

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS



**“INFLUENCIA DE LA OKARA DE TARWI SONICADA SOBRE LAS
CARACTERÍSTICAS DE CALIDAD TECNOLÓGICA DE PANES DE
MOLDE LIBRES DE GLUTEN”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERA EN INDUSTRIAS
ALIMENTARIAS**

CLAUDIA ISABEL HUAMANÍ PERALES

LIMA – PERÚ

2024

**La UNALM es la titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación
(Art. 24. Reglamento de Propiedad Intelectual)**

INFLUENCIA DE LA OKARA DE TARWI SONICADA SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS DE CALIDAD TECNOLÓGICA DE PANES DE MOLDE LIBRES DE GLUTEN

INFORME DE ORIGINALIDAD

14%

INDICE DE SIMILITUD

12%

FUENTES DE INTERNET

8%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

Dr. Julio Vidaurre Ruiz
30/07/2024

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
2	repositorio.unajma.edu.pe Fuente de Internet	1%
3	orcid.org Fuente de Internet	1%
4	uvadoc.uva.es Fuente de Internet	1%
5	doi.org Fuente de Internet	1%
6	rdu.unc.edu.ar Fuente de Internet	1%
7	dx.doi.org Fuente de Internet	<1%
8	es.scribd.com Fuente de Internet	<1%

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

**“INFLUENCIA DE LA OKARA DE TARWI SONICADA SOBRE LAS
CARACTERÍSTICAS DE CALIDAD TECNOLÓGICA DE PANES DE
MOLDE LIBRES DE GLUTEN”**

Presentado por:

CLAUDIA ISABEL HUAMANÍ PERALES

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERA EN INDUSTRIAS
ALIMENTARIAS**

Sustentado y aprobado ante el siguiente jurado:

Fanny E. Ludeña Urquiza, PhD.
PRESIDENTE

Dr. Luis A. Condezo Hoyos
MIEMBRO

Mg.Sc. Silvia V. Melgarejo Cabello
MIEMBRO

Dr. Julio M. Vidaurre Ruiz
ASESOR

Dr. Dario M. Cabezas
CO-ASESOR

LIMA – PERÚ

2024

DEDICATORIA

A mis padres, Cirilo y Teresa, quienes siempre están acompañándome, y a mi hermana Patricia, por su motivación en el camino.

A Sigrid Glotzbach, por compartir mis alegrías con un cariño genuino.

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor, el Dr. Julio Vidaurre, por su dedicada labor de guía durante todo el proceso y brindarme las oportunidades para afianzar mis habilidades en investigación.

A mi co-asesor, el Dr. Darío Cabezas, por su apoyo e importantes contribuciones en la elaboración de este trabajo de investigación.

A la PhD. Ritva Repo Carrasco, líder del proyecto ALIMENTAR en el cual se enmarca esta investigación, por brindarme la oportunidad de participar en dicho proyecto como tesista de pregrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC), por otorgar el apoyo financiero para la ejecución de esta investigación a través del Programa PROCIENCIA, en el marco del Concurso E041-2023-01 [Contrato N° PE501082513-2023-PROCIENCIA].

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN

ABSTRACT

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1.	TARWI: COMPOSICIÓN Y PROCESAMIENTO.....	3
2.1.1.	COMPOSICIÓN	3
2.1.2.	PROCESAMIENTO	6
2.2.	OKARA, UN SUBPRODUCTO DEL PROCESAMIENTO DE LEGUMINOSAS	8
2.2.1.	ORIGEN Y PROBLEMÁTICA RELACIONADA	8
2.2.2.	EXTENSIÓN DE USO DEL TÉRMINO OKARA	9
2.2.3.	APLICACIÓN DE POSTRATAMIENTOS EN LA OKARA.....	10
2.3.	ULTRASONIDO Y SU EFECTO EN MATRICES ALIMENTARIAS	11
2.3.1.	ULTRASONIDO: DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN	11
2.3.2.	MECANISMO DEL ULTRASONIDO DE ALTA INTENSIDAD	12
2.3.3.	EFECTO DEL ULTRASONIDO EN LAS INTERACCIONES DE UN MATRIZ ALIMENTARIA	14
2.4.	PANES LIBRES DE GLUTEN	16
2.4.1.	GLUTEN: APORTE TECNOLÓGICO Y AFECCIONES RELACIONADAS ..	16
2.4.2.	DESAFÍOS Y ESTRATEGIAS PARA ABORDAR LA AUSENCIA DE GLUTEN EN PANIFICADOS	17
III.	METODOLOGÍA	20
3.1.	LUGAR DE EJECUCIÓN	20
3.2.	MATERIAS PRIMAS E INSUMOS	20
3.2.1.	MATERIA PRIMA	20
3.2.2.	INSUMOS	20

