteínas (Ballester *et al.*, 1980; Lqari *et al.*, 2002; Rosell *et al.*, 2009). Se sabe que las propiedades tecno funcionales, como la solubilidad, la capacidad de retención de agua y la capacidad de formación de espuma de las proteínas de las leguminosas tienen efectos significativos sobre las propiedades de las masas, haciéndolas atractivas para mejorar la calidad nutricional y física del pan sin gluten (Boukid *et al.*, 2019; Foschia *et al.*, 2017; Horstmann *et al.*, 2017). Aunque la mayoría de las investigaciones reportadas en la literatura se refieren al uso de harina o proteína de lupino europeo, se ha investigado muy poco sobre los efectos de la adición de harina de tarwi en la formulación de panes sin gluten.

Las combinaciones de las formulaciones experimentadas se muestran en la Tabla 40.

Tabla 40: Formulaciones obtenidas del DCCR para determinar el nivel óptimo de harina de tarwi y agua en masas libres de gluten a base de almidón de papa con harina de quinua o harina de kiwicha

Formulación	Harina de tarwi (%)	Agua (%)
F1	5.9	117.5
F2	10.0	160.0
F3	10.0	75.0
F4	20.0	117.5
F5	20.0	117.5
F6	20.0	117.5
F7	20.0	117.5
F8	20.0	177.6
F9	20.0	57.4
F10	20.0	117.5
F11	30.0	160.0
F12	30.0	75.0
F13	34.1	117.5

4.5.1. Propiedades texturales de las masas con harina de tarwi

En la Tabla 41, se muestran los resultados de las propiedades texturales de las masas libres de gluten a base de almidón de papa y harina de quinua con diferentes proporciones de harina de tarwi y agua. De la misma forma, en la Tabla 42, se muestran las propiedades texturales de las masas desarrolladas, pero con harina de kiwicha. Debido a que algunas formulaciones presentaron muy poco contenido de agua para la elevada cantidad de harina de tarwi (F9 y F12) no fue posible realizar la determinación de los parámetros de cohesividad e índice de viscosidad de la masa, ya que esta masa era muy compacta y poco fluida para que se realice el retroceso del plunger en la prueba de *Back Extrusion*. Es por eso, que el análisis del comportamiento de las formulaciones y la optimización de las respuestas se realizó sólo con los parámetros de firmeza y consistencia de la masa, los cuales fueron obtenidos en la primera parte de la prueba de *Back Extrusion*.

Para ambos tipos de masas, el menor valor de firmeza y consistencia se evidenció en las formulaciones que contenían elevados contenidos de agua en su composición (F2 y F8 para ambos experimentos), independientemente del contenido de harina de tarwi experimentado. Por otro lado, las masas más firmes y consistentes se evidenciaron en las formulaciones con poco contenido de agua (F9 para ambos experimentos). Estas respuestas, de por sí, señalan la gran influencia que tiene el agua en las propiedades texturales de las masas, las cuales dependerán también en gran medida del tipo de ingredientes se utilizan en las formulaciones. En la actualidad existen pocos reportes de las propiedades texturales de las masas libres de gluten con harinas de leguminosas. Entre esos pocos trabajos, se encuentran las investigaciones realizadas por Sciarini *et al.* (2010b) y Sciarini *et al.* (2012), quienes reportan valores de fuerza de extrusión de masas libres de gluten con harina de soya. En sus primeros trabajos Sciarini *et al.* (2010) reportan que la fuerza de extrusión (gf) de las masas libres de gluten con harina de maíz (90%) y harina de soya (10%) fue de 50,82 gf, lo que equivale a 0,49 N; y las masas con harina de arroz (80%) y harina de soya (20%) fue de 1251,48 gf, lo que equivale a 12,3 N. Las formulaciones en mención se reportan que fueron elaboradas con 218% y 110% de agua, respectivamente, señalando que se precisa elevado contenido de agua en las formulaciones de panes con harina de soya porque sus proteínas tienen una alta capacidad de absorción de agua, las cuales pueden interferir con la completa gelatinización de los almidones.

En una investigación posterior, Sciarini *et al.* (2012) señalan haber realizado una prueba textural de penetración a la masa libre de gluten compuesta por 45% de harina de arroz, 45% de almidón de yuca y 10% harina de soya, pero ahora con 65% de agua para los tratamientos sin hidrocoloides y 75% cuando se adicionó 0.5% de goma xantana, carboximetilcelulosa, carragenano y alginato, obteniendo valores de resistencia a la penetración de las masas entre 0,22 N y 0,45 N. Los autores señalan que obtuvieron una correlación negativa ($r = -0.80$, $p < 0.05$) entre la resistencia de la masa y el volumen específico. Por lo tanto, es lógico pensar que mientras menos firmes sean las masas, se podrían obtener panes con mayor volumen.

Tabla 41: Propiedades texturales de masas libres de gluten a base de almidón de papa y harina de quinua con diferentes proporciones de harina de tarwi y agua

Formulación	Harina de tarwi	Agua	Firmeza	Consistencia	Cohesividad	Índice de viscosidad
	%	%	N	N.s	N	N.s
F1	5,9	117,5	1,68 ± 0,1	26,21 ± 1,0	1,04 ± 0,0	14,79 ± 0,9
F2	10,0	160,0	0,81 ± 0,0	12,38 ± 0,2	0,31 ± 0,0	4,41 ± 0,2
F3	10,0	75,0	14,15 ± 0,5	206,31 ± 8,6	11,90 ± 0,5	124,91 ± 8,3
F4	20,0	117,5	3,52 ± 0,2	53,54 ± 2,2	2,61 ± 0,1	33,25 ± 2,2
F5	20,0	117,5	3,56 ± 0,3	52,79 ± 1,8	2,43 ± 0,1	31,65 ± 1,0
F6	20,0	117,5	3,44 ± 0,3	50,06 ± 2,7	2,32 ± 0,1	30,38 ± 1,4
F7	20,0	117,5	3,15 ± 0,1	48,86 ± 1,6	2,35 ± 0,1	30,68 ± 0,3
F8	20,0	177,6	0,72 ± 0,0	10,63 ± 0,6	0,25 ± 0,6	3,48 ± 0,3
F9	20,0	57,4	181,58 ± 8,5	2366,83 ± 197	*nd	*nd
F10	20,0	117,5	3,37 ± 0,1	51,58 ± 1,1	2,40 ± 0,1	31,77 ± 1,4
F11	30,0	160,0	1,54 ± 0,2	22,99 ± 1,4	0,87 ± 0,1	12,50 ± 0,7
F12	30,0	75,0	65,55 ± 2,1	826,08 ± 48,5	*nd	*nd
F13	34,1	117,5	7,28 ± 0,5	105,88 ± 7,3	5,97 ± 0,5	66,82 ± 5,2

Tabla 42: Propiedades texturales de masas libres de gluten a base de almidón de papa y harina de kiwicha con diferentes proporciones de harina de tarwi y agua

Formulación	Harina de tarwi	Agua	Firmeza	Consistencia	Cohesividad	Índice de viscosidad
	%	%	N	N.s	N	N.s
F1	5,9	117,5	1,50 ± 0,1	23,23 ± 0,8	0,98 ± 0,1	14,32 ± 0,8
F2	10,0	160,0	0,69 ± 0,1	10,28 ± 0,4	0,28 ± 0,0	4,31 ± 0,0
F3	10,0	75,0	13,87 ± 0,4	200,94 ± 4,1	12,82 ± 1,0	127,55 ± 2,4
F4	20,0	117,5	2,57 ± 0,0	39,73 ± 1,0	2,04 ± 0,1	26,28 ± 0,1
F5	20,0	117,5	2,64 ± 0,1	39,76 ± 1,8	2,01 ± 0,1	25,32 ± 1,5
F6	20,0	117,5	2,74 ± 0,3	40,87 ± 2,2	2,00 ± 0,1	25,33 ± 0,8
F7	20,0	117,5	2,78 ± 0,2	41,03 ± 0,8	2,07 ± 0,1	26,40 ± 1,5
F8	20,0	177,6	0,67 ± 0,1	9,56 ± 0,4	0,23 ± 0,0	3,23 ± 0,4
F9	20,0	57,4	253,41 ± 17,6	3387,36 ± 52,7	*nd	*nd
F10	20,0	117,5	2,59 ± 0,0	39,25 ± 1,7	2,02 ± 0,1	25,71 ± 1,5
F11	30,0	160,0	1,11 ± 0,1	16,83 ± 0,7	0,58 ± 0,0	8,38 ± 0,5
F12	30,0	75,0	79,90 ± 2,7	1115,88 ± 4,1	*nd	*nd
F13	34,1	117,5	5,56 ± 0,2	81,98 ± 2,9	4,66 ± 0,1	54,28 ± 1,6

Para modelar el comportamiento de las propiedades texturales de las formulaciones con harina de tarwi se tuvo que realizar una transformación de los resultados en logaritmo natural, esto fue sugerido por el programa estadístico utilizado, *Design Expert 11,0v*, debido a la dispersión de los resultados. El resumen del análisis de varianza y ajuste del modelo

cuadrático seleccionado se muestran en la Tabla 43. Según dicho Tabla, el modelo cuadrático fue significativo ($p < 0,0001$) para explicar el comportamiento de las varianzas de los resultados; pero, según la prueba de falta de ajuste del modelo, esta fue significativa ($p < 0,05$), lo que indica que podría existir un modelo de orden superior que puede explicar el comportamiento de las respuestas. Sin embargo, los estadísticos de ajuste del modelo (R^2 , R^2 ajustado y R^2 predicho) estuvieron entre 0,94 y 0,99, lo cual indica que el 94% de la variación observada en la firmeza y consistencia de la masa pudo ser explicada por el modelo cuadrático y la calidad del ajuste fue satisfactorio. Como se muestra en las Figuras 33 y 34 (A1 y B1), los valores predichos por el modelo y los valores experimentales (reales) se correlacionaron correctamente.

Las ecuaciones matemáticas que describen el comportamiento de la firmeza y consistencia de las masas con harina de tarwi se muestran en la Tabla 44. En esta tabla se puede observar que las variables por sí solas (harina de tarwi y agua) fueron significativas para la firmeza y consistencia de la masa, mientras que la interacción de harina de tarwi y agua fue significativa para la variable firmeza. En las Figura 33 y 34 (A y B), también se muestran los gráficos de superficie de respuesta de las variables analizadas, donde se puede ver claramente que los mayores valores de firmeza y consistencia de la masa se lograron en las combinaciones de bajo contenido de agua y elevado contenido de harina de tarwi.

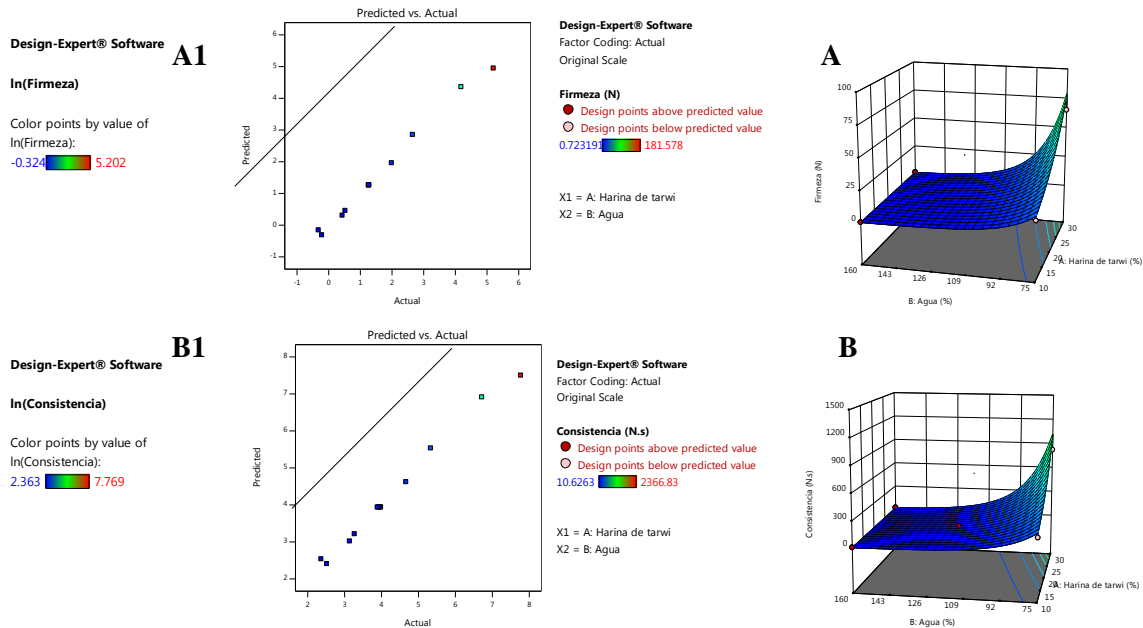


Figura 33: Superficie de respuesta y relación de los valores predichos y reales utilizando el modelo cuadrático para la predicción de la firmeza (A y A1) y la consistencia (B y B1) de la masa compuesta por harina de quinua, almidón de papa y harina de tarwi