3.3.	MATERIALES, REACTIVOS Y EQUIPOS.....	21
3.3.1.	MATERIALES.....	21
3.3.2.	REACTIVOS.....	22
3.3.3.	EQUIPOS	22
3.4.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	23
3.4.1.	OBTENCIÓN DE OKARAS DE TARWI.....	23
3.4.2.	APLICACIÓN DEL ULTRASONIDO PARA LA OBTENCIÓN DE OKARA DE TARWI SONICADA (OKS).....	25
3.4.3.	ELABORACIÓN DE PANES LIBRES DE GLUTEN	28
3.5.	MÉTODOS DE ANÁLISIS	30
3.5.1.	CARACTERIZACIÓN DE LAS OKARAS DE TARWI	30
3.5.2.	PROPIEDADES TECNOFUNCIONALES DE LAS OKARAS DE TARWI.....	31
3.5.3.	ANÁLISIS DE LOS BATIDOS DE PANES LIBRES DE GLUTEN	33
3.5.4.	ANÁLISIS DE LOS PANES LIBRES DE GLUTEN	36
3.6.	DISEÑO EXPERIMENTAL.....	38
3.7.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	40
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	41
4.1.	CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE TRABAJO EN EL TRATAMIENTO DE ULTRASONIDO	41
4.2.	CARACTERIZACIÓN DE LAS OKARAS DE TARWI	44
4.2.1.	COMPOSICIÓN PROXIMAL.....	44
4.2.2.	POTENCIAL ZETA.....	45
4.2.3.	PROPIEDADES TECNOFUNCIONALES.....	46
4.3.	ANÁLISIS DE LOS BATIDOS.....	50
4.3.1.	PERFIL DE VISCOSIDAD	50
4.3.2.	PARÁMETROS DERIVADOS DEL MODELAMIENTO DEL PERFIL DE VISCOSIDAD.....	52
4.3.3.	PERFIL DE TEXTURA.....	55

4.4.	CARACTERIZACIÓN DE LOS PANES LIBRES DE GLUTEN.....	58
4.4.1.	ANÁLISIS FÍSICO	58
4.4.2.	ESTRUCTURA ALVEOLAR DE LA MIGA	60
4.4.3.	COLOR DE CORTEZA Y MIGA	61
4.4.4.	ANÁLISIS DEL PERFIL DE TEXTURA.....	64
V.	CONCLUSIONES	67
VI.	RECOMENDACIONES	69
VII.	BIBLIOGRAFÍA	70
VIII.	ANEXOS	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Composición proximal de los granos de tarwi	4
Tabla 2:	Efectos del ultrasonido en las interacciones de un matriz alimentaria	15
Tabla 3:	Ingredientes comunes en formulaciones de los panes libres de gluten	18
Tabla 4:	Formulaciones de los tratamientos de panes libres de gluten.....	28
Tabla 5:	Diseño experimental de la investigación	39
Tabla 6:	Parámetros de operación del tratamiento de ultrasonido.....	41
Tabla 7:	Caracterización fisicoquímica de las okaras de tarwi.....	44
Tabla 8:	Propiedades tecnofuncionales de las okaras de tarwi	47
Tabla 9:	Propiedades de pasta de las formulaciones de pan libre de gluten.....	50
Tabla 10:	Parámetros derivados del modelamiento de las curvas de viscosidad de los batidos de pan libre de gluten	53
Tabla 11:	Propiedades texturales de los batidos de pan libre de gluten.....	55
Tabla 12:	Caracterización física de los panes libres de gluten	58
Tabla 13:	Caracterización de la estructura alveolar de la miga de los panes libres de gluten	60
Tabla 14:	Parámetros de color en la corteza y miga de panes libres de gluten.....	63
Tabla 15:	Propiedades texturales de la miga de los panes libres de gluten	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Procesamiento integral del grano de tarwi.....	7
Figura 2:	Obtención tradicional de la okara de soya.....	8
Figura 3:	Diagrama esquemático del efecto de cavitación.....	12
Figura 4:	Enfoques para el desarrollo de productos sin gluten	17
Figura 5:	Esquema del sistema de trabajo en el tratamiento de ultrasonido	25
Figura 6:	Flujo de operaciones para la obtención de okaras de tarwi (OK y OKS).....	26
Figura 7:	Flujo de elaboración de los panes libres de gluten	29
Figura 8:	Diagrama de la curva de viscosidad y su división por etapas.....	34
Figura 9:	Perfil de textura de la prueba de <i>Back Extrusion</i>	36
Figura 10:	Mediciones de temperatura de la dispersión de okara de tarwi al inicio (a) y final (b) del tratamiento de ultrasonido.....	43
Figura 11:	Perfiles de viscosidad de las formulaciones de pan libre de gluten.....	56
Figura 12:	Distribución alveolar en la miga de panes libres de gluten; ¡Error! Marcador no definido.	

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: FLUJO GRÁFICO DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE OKARA DE TARWI HÚMEDA.....	85
ANEXO 2: RESUMEN DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LOS TRATAMIENTOS DE OKARAS DE TARWI.....	86
ANEXO 3: RESUMEN DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LOS TRATAMIENTOS DE PANES LIBRES DE GLUTEN EVALUADOS.....	88
ANEXO 4: CÁLCULOS DEL ENSAYO CALORÍMETRO PARA DETERMINAR LA POTENCIA DE ULTRASONIDO.....	91
ANEXO 5: COEFICIENTES OBTENIDOS DEL MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE LAS CURVAS DE VISCOSIDAD.....	94
ANEXO 6: GRÁFICOS DE LOS PANES OBTENIDOS CORRESPONDIENTES A LOS TRATAMIENTOS EVALUADOS.....	95
ANEXO 7: PÓSTER DE PARTICIPACIÓN EN CONGRESO INTERNACIONAL (ICBC 2024) CON EL PRESENTE TEMA DE INVESTIGACIÓN.....	97

RESUMEN

El tarwi es una leguminosa que recientemente ha atraído un creciente interés como fuente de proteínas y grasas. La extracción de proteínas a partir de la harina desgrasada de tarwi genera un residuo insoluble denominado “okara”. La presente investigación tuvo como objetivo obtener las okaras de tarwi en sus formas nativa (OK) y sonicada (OKS), y posteriormente aplicarlas en panes de molde libres de gluten para evaluar su influencia en la calidad tecnológica del producto final. Los tratamientos evaluados incluyeron formulaciones con adición de OK y OKS a los niveles de 3 % y 5 %, cada una por separado (OK3, OK5, OKS3 y OKS5), así como, un tratamiento control con goma xantana al 0,5 %. El tratamiento de ultrasonido (20 kHz, 40 % amplitud, pulso 10 s /10 s, 10 min) impactó significativamente en las propiedades fisicoquímicas de la okara de tarwi (composición proximal y carga neta superficial) reflejado a su vez en una mejora de sus propiedades tecnofuncionales (capacidad de absorción de agua y aceite, propiedades emulsionantes y capacidad de hinchamiento). Los panes con okara de tarwi sostuvieron estructuras estables en la miga, con distinta capacidad de extensibilidad para retener las burbujas de gas según el tratamiento. Las formulaciones OK5 y OKS3 exhibieron las características de calidad panadera más atractivas en términos de volumen específico (1.82 – 1.83 mL/g), estructura alveolar (39.58 – 45.50 alveolos/cm²) y propiedades texturales de la miga (masticabilidad disminuida en 9 a 12%). Los resultados obtenidos demuestran el potencial de la okara de tarwi como ingrediente mejorador de la calidad tecnológica de panes sin gluten, y los efectos favorables del ultrasonido en la eficiencia del desempeño de la okara de tarwi, al lograr resultados satisfactorios en el producto estudiado con un menor nivel de adición respecto a su forma nativa (OK). Además, se identificó un umbral máximo de adición de OKS (5%), después del cual sus efectos positivos podrían revertirse por la competencia de agua con los demás ingredientes en la matriz. La relevancia de este estudio radica en el marco de la economía circular y la creciente tendencia a la formulación de alimentos con etiqueta limpia.

Palabras clave: Subproducto de leguminosas, lupino andino, tecnología verde, enfermedad celíaca

ABSTRACT

Tarwi is a legume that has recently attracted increasing interest as a source of protein and fat. Extracting proteins from defatted tarwi flour generates an insoluble residue called “okara”. The aim of this research was to obtain tarwi okara in its native (OK) and sonicated (OKS) forms, and subsequently apply them in the production of gluten-free bread to evaluate their influence on the technological quality characteristics of the final product. The treatments evaluated included formulations with the addition of OK and OKS separately at levels of 3 % and 5 % (OK3, OK5, OKS3 and OKS5), as well as a control treatment with 0,5 % xanthan gum. Ultrasound treatment (20 kHz, 40 % amplitude, pulse 10 s /10 s, 10 min) significantly affected the physicochemical properties of tarwi okara (proximal composition and net surface charge), reflected in turn in an improvement in its techno-functional properties (water and oil absorption capacity, emulsifying properties, and swelling capacity). Gluten-free breads with tarwi okara maintained stable structures in the crumb, with different extensibility capacities to retain gas bubbles. Treatments OK5 and OKS3 exhibited the most attractive baking quality characteristics in terms of specific volume (1.82 – 1.83 mL/g), alveolar structure (39.58 – 45.50 number of bubbles/cm²) and textural properties of the crumb (chewiness decreased by 9 to 12 %). The results obtained demonstrate the potential of tarwi okara as an ingredient to improve the technological quality of gluten-free breads, and the favourable effects of ultrasound on the efficiency of tarwi okara performance, by achieving satisfactory results in the studied food product with a lower level of addition compared to its native form (OK). Furthermore, a maximum level of OKS addition (5%) was identified, after which its positive effects could be reversed by water competition with the other ingredients in the matrix. The relevance of this study lies in the framework of the circular economy and the growing trend towards the formulation of clean label foods.

Keywords: Legume by-product, andean lupin, green technology, celiac disease.

I. INTRODUCCIÓN

El mercado mundial de productos alimenticios sin gluten se encuentra en constante crecimiento. Los consumidores eligen cada vez más una dieta sin gluten por motivos de carácter obligatorio, en el caso de aquellos que padecen de intolerancia al gluten, o voluntario, promovido por la percepción de ser un hábito más saludable (Siminiuc y Turcanu, 2023; Šmídová y Rysová, 2022). Diseñar productos sin gluten, especialmente en el caso del pan, sigue siendo un desafío importante, tanto desde el punto de vista nutricional como tecnológico (Siminiuc y Turcanu, 2023). El gluten confiere propiedades únicas en las masas; por lo tanto, la sustitución de esta red de proteínas en las formulaciones afecta significativamente la calidad final del pan (Ammar et al., 2022; Bender y Schönlechner, 2020). Para abordar este problema, se han aplicado diversas alternativas como el uso de varios ingredientes para imitar la red de gluten, y la adaptación de las condiciones de procesamiento (específicamente el horneado) (Waziroh et al., 2022). El primer enfoque ha conducido a una amplia gama de ingredientes y aditivos, como harinas y almidones libres de gluten, hidrocoloides, proteínas emulsionantes, fibras, entre otros (Bender y Schönlechner, 2020; Siminiuc y Turcanu, 2023). Las combinaciones complejas pueden dar como resultado la producción de panes libres de gluten de calidad aceptable. Sin embargo, también podría afectar la percepción de los consumidores cuyas preferencias se vienen inclinando hacia la exclusión de aditivos químicos o componentes desconocidos que puedan tener repercusión en su salud (Papagianni et al., 2024). Esta tendencia se engloba dentro del concepto de “etiqueta limpia”, el cual no cuenta con legislación específica, pero se asocia con ingredientes naturales y fácilmente reconocibles, así como, listas de ingredientes más cortas (Kajzer y Diowski, 2021).