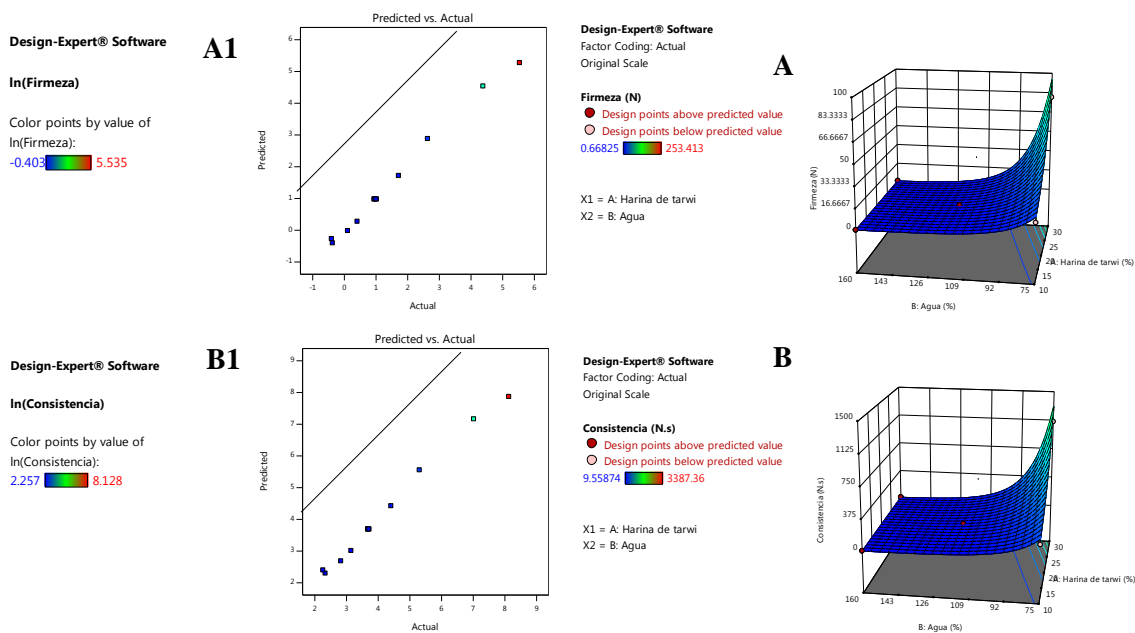


Figura 34: Superficie de respuesta y relación de los valores predichos y reales utilizando el modelo cuadrático para la predicción de la firmeza (A y A1) y la consistencia (B y B1) de la masa compuesta por harina de kiwicha, almidón de papa y harina de tarwi

Tabla 43: Resumen del análisis de varianza y ajuste del modelo matemático seleccionado para explicar el comportamiento de las propiedades texturales de las masas libres de gluten con harina de tarwi

Experimentos	Variable respuesta	ANOVA			Ajuste del modelo				
		Modelo	F-value	p-value	Lack of Fit (p-value)	R ²	R ² ajustado	R ² predicho	Adeq Precision
Masa a base de almidón de papa con harina de quinua y harina de tarwi	Firmeza	Cuadrático	221,58	<0,0001	<0,0001	0,994	0,989	0,955	46,43
	Consistencia	Cuadrático	185,59	<0,0001	0,0013	0,993	0,989	0,948	42,52
Masa a base de almidón de papa con harina de kiwicha y harina de tarwi	Firmeza	Cuadrático	245,95	<0,0001	0,00009	0,994	0,990	0,960	47,97
	Consistencia	Cuadrático	237,67	<0,0001	<0,0001	0,994	0,990	0,959	47,14

Tabla 44: Modelos polinómicos predichos que muestran el efecto de cada ingrediente (HQ: harina de quinua; A: Agua; GX: Goma xantana; GT: Goma de tara; MG: Mezcla de gomas) y sus interacciones significativas sobre las propiedades texturales de las masas libres de gluten con diferentes gomas

Tabla 44: Modelos polinómicos predichos que muestran el efecto de cada ingrediente (HQ: harina de tarwi; A: Agua) sobre las propiedades texturales de las masas

Experimentos	Parámetros	Modelo matemático predictivo*
Masa a base de almidón de papa con harina de quinua y harina de tarwi	Firmeza (N) Consistencia (N.s)	$\text{Ln (Firmeza)} = 1,27 + 0,53 (\text{HT}) - 1,80 (\text{A}) - 0,22 (\text{HT})(\text{A}) + 0,56 (\text{A})^2$ $\text{Ln (Consistencia)} = 3,94 + 0,49 (\text{HT}) - 1,76 (\text{A}) + 0,54 (\text{A})^2$
Masa a base de almidón de papa con harina de kiwicha y harina de tarwi	Firmeza (N) Consistencia (N.s)	$\text{Ln (Firmeza)} = 0,98 + 0,53 (\text{HT}) - 1,80 (\text{A}) - 0,22 (\text{HT})(\text{A}) + 0,56 (\text{A})^2$ $\text{Ln (Consistencia)} = 3,94 + 0,49 (\text{HT}) - 1,76 (\text{A}) + 0,54 (\text{A})^2$

4.5.2. Optimización de las propiedades texturales de las masas con harina de tarwi

Para la optimización de la firmeza y consistencia de las masas con harina de tarwi se utilizó el enfoque de deseabilidad, donde el objetivo fue determinar la combinación de harina de tarwi y agua que logre una firmeza de 4,0 N y consistencia de 63,8 N.s en la masa. Estos valores texturales fueron tomados de la formulación OP2 con harina de kiwicha con mezcla de gomas, ya que fueron los menores valores texturales, comparada con la masa óptima OP2 con harina de quinua.

En la Tabla 45, se muestran las formulaciones optimizadas de las masas con harina de tarwi. En ambos casos, la deseabilidad fue cercana a la unidad (0,98 – 0,99), lo que indica que el modelo obtenido pudo determinar la combinación óptima para imitar la textura de la masa seleccionada. Como se muestra en las Figuras 35, donde se muestran los gráficos de contorno y de superficie de respuesta de la función de deseabilidad, la región óptima, para ambos casos se encontró en la combinación entre un mínimo contenido de harina de tarwi (10 - 12%) y un moderado contenido de agua (97 – 102%).

Tabla 45: Formulaciones óptimas y propiedades texturales predichas de masas libres de gluten con harinas de tarwi

Ingredientes	Formulaciones óptimas	
	Masa con harina de quinua, almidón de papa y harina de tarwi	Masa con harina de kiwicha, almidón de papa y harina de tarwi
Harina de tarwi (%)	11,95	10,00
Agua (% Base almidón y harina)	101,65	97,02
Respuestas		
Firmeza (N)	4,5	4,3
Consistencia (N.s)	66,8	63,9
Deseabilidad	0,98	0,99

Las formulaciones de panes libres de gluten vienen siendo enriquecidas con harinas o aislados proteicos de leguminosas, con el objetivo de incrementar el contenido de proteína en el pan, ya que usualmente los panes libres de gluten contienen menor contenido de proteínas que los panes de trigo (Bravo-Núñez *et al.*, 2019). De las pocas investigaciones que han utilizado harina o proteína de lupino en la elaboración de panes libres de gluten, tenemos a la investigación realizada por Horstmann *et al.*, (2017), quienes utilizaron 2% proteína de lupino (39% de proteína) en una formulación a base de almidón de papa con 80% de agua. Ziobro *et al.* (2013b) utilizaron 10% de proteína de lupino (59% proteína) en una formulación con 72% de almidón de maíz y 18% de almidón de papa con 103,4% de agua y en una investigación posterior (Ziobro *et al.*, 2016) también reportan el uso de 10% de harina de lupino en la misma formulación, pero ahora con menor contenido de agua (80,2%).

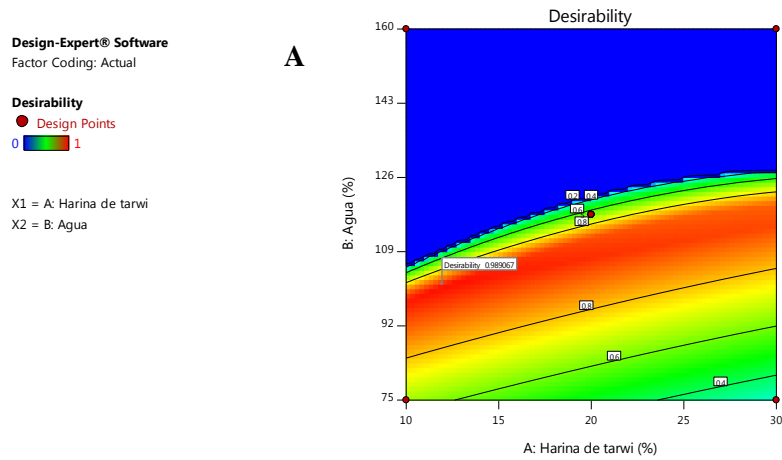
Aunque no se encontró evidencia del uso de la harina integral de lupino en la formulación de panes libres de gluten, resulta lógico pensar que la inclusión no solo de proteínas sino demás componentes como fibra de la harina integral de tarwi, influirá en la hidratación de la masa y por ende en sus propiedades texturales.

4.5.3. Características físicas de los panes libres de gluten elaborados con las masas óptimas con harina de tarwi

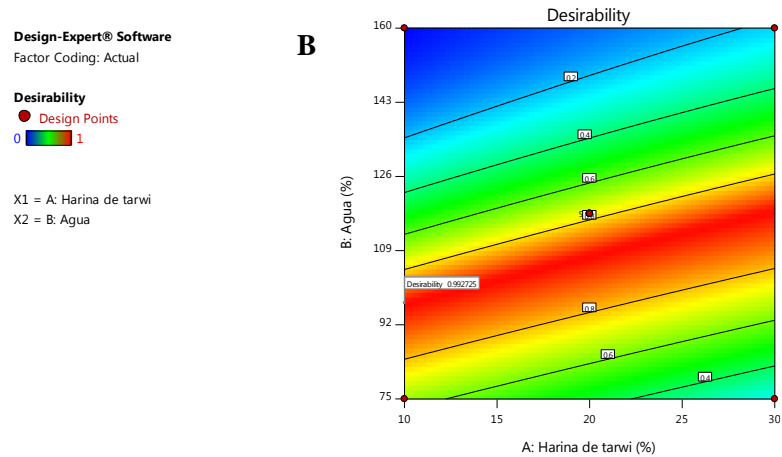
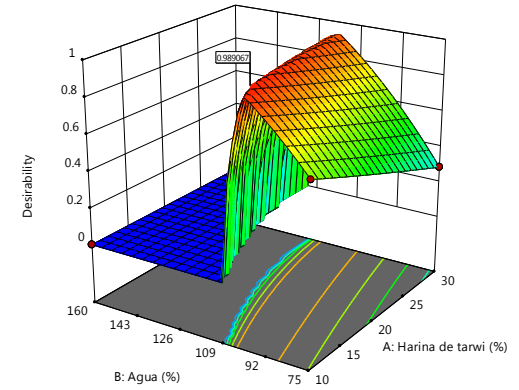
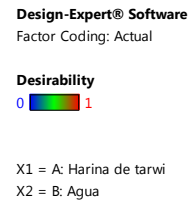
En la Tabla 46 se muestran las características físicas de los panes libres de gluten elaborados con las masas óptimas con harina de quinua, almidón de papa y tarwi y con harina de kiwicha, almidón de papa y tarwi. Como es usual en la declaración de los ingredientes (de mayor a menor composición), ahora en estas formulaciones desarrolladas, el componente principal fueron las harinas de los granos andinos como quinua y kiwicha.

Según los resultados expuestos en la Tabla 46, ambos tipos de panes lograron volúmenes específicos similares (2,07 – 2,13 mL/g), los cuales fueron superiores a los reportados en investigaciones que mezclan 15% de harina de lupino y 85% de harina amaranto o 30% harina de lupino y 70% harina de amaranto, los cuales presentan panes con volúmenes específicos entre 1,74 – 1,82 mL/g (Liu *et al.*, 2019). Pero también, se han reportado mayores volúmenes específicos (3,66 mL/g) en panes libres de gluten con 2% harina de lupino (39% de proteína) con 98% de almidón de papa (Horstmann *et al.*, 2017).

Con respecto a las propiedades de textura de la miga, la dureza de la miga fue estadísticamente similar en ambos tipos de panes (2,33 – 2,82 N). Comparados con las formulaciones base que fueron las OP2 con harina de quinua y kiwicha, las migas que contenían harina de tarwi fueron más suaves. Migas más duras (7,12 N) han sido reportadas en panes libres de gluten con 2% de



A1



B1

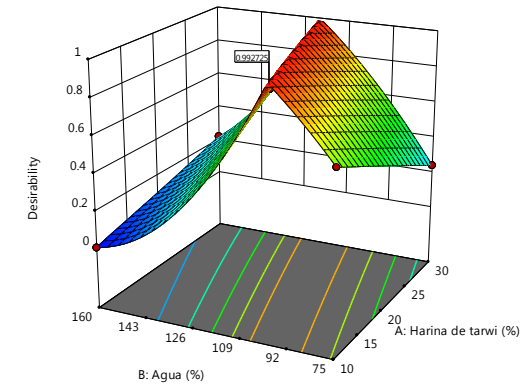
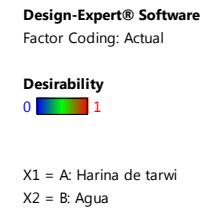


Figura 35: Gráficos de contorno y de superficie de respuesta de la variable Deseabilidad, para la masa con harina de quinua, almidón de papa y harina de tarwi (A y A1) y la masa con harina de kiwicha, almidón de papa y harina de tarwi (B y B1)

harina de lupino (Horstmann *et al.*, 2017); así mismo, se ha informado que los panes libres de gluten con 10% de harina de lupino (59% proteína) tienen una alta tasa de endurecimiento, experimentando un incremento en la dureza de la miga de 0,74 N a 5,55 N en tres días (Ziobro *et al.*, 2016).