Entre las nuevas fuentes de alimentos con gran potencial nutricional se ha posicionado el tarwi, una leguminosa de la región andina cuyo alto contenido de proteínas (~46%) y grasas (~20%) podrían convertirlo en un cultivo industrial similar a la soya (Cisneros et al., 2022; Repo-Carrasco-Valencia y Vidaurre-Ruiz, 2022). Una limitante para alcanzar este estatus

es la presencia de alcaloides en el grano, que conllevan al requerimiento de un tratamiento de desamargado (Aguilar-Acosta et al., 2020). Pese a ello, la calidad de las proteínas del tarwi y los beneficios de su cultivo para el suelo sostienen la atención en esta especie de lupino como una fuente de proteína vegetal (Córdova-Ramos et al., 2020; Czubinski et al., 2021). Al respecto, el proceso convencional de preparación de proteínas vegetales incluye una etapa de extracción alcalina donde se genera un precipitado insoluble denominado okara (Moscoso Ospina et al., 2023; Ragonese et al., 2024). En los últimos años, se han realizado investigaciones sobre la aplicación de okaras de otras fuentes vegetales en diversos productos alimenticios como panes libres de gluten (Lian et al., 2020; Moscoso Ospina et al., 2023), emulsiones (Moscoso Ospina et al., 2022; Ragonese et al., 2024) y análogos de tofu (Fan et al., 2020). Además, a fin de potenciar el desempeño de la okara en las matrices alimentarias, se ha recurrido al uso complementario de tecnologías verdes como las altas presiones (Fayaz et al., 2019; Helstad et al., 2023) y el ultrasonido (Fan et al., 2020; Moscoso Ospina et al., 2023; Ragonese et al., 2024), dando resultados prometedores. En el caso del tarwi, la valorización la okara obtenida en el fraccionamiento de sus proteínas se alinea con los esfuerzos de promover un aprovechamiento integral en su flujo de procesamiento. En este marco, la presente investigación tuvo como objetivo general evaluar la influencia de la adición de okara de tarwi sonicada sobre las características de calidad tecnológica de panes de molde libres de gluten. Para lograr ello, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Obtener okaras de tarwi control (OK) y sonicada (OKS); y caracterizarlas fisicoquímicamente y según sus propiedades tecnofuncionales.
- Evaluar las características reológicas y texturales de los batidos libres de gluten con okara de tarwi (OK u OKS) con niveles de adición de 3 % (p/p) y 5 % (p/p).
- Evaluar las características de calidad tecnológicas de los panes de molde libres de gluten elaboradas con okara de tarwi (OK u OKS) con niveles de adición de 3 % (p/p) y 5 % (p/p).

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. TARWI: COMPOSICIÓN Y PROCESAMIENTO

El tarwi (*Lupinus mutabilis* S.) es una leguminosa perteneciente al género *Lupinus*, que se cultiva solo en algunas partes de América del Sur, como Ecuador, Perú y Bolivia. Es pariente de las especies nativas de Europa como *L. albus*, *L. luteus* y *L. angustifolius*, las cuales representan la mayoría de los lupinos cultivados en el mundo (Czubinski et al., 2021; Gulisano et al., 2019). Los lupinos, en general, poseen un alto contenido de proteínas y grasa. Sin embargo, el tarwi se destaca particularmente por presentar granos de mayor calidad nutricional y buena adaptabilidad a condiciones severas como climas fríos, suelos poco fértiles y grandes altitudes, al tiempo que favorece la fertilidad del suelo debido a su alta capacidad de fijación de nitrógeno (Córdova-Ramos et al., 2020; Gulisano et al., 2019). La combinación de estas cualidades convierte al tarwi en una alternativa sustentable a las fuentes convencionales de proteínas vegetales como la soya.

2.1.1. COMPOSICIÓN

La composición del tarwi descrita en la Tabla 1 presenta variaciones que pueden atribuirse a diferentes posibles causas como los factores agronómicos y genéticos determinantes en la calidad del grano, así como, los métodos analíticos empleados para la cuantificación (Carvajal-Larenas et al., 2016). A pesar de las variaciones mencionadas, el tarwi ha demostrado sostener los mayores contenidos de proteínas y grasas entre las principales especies de lupino (Carvajal-Larenas et al., 2016; Czubinski et al., 2021). Particularmente, su elevado contenido proteico se ha relacionado con una alta capacidad de fijación de nitrógeno (Salazar et al., 2021). Sin embargo, cabe mencionar que en algunas ocasiones el contenido de proteína total en lupinos es sobreestimado cuando se calcula con un factor de conversión de nitrógeno adoptado en el método Kiejdahl igual a 6,25 (factor convencional). Este valor no resulta adecuado en el caso de leguminosas, dado que éstas poseen cantidades