La miga del pan con harinas de kiwicha y tarwi fue más cohesiva y gomosa que la miga del pan con harina de quinua y tarwi. Valores superiores de cohesividad (0.89) han sido reportados en panes con 10% de harina de lupino (Ziobro *et al.*, 2016). Estos autores indican que es preferible que el pan libre de gluten tenga valores elevados de cohesividad, porque una disminución de esta propiedad indicaría que el producto es más susceptible al desmoronamiento.

Con respecto a la distribución alveolar, la miga del pan con HQ+HT obtuvo menor cantidad de alveolos por cm² que la formulación HK+HT, la cual presentó mayor cantidad de alveolos pequeños por cm². El % de área ocupada por los alveolos o células fue mayor en la miga del pan con HQ+HT, esto quiere decir que esta miga estuvo más alveolada.

Tabla 46: Características de calidad de las formulaciones óptimas de los panes libres de gluten con harina de tarwi

Características físicas	Pan libre de gluten con harina de quinua, almidón de papa y harina de tarwi	Pan libre de gluten con harina de kiwicha, almidón de papa y harina de tarwi
	Volumen específico (mL/g)	2,13 ± 0,01 ^a
Dureza de la miga (N)	2,33 ± 0,26 ^a	2,82 ± 0,31 ^a
Cohesividad	0,39 ± 0,03 ^a	0,53 ± 0,03 ^b
Elasticidad	0,89 ± 0,02 ^a	0,96 ± 0,02 ^a
Gomosidad (N)	0,90 ± 0,06 ^a	1,87 ± 0,06 ^b
Masticabilidad (N)	0,80 ± 0,06 ^a	1,63 ± 0,06 ^b
Nº células/ cm ²	28,22 ± 2,4 ^a	34,71 ± 4,3 ^b
% Área de células	29,95 ± 3,5 ^b	25,33 ± 6,4 ^a

4.5.4. Valor nutricional de los panes libres de gluten desarrollados con harinas de granos andinos

Finalmente, se evaluó la composición de los panes libres de gluten desarrollados con harinas de los granos andinos (OP2-HQ, OP2-HK, OP – HQ + HT y OP- HK+HT) y se compararon con la formulación de un pan control elaborado con 50% de almidón de papa y 50% de harina de arroz (Alvarez-Jubete *et al.*, 2009) y también se comparó con la composición declarada en la etiqueta de un pan libre de gluten comercial expendido en los supermercados peruanos.

En la Tabla 47, se muestra la composición proximal (humedad, proteínas, lípidos, fibra cruda, carbohidratos, ceniza), contenido de fibra dietaria (fibra soluble e insoluble) y minerales (calcio y hierro) de los panes libres de gluten desarrollados en esta investigación, donde se puede notar que el contenido de proteína de los panes con harinas de granos andinos (7,5 – 11,8%) es entre dos y tres veces más que el contenido proteico de los panes libres de gluten comerciales. Este resultado concuerda con los expuesto por (Estévez *et al.*, 2016), quienes indican que los productos de panificación expendidos en el mercado chileno, pueden llegar a tener un contenido de proteínas hasta un 69% menor comparado con los productos con trigo y que no presentan fortificaciones con minerales, dejando en riesgo nutricional a las personas celíacas que dependen de estos productos. De la misma forma (Cornicelli *et al.*, 2018) informan que el contenido proteico promedio, de 40 tipos panes libres de gluten comerciales en el mercado italiano, fue de 4,29%. Mientras que el contenido proteico promedio de 42 tipos de panes regulares (con gluten) fue de 9,37%. Por lo tanto, según los resultados encontrados en esta investigación, se podría indicar que los panes libres de gluten desarrollados con harinas quinua con tarwi y harinas de kiwicha con tarwi, tendrían mayor contenido de proteínas que los panes convencionales elaborados con harina de trigo.

Se conoce que las globulinas son las principales proteínas de almacenamiento en el grano de lupino, las cuales se clasifican en cuatro familias: α - conglutina (globulina 11S), β -conglutina (globulina 7S), γ - conglutina (globulina básica 7S) y conglutina δ (albúmina 2S rica en azufre), destacándose la γ - conglutina por su bioactividad reportada, la cual puede reducir la glucosa en sangre y por ende tener propiedades beneficiosas para la salud (Villarino *et al.*, 2016). Por lo tanto, la inclusión de la harina de tarwi en las formulaciones de panes libres de gluten no solo mejoraría las características físicas e incrementaría el

contenido proteico en los panes, sino también podría otorgarles propiedades funcionales a los productos. Aunque este aspecto precisa de mayor estudio, ya se ha reportado la presencia de γ - conglutina en panes de trigo con sustitución parcial de harina de lupino (Villarino *et al.*, 2015), lo que indicaría que puede ser estable a temperaturas de horneado.

Así mismo, la mezcla de harina de quinua o kiwicha con harina de tarwi, mejoraría el balance de aminoácidos en el producto, ya que las leguminosas son limitantes en aminoácidos azufrados (metionina y cisteína) (Villarino *et al.*, 2016). Por el contrario, la quinua y la kiwicha contienen alrededor 3,1 a 2,8 g/ 16 g de N de metionina y 5,6 a 6,0 g / 16 g de N de lisina, respectivamente, (Repo-Carrasco *et al.*, 2003) convirtiéndolos en un buen complemento con las proteínas del tarwi.

Se ha reportado el efecto complementario de adicionar harina de lupino a los panes de trigo, ya que el trigo contiene bajo niveles de lisina pero alto contenido en aminoácidos azufrados (Villarino *et al.*, 2015). Futuras investigaciones deberían evaluar tanto el perfil de los aminoácidos de los panes libres de gluten con granos andinos, así como también, evaluar sus propiedades funcionales.

Tabla 47: Composición proximal y mineral de panes libres de gluten desarrollados en la investigación y de panes libres de gluten comerciales

	GFB - peruano	GFC*	OP2 - HQ	OP - HQ + HT	OP2 - HK	OP- HK+HT
Humedad			27,75 ± 0,1	35,60 ± 0,0	29,37 ± 0,0	34,79 ± 0,0
Proteína (% bs)	3,8	4,2 ± 0,0	7,74 ± 0,0	10,09 ± 0,0	7,50 ± 0,0	11,82 ± 0,0
Lípidos (% bs)	3,8	6,7 ± 0,3	4,87 ± 0,0	16,09 ± 0,0	11,30 ± 0,0	13,34 ± 0,0
Fibra cruda (% bs)	1,5		4,01 ± 0,1	7,06 ± 0,2	2,97 ± 0,2	6,33 ± 0,1
Fibra dietaria soluble (% bs)	0,8		4,60 ± 0,2	6,52 ± 0,1	1,22 ± 0,1	3,67 ± 0,2
Fibra dietaria insoluble (% bs)	0,8		9,79 ± 0,1	12,11 ± 0,3	10,66 ± 0,1	11,49 ± 0,1
Fibra dietaria total (% bs)	1,6	7,6 ± 0,9	14,38	18,63	11,88	15,17
Carbohidratos (% bs)			84,08 ± 0,1	72,88 ± 0,0	77,93 ± 0,0	79,29 ± 0,0
Ceniza (% bs)		2,3 ± 0,0	3,22 ± 0,0	3,27 ± 0,0	3,27 ± 0,0	3,22 ± 0,0
Calcio (mg/100g)		23,7 ± 0,4	69,65 ± 7,7	78,80 ± 5,4	66,27 ± 1,6	73,35 ± 2,1
Hierro (mg/100g)		1,3 ± 0,2	1,87 ± 0,2	3,93 ± 0,2	2,34 ± 0,3	3,87 ± 0,2

*GFC: Pan control a base de harina de arroz y almidón de papa, tomado de Alvarez-Jubete *et al.* (2009). GFB-peruano: Pan libre de gluten comercial en supermercados peruanos. OP2-HQ: Pan óptimo 2 con harina de quinua; OP2-HK: Pan óptimo 2 con harina de kiwicha; OP – HQ + HT: Pan óptimo con harina de quinua, almidón de papa y harina de tarwi; OP- HK+HT: Pan óptimo con harina de kiwicha, almidón de papa y harina de tarwi.

Con respecto al contenido de lípidos, los panes libres de gluten que contienen harina de tarwi (OP-HQ+HT y OP-HK+HT) obtuvieron más del triple de lípidos en su composición que el pan libre de gluten comercial. Este es un problema recurrente en los panes libres de gluten, llegando hasta encontrar formulaciones comerciales hasta con 26% de grasa en su composición (Matos Segura y Rosell, 2011). El contenido de lípidos en los panes libres de gluten con harinas de granos andinos, fue superior al promedio (11,05% de lípidos bs) reportado por (Matos y Rosell, 2011), quienes evaluaron el perfil nutricional de 11 tipos de panes libres de gluten comerciales en el mercado español. Es recurrente el uso de lípidos como aceites y grasa para suavizar la textura de la masa, en una reciente investigación (Mancebo *et al.*, 2017) han informado que la incorporación de hasta un 20% de aceite, en la masa a base de harina de arroz, aumenta el volumen de los panes, así como la densidad celular. También, disminuye ciertos parámetros texturales en la miga, como la dureza, la cohesión, la elasticidad y la resiliencia.

Aunque el contenido de lípidos es elevado, se debe considerar que en su gran mayoría podría ser ácidos grasos insaturados, como lo ha informado (Alvarez-Jubete *et al.*, 2009), en panes libres de gluten con 50% de harina de quinoa o panes con 50% de harina de amaranto, los cuales presentaron ente 8,6 a 8,8% de lípidos, siendo las grasa insaturadas como ácido linoleico, oleico y palmítico como los principales ácidos grasos presentes.

El contenido de fibra cruda y fibra dietaria fue elevado en todos los panes con harinas de granos andinos comparado con la fibra del pan control y comercial. Se destaca que fue mayor el contenido de fibra insoluble debido a que esta es una particularidad de la fibra de los granos andinos (Haros y Sanz-Penella, 2017). De acuerdo con Tsatsaragkou *et al.*, (2017), el contenido de fibra en los panes libres de gluten comerciales está por encima de 3%, reportándose en la literatura panes libres de gluten hasta con 7,2% de fibra dietaria. Según Wild *et al.*, (2010), la dieta libre de gluten en pacientes celíacos es deficiente en fibra debido a la baja calidad nutricional de los insumos con los que son elaborados los productos libres de gluten de consumo diario y siempre que sea posible se deben hacer recomendaciones de consumo de alimentos que pueda aumentar la ingesta de fibra, como legumbres y vegetales. Se ha informado que la fibra dietética en la harina de lupino consiste principalmente en polisacáridos sin almidón ubicados en las paredes celulares de endospermo y son oligosacáridos de la familia de la rafinosa como la rafinosa, estaquiosa y verbascosa, los

cuales tienen la una alta capacidad de retención de agua, así como de aumentar la viscosidad del sistema (Villarino *et al.*, 2016). Es por eso, que fue evidente encontrar que las formulaciones con harina de tarwi (OP-HQ+HT y OP-HK+HT) presentaron elevados contenidos de fibra dietética, lo cual también podría estar relacionado a la elevada cantidad de agua (97 – 102%) que necesitaron estas masas para desarrollar.

Con respecto al contenido de minerales como calcio y hierro, los panes con harinas de granos andinos fueron también superiores al pan control, destacándose los panes que tienen harina de tarwi en su composición, los cuales pueden llegar a tener tres veces más calcio y hierro que el pan libre de gluten control. De acuerdo con Wild *et al.* (2010), la dieta de los pacientes celíacos son deficientes en calcio y hierro y que siempre que sea posible, los médicos deben hacer recomendaciones para que incrementen el consumo de alimentos que contengan estos minerales. El contenido de calcio y hierro en los panes libres de gluten con harina de granos andinos fueron comparables con los resultados reportados por (Alvarez-Jubete *et al.*, 2009), quienes informan que el pan libre de gluten con 50% de harina de quinua obtuvo 28,7 mg/100 g de calcio y 2,8 mg/100 g de hierro y que el pan libre de gluten con 50% de harina de amaranto obtuvo 98,1 mg/100 g de calcio y 4,3 mg/100 g de hierro.

En resumen, la composición de los panes libres de gluten con harinas de granos andinos, presentaron un perfil nutricional prometedor que puede contribuir en mejorar la dieta de los pacientes celíacos y puede ser comparado, o superado en algunos componentes, con el pan de trigo. Estudios posteriores deberían evaluar la digestibilidad de las proteínas y la biodisponibilidad de los minerales, así como los posibles efectos funcionales que podrían tener algunos de sus nutrientes.

V. CONCLUSIONES

1. Se evaluó las propiedades reológicas y texturales de las mezclas de harinas de quinua, kiwicha y tarwi. La harina de tarwi disminuyó significativamente las propiedades de pasta y propiedades texturales de los geles. Se evidenciaron efectos no aditivos y no lineales en las propiedades de pasta y texturales en las mezclas de harina de quinua con harina de kiwicha.
2. Se evaluó el efecto de la goma de tara y la goma xantana sobre las propiedades reológicas de las masas y los parámetros de calidad física de los panes sin gluten elaborados a base de almidón de maíz y almidón de papa. Se demostró que la cinética de crecimiento de las masas durante la fermentación estuvo influenciada por las propiedades viscoelásticas de las masas. El pan elaborado a base de almidón de papa con 0.5% de goma xantana presentó el mayor volumen específico y buena estructura de miga. Esta formulación se consideró como el tratamiento control.
3. Se evaluaron las propiedades reológicas y texturales de las masas libres de gluten con harinas de quinua, kiwicha y tarwi; determinando que a medida que se incrementa el grado de sustitución del almidón de papa por las harinas de granos andinos, las propiedades texturales y reológicas de la masa se ven afectadas significativamente, incrementando la firmeza, la consistencia, la cohesividad, el índice de viscosidad y el coeficiente de consistencia de la masa. La cinética de crecimiento de las masas durante la fermentación se correlacionó con las propiedades de flujo y texturales de las masas, demostrando que las masas menos firmes y menos consistentes crecen mejor durante el proceso de fermentación. Sin embargo, ninguna masa con harina de granos andinos pudo asemejarse al comportamiento reológico y textural de la masa control.
4. Se lograron optimizar los niveles de harina de quinua, o harina de kiwicha, agua y goma (goma xantana, goma de tara y mezcla de ambas gomas) de las masas libres de gluten que logren imitar las propiedades texturales de una masa control utilizando el

enfoque de diseño de mezclas. Se encontraron dos alternativas de formulaciones de masas libres de gluten (OP1 y OP2), que pueden imitar la textura de la masa control. Las primeras formulaciones de masas óptimas (OP1) estuvieron compuestas por bajos niveles de harina de quinoa (10.7 – 14.4%) o harina de kiwicha (10 – 26.4%), las cuales demandaron elevados contenidos de agua (94.6 – 110%) de mezcla de gomas xantana y goma de tara (1.1 – 1.2%). Mientras que las formulaciones con elevado contenido de harina de quinoa (44.5 – 46.3%) o harina de kiwicha (40.6 – 46.2%) (OP2), requirieron menores contenidos de agua (75.2 – 80.9%) y mezcla de ambas gomas (0.5%). Se evidenció que ambas formulaciones optimizadas (OP1 y OP2) pudieron formar panes libres de gluten con aceptable volumen específico y propiedades texturales de la miga.

5. Se lograron optimizar los niveles de harina de tarwi y agua en masas libres de gluten OP2 con harina de quinoa y harina de kiwicha con mezcla de goma xantana y goma de tara. Fue posible la incorporación de 12% de harina de tarwi en las formulaciones, incrementado así el requerimiento de agua (102%) en la masa para que pueda imitar la textura de la masa OP2. Las características físicas de los panes libres de gluten con harina de tarwi optimizados, fueron similares en volumen específico y dureza de la miga y se determinó que la incorporación de tarwi, incrementó el contenido de proteínas, lípidos, fibra dietaria y minerales como calcio y hierro en el pan.

VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar los estudios de digestibilidad de las proteínas y carbohidratos de las formulaciones optimizadas, con la finalidad de conocer el aprovechamiento de los nutrientes.
- Se recomienda realizar el estudio sensorial de las formulaciones optimizadas con consumidores celiacos, así como, un análisis sensorial comparativo con los productos de panificación libres de gluten comerciales en Perú.
- Se recomienda realizar los estudios de vida en anaquel de las formulaciones optimizadas, así como la evaluación de barreras o métodos de conservación para extender la vida útil del producto.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AACC. 2010. AACCI Method 76-21.01. General Pasting Method for Wheat or Rye Flour or Starch Using the Rapid Visco Analyser (11th ed.). S. Paul, Minnesota: AACCI.
- Abugoch, L; Castro, E; Tapia, C; Añón, MC; Gajardo, P; Villarroel, A. 2009. Stability of quinoa flour proteins (*Chenopodium quinoa* Willd.) during storage. *International Journal of Food Science and Technology* 44(10):2013–2020.
- Achayuthakan, P; Suphantharika, M. 2008. Pasting and rheological properties of waxy corn starch as affected by guar gum and xanthan gum. *Carbohydrate Polymers* 71(1):9–17.
- Alencar, M; Joy, C; Dutra, I; Carvalho, E; Morais, D; Maria, H; Bolini, A. 2015. Addition of quinoa and amaranth flour in gluten-free breads: Temporal profile and instrumental analysis. *LWT - Food Science and Technology* 62:1011–1018.
- Allen, B; Orfila, C. 2018. The availability and nutritional adequacy of gluten-free bread and pasta. *Nutrients* 10(10): E1370.
- Alvarez-Jubete, L; Auty, M; Arendt, EK; Gallagher, E. 2010a. Baking properties and microstructure of pseudocereal flours in gluten-free bread formulations. *European Food Research and Technology* 230(3):437–445.
- Alvarez-Jubete, L; Arendt, EK; Gallagher, E. 2010b. Nutritive value of pseudocereals and their increasing use as functional gluten-free ingredients. *Trends in Food Science and Technology* 21(2):106–113.

- Alvarez-Jubete, L; Arendt, EK; Gallagher, E. 2009. Nutritive value and chemical composition of pseudocereals as gluten-free ingredients. *International Journal of Food Sciences and Nutrition* 60(1): 240–257.
- Angioloni, A; Collar, C. 2009. Small and large deformation viscoelastic behaviour of selected fibre blends with gelling properties. *Food Hydrocolloids* 23(3):742–748.
- AOAC. 2000. *Official methods of analysis* (17th ed). Gaithersburg, MD: Association of Official Analytical Chemists.
- Arendt, EK; Moroni A; Zannini, E. 2011. Medical nutrition therapy: Use of sourdough lactic acid bacteria as a cell factory for delivering functional biomolecules and food ingredients in gluten free bread. *Microb Cell Fact* 10(Suppl 1):S15.
- Arendt, EK; Morrissey, A; Moore MM; Dal Bello, F. 2008. Gluten-free Breads. *In: Gluten-free Cereals products and Beverages (Eds.)* Arendt, E. K and Dal Bello, F, (1st ed.), London, UK, Academic Press. p. 289-321.
- Ari Akin, P; Miller, RA. 2017. Starch–Hydrocolloid Interaction in Chemically Leavened Gluten-Free Sorghum Bread. *Cereal Chemistry Journal* 94(5):897–902.
- Atchison, GW; Nevado, B; Eastwood, RJ; Contreras-Ortiz, N; Reynel, C; Madrinan, S; ... Hughes, CE. 2016. Lost crops of the Incas: Origins of domestication of the Andean pulse crop tarwi, *Lupinus mutabilis*. *American Journal of Botany* 103(9):1592–1606.
- Aydogdu, A; Ozkahraman, BC; Sumnu, G; Sahin, S. 2017. Effects of legume flours on batter rheology and cake physical quality. *Acta Horticulturae* (1152):175-182.
- Aydogdu, A; Sumnu, G; Sahin, S. 2018. Effects of addition of different fibers on rheological characteristics of cake batter and quality of cakes. *Journal of Food Science and Technology* 55(2): 667–677.

- Ballester, D; Yanez, E; Garcia, R; Erazo, S; Lopez, F; Haardt, E; ... Chichester, CO. 1980. Chemical composition, nutritive value, and toxicological evaluation of two species of sweet lupine (*Lupinus albus* and *Lupinus luteus*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 28(2):402–405.
- Bhargava, A; Shukla, S; Ohri, D. 2006. *Chenopodium quinoa* - An Indian perspective. *Industrial Crops and Products* 23: 73-87.
- Bravo-Núñez, Á; Sahagún, M; y Gómez, M. 2019. Assessing the Importance of Protein Interactions and Hydration Level on Protein-Enriched Gluten-Free Breads: a Novel Approach. *Food and Bioprocess Technology* 12(5):820-828.
- Brites, L., Schmiele, M., Steel C. 2018. Chapter 13 - Gluten-Free Bakery and Pasta Products, In *Alternative and Replacement Foods*, Editor(s): Alina Maria Holban, Alexandru Mihai Grumezescu, Academic Press. p. 385-410.
- Boukid, F; Zannini, E; Carini, E; Vittadini, E. 2019. Pulses for bread fortification: A necessity or a choice? *Trends in Food Science and Technology* 88:416–428.
- Buruk Sahin, Y; Aktar Demirtaş, E; Burnak, N. 2016. Mixture design: A review of recent applications in the food industry. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences* 22(4):297–304.
- Cajas Locke, JE; González, LC; Loubes, MA; Tolaba, MP. 2019. Optimization of rice bread formulation by mixture design and relationship of bread quality to flour and dough attributes. *LWT - Food Science and Technology* 113:108299.
- Calderón de la Barca, AM; Rojas-Martínez, ME; Islas-Rubio, AR; Cabrera-Chávez, F. 2010. Gluten-Free Breads and Cookies of Raw and Popped Amaranth Flours with Attractive Technological and Nutritional Qualities. *Plant Foods for Human Nutrition* 65(3): 241–246.

- Calvo-lerma, J; Fornés-ferrer, PC; Ribes-koninckx, ED. 2019. Differences in the macronutrient and dietary fibre profile of gluten-free products as compared to their gluten-containing counterparts. *European Journal of Clinical Nutrition* 73(6):930-936.
- Cappa, C; Barbosa-Cánovas, GV; Lucisano, M; Mariotti, M. 2016. Effect of high pressure processing on the baking aptitude of corn starch and rice flour. *LWT - Food Science and Technology* 73:20–27.
- 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.
- Capriles, VD; Aréas, JAG; 2013. Effects of prebiotic inulin-type fructans on structure, quality, sensory acceptance and glycemic response of gluten-free breads. *Food Funct.* 4:104–110.
- Carlsson, AK; Axelsson, IEM; Borulf, SK; Bredberg, ACA; Ivarsson, S-A. Serological screening for celiac disease in healthy 2.5-year-old children in Sweden. *Pediatrics* 107:42–45.
- Catassi, C; Yachha, SK. 2009. The epidemiology of celiac disease, in *The Science of Gluten-Free Foods and Beverages* (eds E. K. Arendt and F. Dal Bello). AACC International Inc., St Paul, MN. p. 1–13.
- Catassi, C., y Fasano, A. 2008. Celiac disease. In Arendt, EK; Bello, FD (eds.). London, UK, Elsevier Inc. p. 1-22.
- Chaisawang, M; Suphantharika, M. 2006. Pasting and rheological properties of native and anionic tapioca starches as modified by guar gum and xanthan gum. *Food Hydrocolloids* 20(5):641–649.

- Conte, P; Del Caro, A; Balestra, F; Piga, A; Fadda, C. 2018. Bee pollen as a functional ingredient in gluten-free bread: a physical-chemical, technological and sensory approach. *LWT-Food Science and Technology* 90:1-7.
- Cornicelli, M; Saba, M; Machello, N; Silano, M; Neuhold, S. 2018. Nutritional composition of gluten-free food versus regular food sold in the Italian market. *Digestive and Liver Disease* 50(12): 1305–1308.
- Crockett, R; Ie, P; Vodovotz, Y. 2011. How do xanthan and hydroxypropyl methylcellulose individually affect the physicochemical properties in a model gluten-free dough? *Journal of Food Science* 76(3):274–282.
- D'Amico, S; Schoenlechner, R. 2017. Amaranth: Its Unique Nutritional and Health-Promoting Attributes. *In Gluten-Free Ancient Grains*, Elsevier. p. 131–159.
- de la Hera, E; Rosell, CM; Gomez, M. 2014. Effect of water content and flour particle size on gluten-free bread quality and digestibility. *Food Chemistry* 151:526-531.
- DeGeorge, KC; Frye, JW; Stein, KM; Rollins, LK; McCarter, DF. 2017. Celiac Disease and Gluten Sensitivity. *Primary Care - Clinics in Office Practice* 44(4):693–707.
- Demirkesen, I; Kelkar, S; Campanella, O.H; Sumnu, G; Sahin, S; Martin Okos, M; 2014. Characterization of structure of gluten-free breads by using x-ray microtomography. *Food Hydrocolloids* 36:37-44.
- Demirkesen, I; Mert, B; Sumnu, G; Sahin, S. 2010. Rheological properties of gluten-free bread formulations. *Journal of Food Engineering* 96(2):295–303.
- do Nascimento, AB; Fiates, GM; dos Anjos, A; Teixeira, E. 2013. Analysis of ingredient lists of commercially available gluten-free and gluten-containing food products using the text mining technique. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 64:217–222.