significativas de compuestos nitrogenados no proteicos y exhiben un alto grado de amidación de proteínas (Carvajal-Larenas et al., 2016; Czubinski et al., 2021). Por lo tanto, para una estimación más adecuada, se ha recomendado el uso de un factor de 5,7 para leguminosas (Carvajal-Larenas et al., 2016) y de 5,4 para lupinos, considerando la contribución de nitrógeno proveniente de alcaloides (Czubinski et al., 2021). Respecto a las principales clases de proteínas presentes en el tarwi, se encuentran las globulinas y las albuminas. Las globulinas (α -, β -, γ y δ -conglutinas) componen alrededor del 91-94 %, mientras que las albuminas solo cerca del 6,4 % (Gulisano et al., 2019). La complejidad de la fracción de globulina en los lupinos en general se debe a la presencia de diferentes familias de proteínas (leguminas (11s), vicilinas (7s), y conglutinas γ y δ), y de componentes oligoméricos (12S y 7S) (Carvajal-Larenas et al., 2016). La diferencia en la conformación de subunidades de las globulinas propias de cada especie de lupino resulta determinante sus propiedades fisicoquímicas (Gulisano et al., 2019). Por ejemplo, se ha informado que el punto isoeléctrico de la proteína de *L. mutabilis* S. varía entre pH 4,0 y 6,0; mientras que, en *L. angustifolius* entre pH 4,3 y 4,5 (Carvajal-Larenas et al., 2016). Por otra parte, en cuanto al perfil de aminoácidos, la lisina representa uno de los aminoácidos esenciales mayoritarios presentes en las proteínas del tarwi (5,8 – 7,8 g/16 g N). Se ha evidenciado que los tratamientos de desamargado y desengrasado de los granos de tarwi influyen esencialmente en los contenidos de cistina y metionina, disminuyendo sus valores iniciales hasta nivel de trazas (Breña-Díaz, 2018; Carvajal-Larenas et al., 2016).

Tabla 1: Composición proximal de los granos de tarwi

Componente	Promedio	Mínimo	Máximo
Humedad b.h. (%)	8,36 ± 1,51	7,00	9,99
Proteína b.s. (%)	46,09 ± 5,23	40,87	52,82
Lípidos b.s. (%)	17,25 ± 1,34	16,12	18,90
Cenizas b.s. (%)	3,81 ± 0,77	2,95	4,80
Carbohidratos b.s. (%)	31,33 ± 1,75	29,45	32,90
Fibra cruda b.s. (%)	10,39 ± 3,10	8,20	12,58

FUENTE: Berru et al. (2021); Carvajal-Larenas et al. (2016); Córdova-Ramos et al. (2020); Salazar et al. (2021).

El contenido de aceite en el tarwi (~18 %) es también el más alto entre sus especies parientes y el único comparable al de la soya (Czubinski et al., 2021; Gulisano et al., 2019). La calidad

del aceite de tarwi recae en los rasgos de su composición. Entre los ácidos grasos esenciales, se encuentran el linoleico (23,5 – 25,8 %) y el linolénico (1,6 – 2,6 %), también conocidos como omega 6 y 3, respectivamente (Pascual-Chagman et al., 2021). Algunas ventajas del aceite de tarwi sobre el de otros lupinos consisten en su bajo contenido de ácido linoleico (menor al de la soya) para una mayor estabilidad natural y la ausencia de ácido erúxico (componente tóxico), evitando así la necesidad de su eliminación a nivel industrial (Gulisano et al., 2019).

Además de los ácidos grasos esenciales, otros compuestos bioactivos presentes en el aceite de tarwi y en cantidades apreciables son los tocoferoles. Entre los 4 homólogos existentes de este compuesto, el γ -tocoferol representa casi el 98 % del contenido total de tocoferoles en el tarwi, seguido del β -tocoferol y el δ -tocoferol (ambos cerca del 1 %) y el α -tocoferol (0,3 %) (Briceño et al., 2021; Pascual-Chagman et al., 2021). El γ -tocoferol tiene una débil actividad como vitamina E, pero actúa como antioxidante y proporciona estabilidad contra la oxidación de los lípidos (Badui, 2006). En conjunto, el aceite refinado extraído del tarwi desamargado, sostiene características físicas similares a los aceites de oliva, soya y girasol, y reúne las propiedades adecuadas (punto de humo y viscosidad) para ser utilizado como un aceite para ensaladas, en la preparación de mayonesas y aliños (Villacrés et al., 2010). Respecto al contenido de carbohidratos, los granos de lupino prácticamente carecen de almidón y los principales carbohidratos encontrados son oligosacáridos (principalmente estaquiosa y rafinosa) y polisacáridos de almacenamiento de la pared celular (Brandolini et al., 2022; Gulisano et al., 2019).

Un factor limitante en el procesamiento del tarwi recae en su elevado contenido de alcaloides quinolizidínicos en el tarwi (0,07 - 4,50 g/100 g peso seco), superior inclusive al de otras especies de lupinos. Los principales alcaloides reportados en *L. mutabilis* son lupanina, esparteína, 3-hidroxilupanina, 13-hidroxilupanina y 4-hidroxilupanina (Carvajal-Larenas et al., 2016). Las variaciones observadas en el contenido de alcaloides en los altramuces dependen de diferentes factores como los procedimientos analíticos, la subespecie o ecotipo estudiado, la variabilidad genética, los factores agronómicos y las influencias ambientales (Aguilar-Acosta et al., 2020; Carvajal-Larenas et al., 2016).