- Elgeti, D; Jekle, M; Becker, T. 2015. Trends in Food Science y Technology Strategies for the aeration of gluten-free bread e A review. *Trends in Food Science y Technology* 46(1):75–84.
- Emire, SA; Tiruneh, DD. 2012. Optimization of Formulation and Process Conditions of Gluten-Free Bread from Sorghum using Response Surface Methodology. *Journal of Food Process Technology* 3(5):1-11.
- Encina-Zelada, CR; Cadavez, V; Monteiro, F; Teixeira, JA; Gonzales-Barron, U. 2018. Combined effect of xanthan gum and water content on physicochemical and textural properties of gluten-free batter and bread. *Food Research International* 111:544–555.
- Encina-Zelada, CR; Cadavez, V; Monteiro, F; Teixeira, JA; Gonzales-Barron, U. 2019. Physicochemical and textural quality attributes of gluten-free bread formulated with guar gum. *European Food Research and Technology* 245(2):443–458.
- Encina-Zelada, CR; Cadavez, V; Teixeira, JA; Gonzales-Barron, U. 2019. Optimization of Quality Properties of Gluten-Free Bread by a Mixture Design of Xanthan, Guar, and Hydroxypropyl Methyl Cellulose Gums. *Foods* 8(5): 156.
- Estévez, V; Ayala, J; Vespa, C; Araya, M. 2016. The gluten-free basic food basket: A problem of availability, cost and nutritional composition. *European Journal of Clinical Nutrition*, 70(10):1215–1217.
- Foschia, M; Horstmann, SW; Arendt, EK; Zannini, E. 2017. Legumes as Functional Ingredients in Gluten-Free Bakery and Pasta Products. *Annual Review of Food Science and Technology* 8(1): 75–96.
- Föste, M; Nordlohne, SD; Elgeti, D; Linden, MH; Heinz, V; Jekle, M; Becker, T. 2014. Impact of quinoa bran on gluten-free dough and bread characteristics. *European Food Research and Technology*, 239(5), 767–775.

- Fox, J. E. 1992. Seed gums. In A. P. Imeson (Ed.), *Thickening and Gelling Agents for Food* Boston, MA: Springer US. p. 153–170.
- Fuentes, C; Perez-Rea, D; Bergenståhl, B; Carballo, S; Sjöo, M; mNilsson, L. 2019. Physicochemical and structural properties of starch from five Andean crops grown in Bolivia. *International Journal of Biological Macromolecules* 125: 829–838.
- Gambus, H; Gambus, F; Sabat, R. 2002. Quality improvement of gluten-free bread by *Amaranthus* flour. *Zywnosc* 9(31): 99-112.
- Granato, D; de Araújo Calado, VM. 2013. The use and importance of design of experiments (DOE) in process modelling in food science and technology. In G. Ares (Ed.), *Mathematical and Statistical Methods in Food Science and Technology*. Chichester, UK: John Wiley y Sons, Ltd. p. 1–18.
- Güenes-Vera, N; Arciniega-Ruiz, O; Dávila-Ortiz, G. 2004. Structural analysis of the *Lupinus mutabilis* seed, its flour, concentrate and isolate as well as their behavior when mixed with wheat flour. *Lebensmittel-Wissenschaft y Technologie* 37: 283-290.
- Gujral, H. S; Sodhi, NS. 2002. Back extrusion properties of wheat porridge (*Dalia*). *Journal of Food Engineering* 52:53–56.
- Gujral, H.S; Rosell, CM. 2004. Functionality of rice flour modified with a microbial transglutaminase. *Journal of Cereal Science* 39:225–230.
- Gularte, MA; Rosell, CM. 2011. Physicochemical properties and enzymatic hydrolysis of different starches in the presence of hydrocolloids. *Carbohydrate Polymers* 85(1): 237-244.
- Hager, AS; Arendt, EK. 2013. Influence of hydroxypropylmethylcellulose (HPMC), xanthan gum and their combination on loaf specific volume, crumb hardness and crumb grain characteristics of gluten-free breads based on rice, maize, teff and buckwheat. *Food Hydrocolloids* 32(1): 195–203.

- Hamada, S; Suzuki, K; Aoki, N; Suzuki, Y. 2013. Improvements in the qualities of gluten-free bread after using a protease obtained from *Aspergillus oryzae*. *Journal of Cereal Science* 57:91–97.
- Haque, A; Morris, ER. 1994. Combined use of ispaghula and HPMC to replace or augment gluten in breadmaking. *Food Research International* 27:379–393.
- Haros, CM; Sanz-Penella, JM. 2017. Food Uses of Whole Pseudocereals. In *Pseudocereals*. Chichester, UK: John Wiley y Sons, Ltd. p. 163–192
- Hartmann, C; Hieke, S; Taper, C; Siegrist, M. 2018. European consumer healthiness evaluation of ‘free-from’ labelled food products. *Food Quality and Preference* 68:377–388.
- Hirose, Y; Fujita, T; Ishii, T; Ueno, N. 2010. Antioxidative properties and flavonoid composition of *Chenopodium quinoa* seeds cultivated in Japan. *Food Chemistry* 119(4): 1300-1306.
- Horstmann, S. W; Axel, C; Arendt, EK. 2018. Water absorption as a prediction tool for the application of hydrocolloids in potato starch-based bread. *Food Hydrocolloids* 81:129–138.
- Horstmann, SW; Foschia, M; Arendt, EK. 2017. Correlation analysis of protein quality characteristics with gluten-free bread properties. *Food y Function* 8(7):2465–2474.
- Horstmann, S; Belz, M; Heitmann, M; Zannini, E; Arendt, E. 2016. Fundamental Study on the Impact of Gluten-Free Starches on the Quality of Gluten-Free Model Breads. *Foods* 5(4): 30.
- Hosseini, SM; Soltanizadeh, N; Mirmoghtadaee, P; Banavand, P; Mirmoghtadaie, L; y Shojae-Aliabadi, S. 2018. Gluten-free products in celiac disease: Nutritional and

- technological challenges and solutions. *Journal of research in medical sciences: the official journal of Isfahan University of Medical Sciences* 23: 109.
- Houben, A; Hochstotter, A; Becker, T; 2012. Possibilities to increase the quality in gluten-free bread production: an overview. *European Food Research and Technology* 235(2):195-208
- Huang, W; Li, L; Wang, F; Wan, J; Tilley, M; Ren, C; Wu, S. 2010. Effects of transglutaminase on the rheological and Mixolab thermomechanical characteristics of oat dough (en línea). *Food Chemistry* 121(4):934-939.
- Hüttner, EK; Bello, FD; Arendt, EK. 2010. Rheological properties and bread making performance of commercial wholegrain oat flours. *Journal of Cereal Science* 52(1): 65–71.
- Inglett, GE; Xu, J; Stevenson, DG; Chen, D. 2009. Rheological and Pasting Properties of Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Möench) Flours With and Without Jet-Cooking. *Cereal Chemistry Journal* 86(1):1–6.
- Jacobsen, SE; Mujica, A. 2006. El tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet.) y sus parientes silvestres. *Botanica Economica de Los Andes Centrales. Universidad Mayor de San Andrés* 458–482.
- Julianti, E; Rusmarilin, H; Yusraini, E. 2017. Functional and rheological properties of composite flour from sweet potato, maize, soybean and xanthan gum. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 16(2):171–177.
- Karam, LB; Grossmann, M.V; Silva, RS; Ferrero, C; Zaritzky, NE. 2005. Gel textural characteristics of corn, cassava and yam starch blends: A mixture surface response methodology approach. *Starch/Staerke* 57(2): 62–70.
- Kawamura-Konishi, Y; Shoda, K; Koga, H; Honda, Y. 2013. Improvement in gluten-free rice bread quality by protease treatment. *Journal of Cereal Science* 58:45–50.

- Korus, J; Witzak, M; Ziobro, R; Juszczak, L. 2009. The impact of resistant starch on characteristics of gluten-free dough and bread. *Food Hydrocolloids* 23(3):988–995.
- Kupper C. 2005. Dietary guidelines and implementation for celiac disease. *Gastroenterology* 128(4):S121-S127.
- Kurek, MA; Karp, S; Wyrwisz, J; Niu, Y. 2018. Physicochemical properties of dietary fibers extracted from gluten-free sources: quinoa (*Chenopodium quinoa*), amaranth (*Amaranthus caudatus*) and millet (*Panicum miliaceum*). *Food Hydrocolloids* 85:321–330.
- Larretxi, I; Navarro, V; Churrua, I. 2017. Celiac Disease and Gluten-Related Disorders. In *Nutritional and Analytical Approaches of Gluten-Free Diet in Celiac Disease*. Springer Nature. Switzerland. p. 1-14.
- Lazaridou, A; Biliaderis, CG. 2009. Gluten-free doughs: rheological properties, testing procedures methods and potential problems. In: Gallagher E (ed) *Gluten-free food science and technology*. Wiley-Blackwell, London. p. 52–82.
- Lazaridou, A; Duta, D; Papageorgiou, M; Belc, N; Biliaderis, CG. 2007. Effects of hydrocolloids on dough rheology and bread quality parameters in gluten-free formulations. *Journal of Food Engineering* 79(3):1033–1047.
- Lee, HY; Jo, W; Yoo, B. 2017. Rheological and microstructural characteristics of rice starch–tara gum mixtures. *International Journal of Food Properties* 20(2):1879–1889.
- Li, G; Wang, S; Zhu, F. 2016. Physicochemical properties of quinoa starch. *Carbohydrate Polymers* 137: 328–338.
- Liu, S; Chen, D; Xu, J. 2019. Characterization of amaranth and bean flour blends and the impact on quality of gluten-free breads. *Journal of Food Measurement and Characterization* 13(2):1440–1450.

- Liu, X; Mu, T; Sun, H; Zhang, M; Chen, J; Fauconnier, ML. 2018. Influence of different hydrocolloids on dough thermo-mechanical properties and in vitro starch digestibility of gluten-free steamed bread based on potato flour. *Food Chemistry* 239:1064–1074.
- Lqari, H; Vioque, J; Pedroche, J; Millán, F. 2002. Lupinus angustifolius protein isolates: Chemical composition, functional properties and protein characterization. *Food Chemistry* 76(3):349–356.
- Mandala, I; Kapsokefalou, M. 2011. Gluten-Free Bread. In *Flour and Breads and their Fortification in Health and Disease Prevention*. p. 161–169.
- Mancebo, CM; San Miguel, M; Martínez, MM; Gómez, M. 2015. Optimisation of rheological properties of gluten-free doughs with HPMC, psyllium and different levels of water. *Journal of Cereal Science* 61:8–15.
- Mancebo, CM; Martínez, MM; Merino, C; de la Hera, E; Gómez, M. 2017. Effect of oil and shortening in rice bread quality: Relationship between dough rheology and quality characteristics. *Journal of Texture Studies* 48(6):597–606.
- Mancebo, CM; Merino, C; Martínez, MM; Gómez, M. 2015. Mixture design of rice flour, maize starch and wheat starch for optimization of gluten free bread quality. *Journal of Food Science and Technology* 52(10):6323–6333.
- Mancebo, CM; San Miguel, MÁ; Martínez, MM; Gómez, M. 2015. Optimisation of rheological properties of gluten-free doughs with HPMC, psyllium and different levels of water. *Journal of Cereal Science* 61:8–15.
- Marco, C; Rosell, C.M. 2008. Effect of different protein isolates and transglutaminase on rice flour properties. *Journal of Food Engineering* 84: 132–139.
- Martínez, MM; Gómez, M. 2017. Rheological and microstructural evolution of the most common gluten-free flours and starches during bread fermentation and baking. *Journal of Food Engineering*, 197:78–86.

- Matos Segura, ME; Rosell, CM. 2011. Chemical Composition and Starch Digestibility of Different Gluten-free Breads. *Plant Foods for Human Nutrition* 66(3):224–230.
- Matos, M. E; Rosell, CM. 2015. Understanding gluten-free dough for reaching breads with physical quality and nutritional balance. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 95:653–661.
- Matos, ME; Rosell, CM; 2013. Quality indicators of rice-based gluten-free bread-like products: relationships between dough rheology and quality characteristics. *Food Bioproc Technol* 6:2331–2341.
- 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):140–146.
- Mir, SA; Shah, MA; Naik, HR; Zargar, IA. 2016. Influence of hydrocolloids on dough handling and technological properties of gluten-free breads. *Trends in Food Science and Technology* 51:49–57.
- Monthe, OC; Grosmaire, L; Nguimbou, RM; Dahdouh, L; Ricci, J; Tran, T; Ndjouenkeu, R. 2019. Rheological and textural properties of gluten-free doughs and breads based on fermented cassava, sweet potato and sorghum mixed flours. *LWT - Food Science and Technology* 101(March 2018):575-582.
- Moore, MM; Heinbockel, M; Dockery, P; Ulmer, H; Arendt, EK. 2006. Network formation in gluten-free bread with application of transglutaminase. *Journal of Cereal Chemistry* 83:28–36.
- Moore, MM; Arendt, EK. 2007. Fundamental study on gluten-free flours and their potential use in bread systems. Paper read at Cereal and Europe Spring Meeting, Montpellier, France.
- Moore, MM; Schober, TJ; Dockery, P; Arendt, EK. 2004. Textural comparisons of gluten-free and wheat-based doughs, batters, and breads. *Cereal Chemistry* 81(5):567–575.