2.1.2. PROCESAMIENTO

Los granos de tarwi se encuentran naturalmente en un estado indisponible para consumo o uso directo debido a la presencia de alcaloides, compuestos anti nutricionales responsables además del sabor amargo (Aguilar-Acosta et al., 2020). Por consiguiente, el procesamiento de los granos de tarwi requiere inicialmente de un tratamiento de desamargado, el cual busca reducir el contenido de alcaloides a niveles aceptables sin afectar sustancialmente el contenido nutricional (Brandolini et al., 2022). La remoción de alcaloides por lixiviación en agua (método acuoso) es el método tradicional empleado tanto a nivel artesanal como comercial (Carvajal-Larenas et al., 2013). La efectividad de este tratamiento se encuentra en función de factores como la concentración del fitoquímico en los granos y el tiempo de exposición considerado. Se ha observado que tiempos prolongados de lavado dan menores contenidos de proteína soluble, mientras que el empleo de cal (óxido de calcio) durante la cocción permite una mayor eliminación de alcaloides (Suca y Suca, 2015). Los granos desamargados se pueden consumir como snack o ingrediente para ensaladas y comidas preparadas (Carvajal-Larenas et al., 2013; Jacobsen y Mujica, 2006). Además de estas aplicaciones, su transformación en harina previa extracción de aceite representa una vía para hacer factible su agroindustrialización (Suca y Suca, 2015).

El proceso de extracción de aceite de tarwi es bastante similar al utilizado para otras semillas oleaginosas. El método de extracción por prensa expeller es la alternativa más utilizada a nivel industrial, debido a que ha demostrado ser eficiente y conveniente, desde el punto de vista ecológico, para obtener aceite de tarwi de calidad aceptable (Breña Diaz, 2018; Carvajal-Larenas et al., 2013). La torta recuperada como subproducto del proceso de extracción de aceite presenta un alto contenido de proteínas, así como, de compuestos fenólicos relevantes (Pascual-Chagman et al., 2021). Por consecuencia, se considera una excelente fuente para la obtención de concentrados o aislados proteicos y compuestos bioactivos los cuales son de gran interés para la industria de alimentos funcionales (Breña Diaz, 2018; Chirinos-Arias, 2015). En la Figura 1, se describe el procesamiento general aplicable en los granos de tarwi desamargados.