- Moreira, R; Chenlo, F; Torres, MD. 2012. Effect of shortenings on the rheology of gluten-free doughs: Study of chestnut flour with chia flour, olive and sunflower oils. *Journal of Texture Studies* 43(5):375–383.
- Moroni, AV; Dal Bello, F; Arendt EK. 2009. Sourdough in gluten-free bread-making: An ancient technology to solve a novel issue? *Food Microbiology* 26:676–84.
- Myers, RH; Montgomery, DC; Anderson-Cook, CM. 2016. *Response Surface Methodology*. Hoboken, New Jersey: John Wiley y Sons, Inc.
- Nejad, MR; Karkhane, M; Marzban, A. et al. 2012. Gluten related disorders. *Gastroenterology and Hepatology from Bed to Bench* 5:1–7.
- Numfon, R. 2017. Effects of different hydrocolloids on properties of gluten-free bread based on small broken rice berry flour. *Food Science and Technology International* 23(4):310–317.
- Obanni, M; Bemiller, JN. 1997. Properties of Some Starch Blends. *Cereal Chemistry* 74(4):431–436.
- Osorio, FA; Steffe, JF. 1987. Back Extrusion of Power Law Fluids. *Journal of Texture Studies* 18(1):43–63.
- Pagano, AE. 2006. Whole grains and the gluten-free diet. *Pract Gastroenterol* 29:66-78.
- Patil, S; Arya, SS. 2019. Characterization of gluten free flatbread: quality improvement by the addition of hydrocolloids and emulsifiers using simplex centroid design. *Journal of Food Measurement and Characterization* 13(1): 821–830.
- Peressini, D; Pin, M; Sensidoni, A. 2011. Rheology and breadmaking performance of rice-buckwheat batters supplemented with hydrocolloids. *Food Hydrocoll.* 25:340–349.

- Pruska-Kędzior, A; Kędzior, Z; Gorący, M; Pietrowska, K; Przybylska, A; Spsychalska, K. 2008. Comparison of rheological, fermentative and baking properties of gluten-free dough formulations. *European Food Research and Technology* 227(5):1523-1536
- Ragae, S; Abdel-Aal, ES. 2006. Pasting properties of starch and protein in selected cereals and quality of their food products. *Food Chemistry* 95(1): 9–18.
- Reilly, NR. 2016. The gluten-free diet: Recognizing fact, fiction, and fad. *The Journal of Pediatrics* 175:206–210.
- Reilly, NR; Green, PH. 2012. Epidemiology and clinical presentations of celiac disease. *Seminars in Immunopathology* 34:1–6.
- Renou, F; Petibon, O; Malhiac, C; Grisel, M. 2013. Effect of xanthan structure on its interaction with locust bean gum: Toward prediction of rheological properties. *Food Hydrocolloids* 32(2):331–340.
- Repo-Carrasco, R; Espinoza, C; Jacobsen, SE. 2003. Nutritional value and use of the Andean crops quinoa (*Chenopodium quinoa*) and kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*). *Food Review International* 19:179-189.
- Repo-Carrasco, R; Hellström, J; Pihlava, J; Mattila, P. 2010. Flavonoids and other phenolic compounds in Andean indigenous grains: Quinoa (*Chenopodium quinoa*), kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*) and kiwicha (*Amaranthus caudatus*). *Food Chemistry* 120: 128-133.
- Repo-Carrasco-Valencia, R; Melgarejo-Cabello, S; Pihlava, JM. 2019. Nutritional Value and Bioactive Compounds in Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), Kañiwa (*Chenopodium pallidicaule* Aellen) and Kiwicha (*Amaranthus caudatus* L.). In *Quinoa: Cultivation, Nutritional Properties and Effects on Health*. Nova Science Publishers, Inc. p. 83–113.

- Repo-Carrasco-Valencia, R; Peña, J; Kallio, H; Salminen, S. 2009. Dietary fiber and other functional components in two varieties of crude and extruded kiwicha (*Amaranthus caudatus*). *Journal of Cereal Science*, 49(2):219–224.
- Rodriguez-Sandoval, E; Cortes-Rodriguez, M; Manjarres-Pinzon, K. 2015. Effect of Hydrocolloids on the Pasting Profiles of Tapioca Starch Mixtures and the Baking Properties of Gluten-Free Cheese Bread. *Journal of Food Processing and Preservation* 39(6):1672–1681.
- Roman, L; Belorio, M; Gomez, M. 2019. Gluten- Free Breads: The Gap Between Research and Commercial Reality. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 1-13.
- Romano, A; Toraldo, G; Cavella, S; y Masi, P. 2007. Description of leavening of bread dough with mathematical modelling. *Journal of Food Engineering* 83(2):142–148.
- Ronda, F; Pérez-Quirce, S; Villanueva, M. 2017. Rheological Properties of Gluten-Free Bread Doughs: Relationship With Bread Quality. In J. Ahmed, P. Ptaszek, y S. Basu (Eds.), *Advances in Food Rheology and Its Applications*. Elsevier. p. 297–334.
- Rosell, CM; Cortez, G; Repo-Carrasco, R. 2009. Breadmaking use of andean crops quinoa, Kañiwa, Kiwicha, and Tarwi. *Cereal Chemistry*, 86(4):386–392.
- Ruiz, GA; Xiao, W; Van Boekel, M; Minor, M; Stieger, M. 2016. Effect of extraction pH on heat-induced aggregation, gelation and microstructure of protein isolate from quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd). *Food Chemistry* 209:203–210.
- Sabanis, D; Tzia, C. 2011. Effect of hydrocolloids on selected properties of gluten-free dough and bread. *Food Science and Technology International* 17(4):279–291.
- Sabanis, D; Lebesi, D; Tzia, C. 2009. Development of fibre-enriched gluten-free bread: A response surface methodology study. *International Journal of Food Sciences and Nutrition* 60(4):174–190.

- Sabanis, D; Tzia, C; 2010. Effect of hydrocolloids on selected properties of gluten-free dough and bread. *Food Sci. Technol. Int.* 17:279–291.
- Sabanis, D; Lebesi, D; Tzia, C. 2009. Effect of dietary fiber enrichment on selected properties of gluten-free bread *LWT- Food Science and Technology* 42:1380–1389.
- Sahagún, M; Gómez, M. 2018. Assessing Influence of Protein Source on Characteristics of Gluten-Free Breads Optimising their Hydration Level. *Food and Bioprocess Technology* 11(9):1686–1694.
- Sanchez, HD; Osella, CA; De la Torre, MA. 2002. Optimization of gluten-free bread prepared from cornstarch, rice flour, and cassava starch. *Journal of Food Science* 67(1): 416–419.
- Sanchez, HD; Osella, CA; De La Torre, C.A. 2004. Use of response surface methodology to optimize gluten-free fortified with soy flour and dry milk *Food Science and Technology International* 10:5–9.
- Santos, FG; Fratelli, C; Muniz, DG; Capriles, VD. 2018. Mixture Design Applied to the Development of Chickpea-Based Gluten-Free Bread with Attractive Technological, Sensory, and Nutritional Quality (en línea). *Journal of Food Science* 83(1):188-197.
- Sanz-Penella, JM; Wronkowska, M; Soral-Smietana, M; Haros, M. 2013. Effect of whole amaranth flour on bread properties and nutritive value. *LWT - Food Science and Technology* 50(2):679–685.
- Sapone, A; Bai, J; Ciacci, C; Dolinsek, J. et al. 2012 Spectrum of gluten-related disorders: Consensus on new nomenclature and classification. *BMC Medicine* 10, article number 13.
- Sathe, SK; Deshpande, SS; Salunkhe, DK. 1982. Functional Properties of Lupin Seed (*Lupinus mutabilis*) Proteins and Protein Concentrates. *Journal of Food Science* 47(2):491–497.

- Scazzina, F; Dall'Asta, M; Pellegrini, N; Brighenti, F. 2015. Glycaemic index of some commercial gluten-free foods. *European Journal of Nutrition* 54(6):1021–1026.
- Schober, JT; Messerschmidt, M; Bean, SR; Park, SH; Arendt, EK. 2005. Gluten-free bread from sorghum: quality differences among hybrids. *Cereal Chemistry* 82:394–404.
- Schoenlechner, R. 2017. Pseudocereals in Gluten- Free Products. In *Pseudocereals* (eds C. M. Haros and R. Schonlechner). Wiley y Sons, Ltd, UK.
- Schoenlechner, R; Mandala, I; Kiskini, A; Kostaropoulos, A; Berghofer, E. 2010. Effect of water, albumen and fat on the quality of gluten-free bread containing amaranth. *International Journal of Food Science and Technology*, 45(4):661–669.
- Schoenlechner, R; Linsberger, G; Kaczyk, L; Berghofer, E. 2006. Production of gluten-free short dough biscuits from the pseudocereals amaranth, quinoa and buckwheat with common bean. *Ernaehrung/Nutrition* 30:101–107.
- Sciarini, LS; Ribotta, PD; León, AE; Pérez, GT. 2012. Incorporation of several additives into gluten free breads: Effect on dough properties and bread quality. *Journal of Food Engineering* 111:590–597.
- Sciarini, LS; Ribotta, PD; León, AE; Pérez, GT. 2010a. Effect of hydrocolloids on gluten-free batter properties and bread quality. *International Journal of Food Science and Technology* 45(11):2306–2312.
- Sciarini, LS; Ribotta, PD; León, AE; Pérez, GT. 2010b. Influence of Gluten-free Flours and their Mixtures on Batter Properties and Bread Quality. *Food and Bioprocess Technology* 3(4):577–585.
- Singh, N; Kaur, S; Kaur, A; Isono, N; Ichihashi, Y; Noda, T; Rana, JC. 2014. Structural, thermal, and rheological properties of *Amaranthus hypochondriacus* and *Amaranthus caudatus* starches. *Starch/ Staerke* 66(5–6):457–467.

- Steffolani, ME; León, AE; Pérez, GT. 2013. Study of the physicochemical and functional characterization of quinoa and kañiwa starches. *Starch/Staerke* 65(11–12):976–983.
- Sumnu, G; Koksel, F; Sahin, S; Basman, A; Meda, V. 2009. The effects of xanthan and guar gums on staling of gluten-free rice cakes baked in different ovens. *International Journal of Food Science y Technology* 45(1):87–93.
- Toledo, R. T. 2007. *Fundamentals of Food Process Engineering (Third Edit)*. New York, USA: Springer Science, Business Media.
- Thompson, T. 2000. Folate, Iron, and Dietary Fiber Contents of the Gluten-free Diet. *Journal of the American Dietetic Association* 100(11):1389–1396.
- Thompson, T; Dennis, M; Higgins, LA; Lee, AR; Sharrett, MK. 2005. Gluten-free diet survey: are Americans with coeliac disease consuming recommended amounts of fibre, iron, calcium and grain foods? *Journal of Human Nutrition and Dietetics* 18(3):163–169.
- Tosi, E; Ré, E; Ciappini, MC; Masciarelli, R. 1996. Aplicación de la técnica del lecho fluidizado a la producción de roseta de amaranto. *Alimentaria* 269: 45-47.
- Tsatsaragkou, K; Kara, T; Ritzoulis, C; Mandala, I; Rosell, CM. 2017. Improving Carob Flour Performance for Making Gluten-Free Breads by Particle Size Fractionation and Jet Milling 831–841.
- Tsatsaragkou, K; Protonotariou, S; Mandala, I; 2016. Structural role of fibre addition to increase knowledge of non-gluten bread. *Journal of Cereal Science* 67:58–67.
- Tunç, MT; Kahyaoglu, T. 2016. Improving rheological and baking properties of gluten-free breads using defatted hazelnut flour with various gums. *Int J Food Eng* 12:343–353.