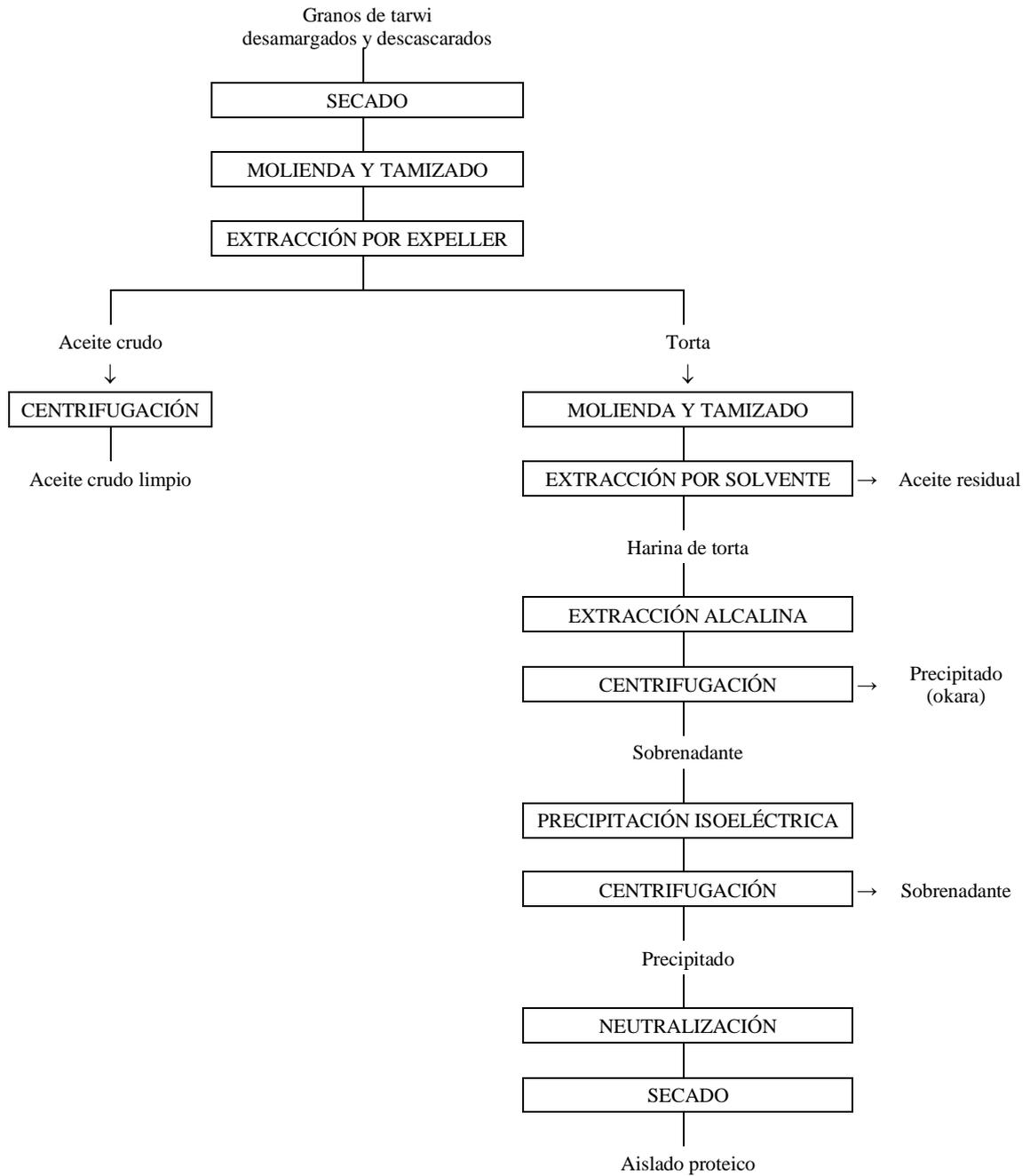


Figura 1: Procesamiento integral del grano de tarwi

FUENTE: Adaptado de Breña-Díaz (2018); Pascual-Chagman et al. (2021).

2.2. OKARA, UN SUBPRODUCTO DEL PROCESAMIENTO DE LEGUMINOSAS

2.2.1. ORIGEN Y PROBLEMÁTICA RELACIONADA

Okara, originalmente, se denomina al residuo obtenido en el proceso de elaboración de productos derivados de la soya como el tofu y la leche de soya (Asghar et al., 2023; Guimarães et al., 2018). Este proceso se lleva a cabo según dos métodos tradicionales, el método japonés y el método chino (Figura 2). Ambos incluyen esencialmente las mismas operaciones: remojo, enjuague, cocción (98 – 100 °C) y molienda de los granos húmedos. La diferencia se encuentra en el momento en que aplican el tratamiento térmico. En el primero (método japonés), la cocción de los granos se realiza previo a la molienda; mientras que, en el segundo (método chino), la cocción se aplica a los granos molidos (Asghar et al., 2023; Vong y Liu, 2016).

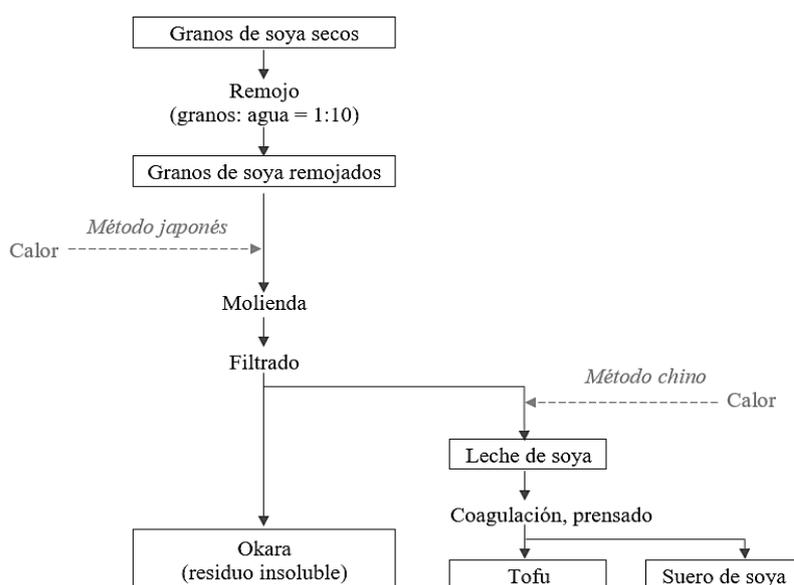


Figura 2: Obtención tradicional de la okara de soya

FUENTE: Vong y Liu (2016)

Respecto a sus niveles de producción, se ha estimado que por cada kilogramo de soya procesada se genera alrededor de 1,2 kg de okara fresca (Colletti et al., 2020; Guimarães et al., 2018). La okara fresca como tal posee un alto contenido de humedad (70 – 80 %). Este

factor, sumado a un pH significativamente alto, le confieren inestabilidad microbiana acortando así su vida útil (Helstad et al., 2023). Anualmente, se producen grandes cantidades de okara en todo el mundo, principalmente en países asiáticos donde destaca la industria del tofu (Vong y Liu, 2016). Respecto a su destino, una pequeña porción se limita a ser subutilizada como pienso o fertilizante, mientras que, cantidades sustanciales son descartadas (Asghar et al., 2023; Tuly y Ma, 2024). Esta situación conlleva un impacto ambiental significativo, y representa un problema industrial debido a la dificultad en gestionar el destino del subproducto y las pérdidas financieras asociadas (Guimarães et al., 2018). Los tratamientos de deshidratación térmica se han evaluado como estrategias para lograr su preservación y posterior uso; sin embargo, el proceso resulta costoso dado la cantidad de energía que se suele requerir para remover las grandes cantidades de agua en el material (Helstad et al., 2023). Ante ello, otros tratamientos de modificación orientados a extender la perecibilidad y añadir valor a este subproducto se han estudiado con mayor énfasis en los últimos años (Sección 2.2.3.).