- Turkut, GM; Cakmak, H; Kumcuoglu, S; Tavman, S. 2016. Effect of quinoa flour on gluten-free bread batter rheology and bread quality. *Journal of Cereal Science*, 69:174–181.
- Urban, P. 2007. Ridascreen Gliadin competitive – Gluten, Prolamin und Gliadine. *Der Lebensmittelbrief* 5/6:82–83.
- Urlacher, B; Noble, O. 1997. Xanthan gum. In *Thickening and Gelling Agents for Food* Boston, MA: Springer US. p. 284–311.
- Vega-Gálvez, A; Miranda, M; Vergara, J; Uribe, E; Puente, L; Martínez, EA. 2010. Nutrition facts and functional potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), an ancient Andean grain: a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 90: 2541-2547.
- Vidaurre-Ruiz, JM; Salas-Valerio, WF; Repo-Carrasco-Valencia, R. 2019. Propiedades de pasta y texturales de las mezclas de harinas de quinua (*Chenopodium quinoa*), kiwicha (*Amaranthus caudatus*) y tarwi (*Lupinus mutabilis*) en un sistema acuoso. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 21(1): 5–14.
- Vidaurre-Ruiz, J; Matheus-Diaz, S; Salas-Valerio, F; Barraza-Jauregui, G; Schoenlechner, R; Repo-Carrasco-Valencia, R. 2019. Influence of tara gum and xanthan gum on rheological and textural properties of starch-based gluten-free dough and bread (en línea). *European Food Research and Technology* 245(7):1347-1355.
- Villarino, CBJ; Jayasena, V; Coorey, R; Chakrabarti-Bell, S; Johnson, SK. 2016. Nutritional, Health, and Technological Functionality of Lupin Flour Addition to Bread and Other Baked Products: Benefits and Challenges. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 56(5):835–857.
- Villarino, CBJ; Jayasena, V; Coorey, R; Chakrabarti-Bell, S; Foley, R; Fanning, K; Johnson, SK. 2015. The effects of lupin (*Lupinus angustifolius*) addition to wheat bread

- on its nutritional, phytochemical and bioactive composition and protein quality. *Food Research International*, 76(P1):58–65.
- Volta, U; Belletini, S; Bianchi, FB. et al. 2001. High prevalence of coeliac disease in Italian general population. *Digestive Diseases and Sciences* 46:1500–1505.
- Wild, D; Robins, GG; Burley, VJ; Howdle, PD. 2010. Evidence of high sugar intake, and low fibre and mineral intake, in the gluten-free diet. *Alimentary Pharmacology and Therapeutics*, 32(4):573–581.
- Witczak, M; Ziobro, R; Juszczak, L; Korus, J. 2016. Starch and starch derivatives in gluten-free systems: a review. *Journal of Cereal Science* 67:46–57.
- Wrigley, C. 2003. The Lupin - The grain with no starch. *Cereal Foods World*, 48(1):30–31.
- Wu, T; Taylor, C; Nebl, T; Ng, K; Bennett, LE. 2017. Effects of chemical composition and baking on in vitro digestibility of proteins in breads made from selected gluten-containing and gluten-free flours. *Food Chemistry* 233: 514–524.
- Wu, Y; Ding, W; Jia, L; He, Q. 2015. The rheological properties of tara gum (*Caesalpinia spinosa*). *Food Chemistry*, 168:366–371.
- Wüstenberg, T. 2014. General Overview of Food Hydrocolloids. In *Cellulose and Cellulose Derivatives in the Food Industry*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH y Co. p. 1–68.
- Yilmaz, MT; Yildiz, Ö; Yurt, B; Toker, OS; Karaman, S; Baştürk, A. 2015. A mixture design study to determine interaction effects of wheat, buckwheat, and rice flours in an aqueous model system. *LWT - Food Science and Technology* 61(2):583–589.

- Ziobro, R; Juszcak, L; Witczak, M; Korus, J. 2016. Non-gluten proteins as structure forming agents in gluten free bread. *Journal of Food Science and Technology* 53(1):571–580.
- Ziobro, R; Korus, J; Juszcak, L; Witczak, T. 2013. Influence of inulin on physical characteristics and staling rate of gluten-free bread. *Journal of Food Engineering* 116(1): 21–27.
- Ziobro, R; Witczak, T; Juszcak, L; Korus, J. 2013. Supplementation of gluten-free bread with non-gluten proteins. Effect on dough rheological properties and bread characteristic. *Food Hydrocolloids* 32(2):213–220.
- Zhu, F; Hua, Y; Li, G. 2020. Physicochemical properties of potato, sweet potato and quinoa starch blends. *Food Hydrocolloids*, 100:105278.

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Códigos de programación en Visual Studio 2015 desarrollados para la aplicación Back Extrusion Analyzer 1.1 v

Microsoft Visual Studio Profesional – 2015: CODE Back Extrusion Analyzer 1.1v

```
Private Sub Button6_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles Button6.Click

    Dim Max As Double = 0
    For Each rws As DataGridViewRow In DataGridView1.Rows
        If Max < rws.Cells(2).Value Then Max = rws.Cells(2).Value
    Next

    Dim Min As Double = Max
    For Each rws As DataGridViewRow In DataGridView1.Rows
        If Min > rws.Cells(2).Value Then Min = rws.Cells(2).Value
    Next
    'Label11.Text = Format(Min * 1000, "#.##")

    Dim Area As Double

    Dim totalimp As String = 0
    Dim totalpar As String = 0

    Dim ini, fin As Double

    ini = TextBox1.Text
    fin = TextBox2.Text

    For i As Integer = ini + 1 To fin - 1 Step 2
        totalimp += DataGridView1.Rows(i).Cells(2).Value 'SUMA IMPAR
    Next

    For i As Integer = ini + 2 To fin - 2 Step 2
        totalpar += DataGridView1.Rows(i).Cells(2).Value 'SUMA PAR
    Next

    Area = (0.1 / 3) * (DataGridView1.Rows(ini).Cells(2).Value +
    DataGridView1.Rows(fin).Cells(2).Value + 4 * totalimp + 2 * totalpar)

    'Label10.Text = Format(Area * 1000, "#.##")

    Dim Area1 As Double

    Dim totalimp1 As String = 0
    Dim totalpar1 As String = 0

    Dim ini1, fin2 As Double

    ini1 = TextBox4.Text
    fin2 = TextBox3.Text
```

```

For i As Integer = ini1 + 1 To fin2 - 1 Step 2
    totalimp1 += DataGridView1.Rows(i).Cells(2).Value 'SUMA IMPAR
Next

For i As Integer = ini1 + 2 To fin2 - 2 Step 2
    totalpar1 += DataGridView1.Rows(i).Cells(2).Value 'SUMA PAR
Next

Area1 = (0.1 / 3) * (DataGridView1.Rows(ini1).Cells(2).Value +
DataGridView1.Rows(fin2).Cells(2).Value + 4 * totalimp1 + 2 * totalpar1)

' Label12.Text = Format(Area1 * 1000, "#.##")

DataGridView2.Rows.Clear()
DataGridView2.ColumnCount = 4
DataGridView2.Columns(0).HeaderText = "Firmeza (gf)"
DataGridView2.Columns(1).HeaderText = "Consistencia (gf.s)"
DataGridView2.Columns(2).HeaderText = "Cohesividad (gf)"
DataGridView2.Columns(3).HeaderText = "Índice de viscosidad (gf.s)"

DataGridView2.Rows(0).Cells(0).Value = Format(Max * 1000, "#.###")
DataGridView2.Rows(0).Cells(1).Value = Format(Area * 1000, "#.###")
DataGridView2.Rows(0).Cells(2).Value = Format(Min * 1000, "#.###")
DataGridView2.Rows(0).Cells(3).Value = Format(Area1 * 1000, "#.###")

End Sub

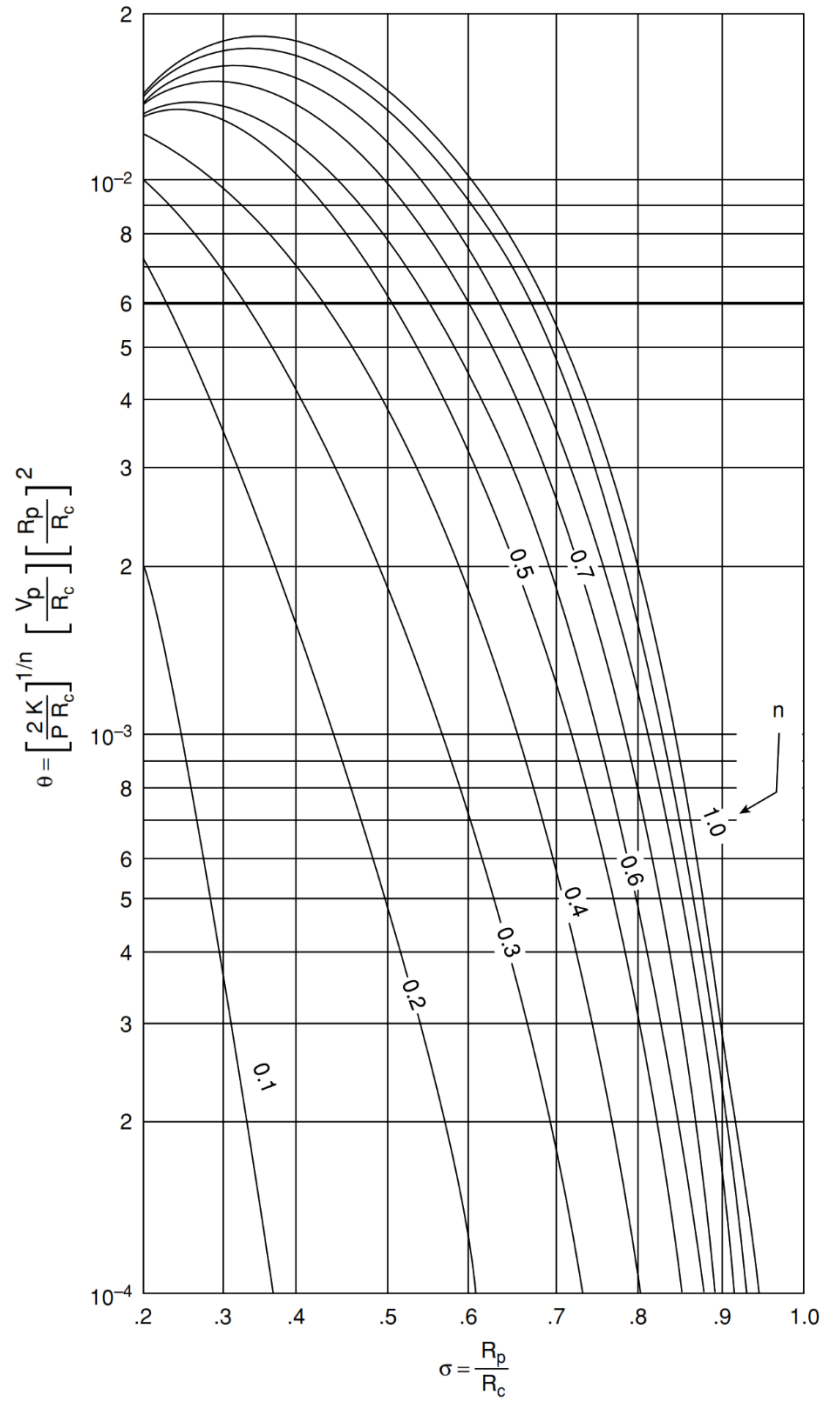
```


Anexo 2: Valores de λ para diferentes valores de n y σ

σ	n									
	<i>0.1</i>	<i>0.2</i>	<i>0.3</i>	<i>0.4</i>	<i>0.5</i>	<i>0.6</i>	<i>0.7</i>	<i>0.8</i>	<i>0.9</i>	<i>1</i>
0.1	0.4065	0.4889	0.5539	0.6009	0.6344	0.6586	0.6768	0.6907	0.7017	0.7106
0.2	0.514	0.568	0.6092	0.6398	0.6628	0.6803	0.694	0.7049	0.7138	0.7211
0.3	0.5951	0.6313	0.6587	0.6794	0.6953	0.7078	0.7177	0.7259	0.7326	0.7382
0.4	0.6647	0.6887	0.7068	0.7206	0.7313	0.7399	0.7469	0.7527	0.7575	0.7616
0.5	0.728	0.7433	0.7547	0.7636	0.7705	0.7761	0.7807	0.7846	0.7878	0.7906
0.6	0.7871	0.7962	0.803	0.8082	0.8124	0.8158	0.8186	0.8209	0.8229	0.8246
0.7	0.8433	0.848	0.8516	0.8544	0.8566	0.8584	0.8599	0.8611	0.8622	0.8631
0.8	0.8972	0.8992	0.9007	0.9019	0.9028	0.9035	0.9042	0.9047	0.9052	0.9055
0.9	0.9493	0.9498	0.9502	0.9504	0.9507	0.9508	0.951	0.9511	0.9512	0.9513

Fuente: Osorio y Steffe (1987)

Anexo 3: Gráfico para determinar el valor de θ para determinar la velocidad de corte a partir de la velocidad del émbolo.

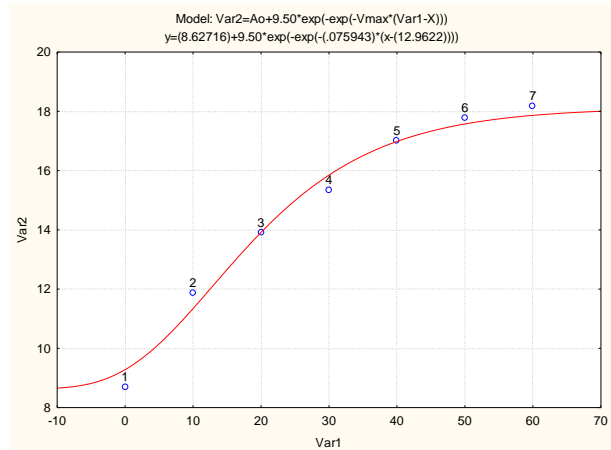


Fuente: Osorio y Steffe (1987)

Anexo 4: Fijación de curvas no lineales obtenidas en el proceso de fermentación de masas libres de gluten con harinas de cultivos andinos

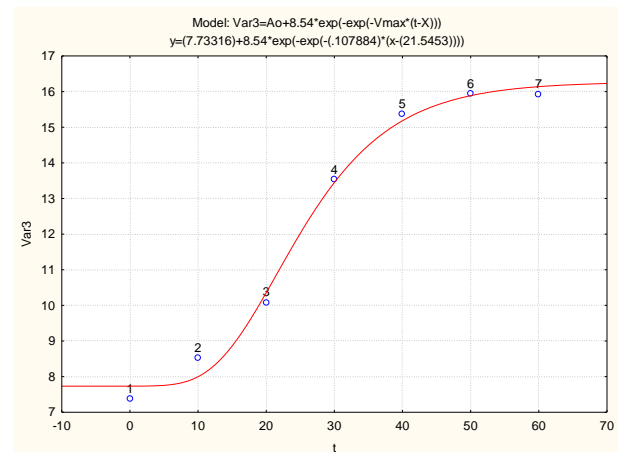
Muestra: Masa libre de gluten con harina de quinua (10%).

Model is: $Var2 = A_0 + 9.50 \cdot \exp(-\exp(-V_{max} \cdot (Var1 - X)))$
 Dependent variable: $Var2$
 Independent variables: 1
 Loss function: least squares
 Final value: 1.04012678
 Proportion of variance accounted for: .98559022
 $R^2 = .99276897$



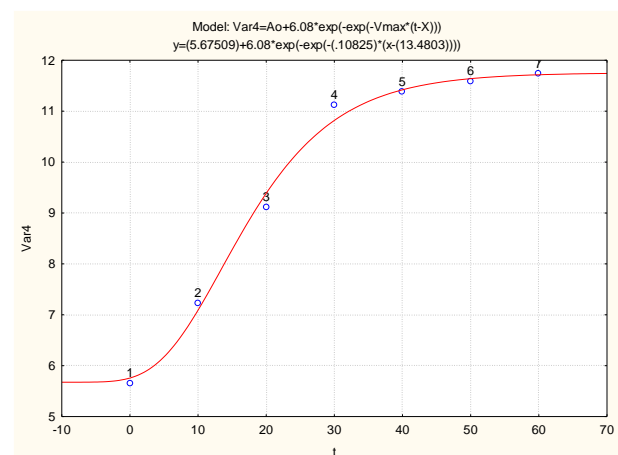
Muestra: Masa libre de gluten con harina de quinua (30%).

Model is: $Var3 = A_0 + 8.54 \cdot \exp(-\exp(-V_{max} \cdot (t - X)))$
 Dependent variable: $Var3$
 Independent variables: 1
 Loss function: least squares
 Final value: .57468081
 Proportion of variance accounted for: .99286251
 $R^2 = .99642486$



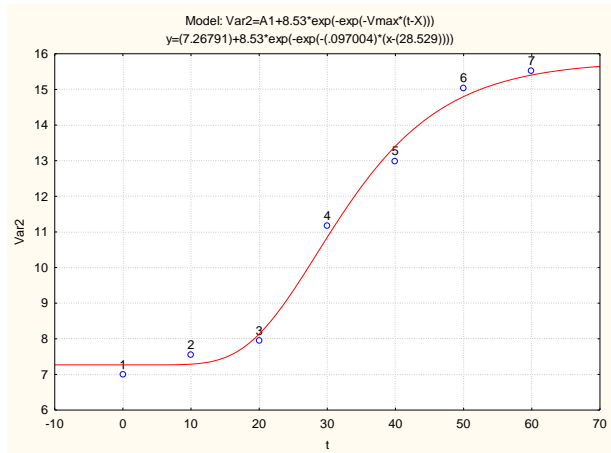
Muestra: Masa libre de gluten con harina de quinua (50%).

Model is: $Var4 = A_0 + 6.08 \cdot \exp(-\exp(-V_{max} \cdot (t - X)))$
 Dependent variable: $Var4$
 Independent variables: 1
 Loss function: least squares
 Final value: .205604
 Proportion of variance accounted for: .99418267
 $R^2 = .99708709$



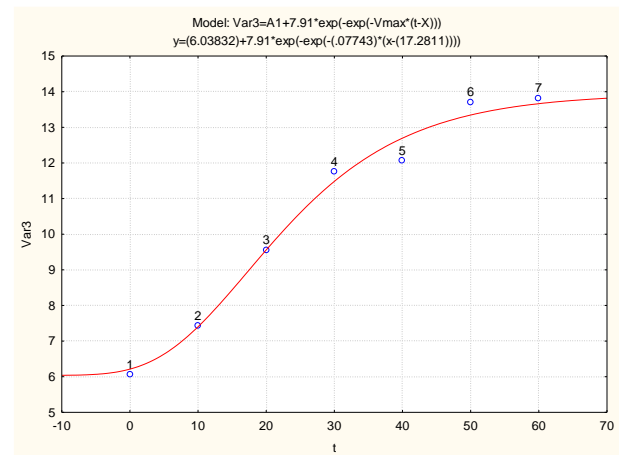
Muestra: Masa libre de gluten con harina de kiwicha (10%).

Model is: $Var2=A1+8.53*\exp(-\exp(-Vmax*(t-X)))$
 Dependent variable: Var2
 Independent variables: 1
 Loss function: least squares
 Final value: .52177265
 Proportion of variance accounted for: .99330866
 $R^2 = .99664872$



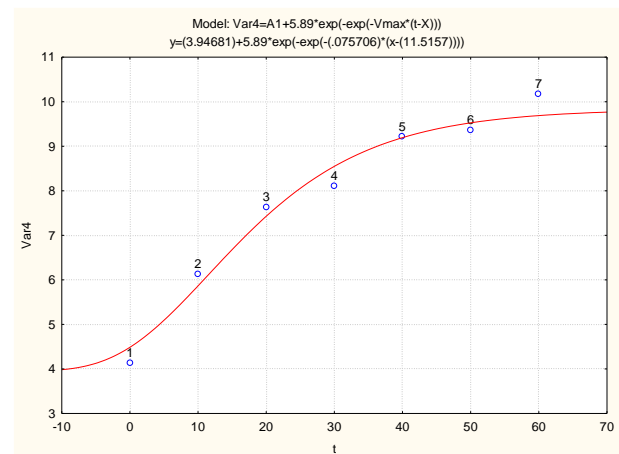
Muestra: Masa libre de gluten con harina de kiwicha (30%).

Model is: $Var3=A1+7.91*\exp(-\exp(-Vmax*(t-X)))$
 Dependent variable: Var3
 Independent variables: 1
 Loss function: least squares
 Final value: .65275564
 Proportion of variance accounted for: .98816934
 $R^2 = .99406707$



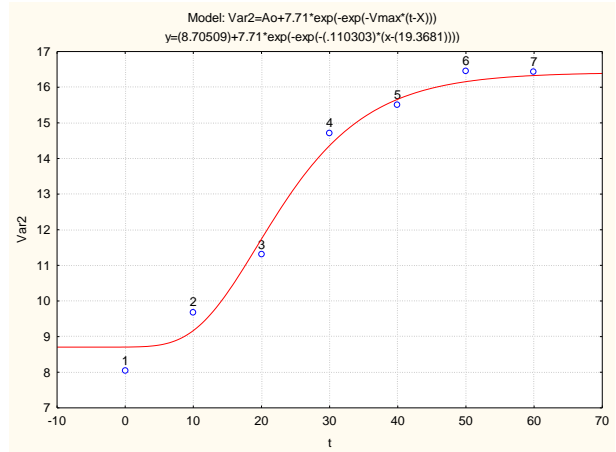
Muestra: Masa libre de gluten con harina de kiwicha (50%).

Model is: $Var4=A1+5.89*\exp(-\exp(-Vmax*(t-X)))$
 Dependent variable: Var4
 Independent variables: 1
 Loss function: least squares
 Final value: .69317966
 Proportion of variance accounted for: .97376233
 $R^2 = .98679396$



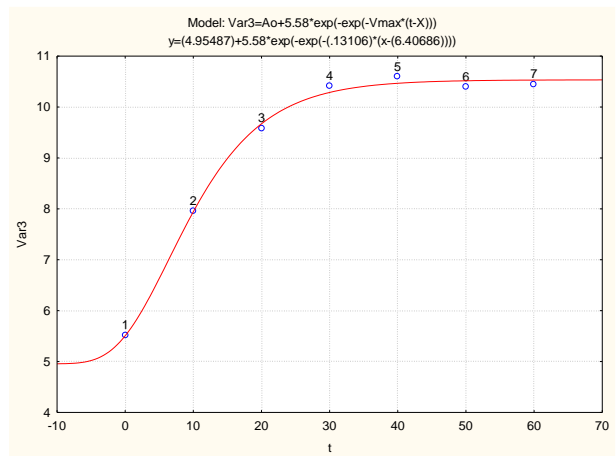
Muestra: Masa libre de gluten con harina de tarwi (10%).

Model is: $\text{Var2} = A_0 + 7.71 \cdot \exp(-\exp(-V_{\text{max}} \cdot (t-X)))$
 Dependent variable: Var2
 Independent variables: 1
 Loss function: least squares
 Final value: 1.14685354
 Proportion of variance accounted for: .98391768
 $R^2 = .99192625$



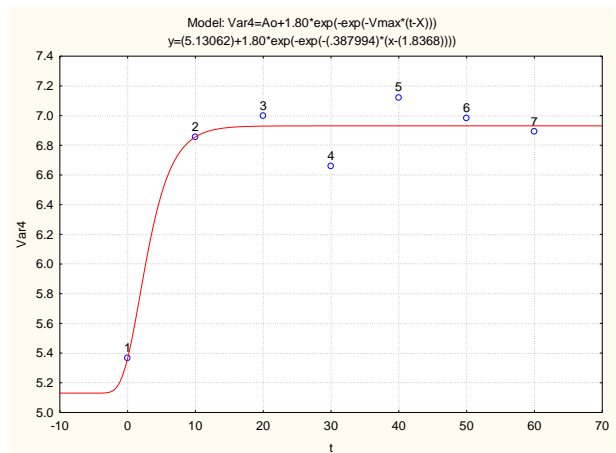
Muestra: Masa libre de gluten con harina de tarwi (20%).

Model is: $\text{Var3} = A_0 + 5.58 \cdot \exp(-\exp(-V_{\text{max}} \cdot (t-X)))$
 Dependent variable: Var3
 Independent variables: 1
 Loss function: least squares
 Final value: .0609625
 Proportion of variance accounted for: .99718918
 $R^2 = .9985936$



Muestra: Masa libre de gluten con harina de tarwi (30%).

Model is: $\text{Var4} = A_0 + 1.80 \cdot \exp(-\exp(-V_{\text{max}} \cdot (t-X)))$
 Dependent variable: Var4
 Independent variables: 1
 Loss function: least squares
 Final value: .12035834
 Proportion of variance accounted for: .94509757
 $R^2 = .97216129$



Anexo 5: PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS

Artículos publicados en revistas indexadas

Vidaurre-Ruiz, J., Matheus-Diaz, S., Salas-Valerio, F., Barraza-Jauregui, G., Schoenlechner, R., & Repo-Carrasco-Valencia, R. (2019). Influence of tara gum and xanthan gum on rheological and textural properties of starch-based gluten-free dough and bread. *European Food Research and Technology*, 245(7), 1347–1355. <https://doi.org/10.1007/s00217-019-03253-9>

Vidaurre-Ruiz, J. M., Salas-Valerio, W. F., & Repo-Carrasco-Valencia, R. (2019). Propiedades de pasta y texturales de las mezclas de harinas de quinoa (*Chenopodium quinoa*), kiwicha (*Amaranthus caudatus*) y tarwi (*Lupinus mutabilis*) en un sistema acuoso. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 21(1), 5–14. <https://doi.org/10.18271/ria.2019.441>

Repo-Carrasco-Valencia, R., & **Vidaurre-Ruiz, J. M.** (2019). Quinoa and Other Andean Ancient Grains: Supergrains for the Future. *Cereal Foods World*, 64 (5). 1-10. <https://doi.org/10.1094/CFW-64-5-0053>

Publicaciones en congresos científicos

Vidaurre-Ruiz, J., Luna-Mercado, G., Schonlechner, R., Repo-Carrasco-Valencia, R. (2019). Development of gluten-free bread with quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) and tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet) flours. *Abstract Book XV ILC: Developing lupin crop into a modern and sustainable food and feed source*. Cochabamba, Bolivia.

Vidaurre-Ruiz, J., Schonlechner, R., Repo-Carrasco-Valencia, R. (2019). Effect of tara gum and xanthan gum on starch-based gluten free dough properties and bread quality. *5th International Symposium on Gluten-Free Cereal Products and Beverages*. Leuven, Belgium.

Vidaurre-Ruiz, J., Schonlechner, R., Repo-Carrasco-Valencia, R. (2019). Evaluación de las propiedades texturales de las masas para el desarrollo de panes libres de gluten con harinas de granos andinos. III Congreso Nacional de Innovaciones Agroindustriales de Productos Andinos y Amazónicos (ALINNOVA). Lima, Perú.

Vidaurre-Ruiz., J., Salas-Valerio, W., Repo-Carrasco-Valencia, R., Schoenlechner, R. (2017). Propiedades de pasta en mezclas de harinas de quinua, kiwicha y tarwi, como una herramienta de predicción para la industria panadera sin gluten. *Libro resumen del VI Congreso Mundial de la Quinoa y III Simposio Internacional de Granos Andinos*, Puno, Perú.

Repo-Carrasco-Valencia, R., **Vidaurre-Ruiz., J.,** Salas-Valerio, W. Schoenlechner, R. (2017). Effects of quinoa, kiwicha and tarwi flours on pasting and textural properties using a mixture design approach. *International Annual Meeting of American Association of Cereal Chemists (AACC)*. San Diego - California, United States of America.