2.2.2. EXTENSIÓN DE USO DEL TÉRMINO OKARA

Convencionalmente, el término “okara” se emplea para designar al residuo generado en la elaboración de distintos productos de soya, entre los cuales la leche de soya es uno de los más frecuentes (Asghar et al., 2023; Guimarães et al., 2018). De manera análoga, el uso de este término se ha empleado para denominar al residuo sólido obtenido en la preparación de bebidas de origen vegetal distinto al de la soya. Este es el caso de las leguminosas como el garbanzo (Lian et al., 2020; Lopes et al., 2020), el lupino (Lopes et al., 2020) y el maní (Diniz et al., 2021). En general, el desarrollo de bebidas de origen vegetal a partir de fuentes como legumbres, cereales, pseudocereales y frutos secos viene cobrando mayor interés en la producción de alimentos como una alternativa a la leche de origen animal, e incluso, a la leche de soya debido a su adecuado balance nutricional (Aydar et al., 2020; Wang et al., 2018).

Recientes investigaciones han extendido el uso del término okara para referirse al residuo generado en la extracción alcalina de proteínas de la harina desgrasada de soya (Moscoso Ospina et al., 2023; Porfiri et al., 2017) o quinua (Ragonese et al., 2024), basándose en el principio de ser una fracción insoluble obtenida de una extracción acuosa como los métodos

convencionales. En torno a este contexto, la okara se reconoce en general como un subproducto del procesamiento integral de granos o semillas fuentes de proteína vegetal.

La diversidad de materias primas seleccionadas y técnicas de procesamiento para la recuperación de okaras va a ser determinante en su composición final. Por ejemplo, la composición de la okara de soya (en forma seca), una de las más ampliamente estudiadas, comprende principalmente fibra dietaria (42 - 58 %), seguido de proteínas (15 - 34 %), grasa (8 - 11 %), y carbohidratos (3 - 5 %). (Asghar et al., 2023; Lian et al., 2020; Tuly y Ma, 2024). La fibra dietaria de okara de soya se compone esencialmente de una fracción insoluble (celulosa y hemicelulosa) (Colletti et al., 2020), cuya presencia se ha asociado con un potencial hipotriglicéridémico e hipercolesterolémico, y efectos prebióticos (Guimarães et al., 2018).

2.2.3. APLICACIÓN DE POSTRATAMIENTOS EN LA OKARA

La modificación de las okaras mediante el uso de tecnologías no convencionales se ha abordado con fines de promover su conservación y/o aplicaciones alimentarias (Helstad et al., 2023). En la okara de soya, la aplicación de tecnologías como la biofermentación, la alta presión hidrostática y el ultrasonido de alta intensidad han demostrado diversos resultados prometedores.

La biofermentación a través del uso individual o en conjunto de levaduras y bacterias ácido-lácticas aumenta los niveles de fibra dietaria prebiótica, azúcares libres y aminoácidos en la okara de soya, convirtiéndola así en una fuente más adecuada para generar alimentos funcionales (Asghar et al., 2023; Tuly y Ma, 2024; Vong y Liu, 2016). De manera similar, las altas presiones y el ultrasonido generan cambios en la estructura y composición de la okara de soya. La homogeneización a altas presiones (100 - 150 MPa) condujo a una mejora notable en la solubilidad del subproducto (Fayaz et al., 2019); mientras que la pasteurización a altas presiones (600 MPa) demostró ser efectivo en la reducción del crecimiento microbiano y tuvo un mayor impacto en la conversión parcial de fibras insolubles a fibras solubles (Helstad et al., 2023). Además, se señaló como un tratamiento particularmente favorable en el caso de la okara de soya debido a su alta viscosidad, ya que

no requiere bombeo ni agitación a diferencia de otras técnicas de pasteurización como los intercambiadores de calor de placas o superficie raspada (Helstad et al., 2023). Finalmente, el tratamiento con ultrasonido de alta intensidad sobre la okara de soya evidenció cambios en el tamaño de partícula y despliegue de proteínas, lo cual se reflejó en la exhibición de mejores propiedades gelificantes para producir análogos del tofu a base de okara (Fan et al., 2020). La viabilidad de incorporar okara a los alimentos representa una solución al destino de estos residuos cuya eliminación genera altos costos e impacto ambiental.

2.3. ULTRASONIDO Y SU EFECTO EN MATRICES ALIMENTARIAS

2.3.1. ULTRASONIDO: DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN

El sonido más allá del umbral audible para humanos (hasta 18 kHz) se clasifica como ultrasonido, el cual consiste en ondas acústicas de carácter mecánico-elásticas con frecuencia superior a 20 kHz (Pérez y Escalante, 2024; Weiss et al., 2011). La producción de estas ondas implica la conversión de energía eléctrica en energía mecánica (Yu et al., 2024). Para lograr ello, se requiere de un sistema conformado por 3 elementos fundamentales: generador, transductor y emisor (Meena et al., 2024). El generador proporciona energía eléctrica al transductor. Este último posee materiales piezoeléctricos capaces de convertir la energía eléctrica recibida en vibraciones mecánicas u ondas sonoras a una frecuencia específica, que luego se transmitirán al medio circundante a través del emisor donde se producen los efectos sonofísicos (Meena et al., 2024; Yu et al., 2024).

Según la frecuencia las ondas de ultrasonido, se identifican tres regiones para su clasificación: baja frecuencia (20 - 100 kHz), frecuencia intermedia (100 kHz – 1 MHz) y alta frecuencia (1–10 MHz) (Alamilla-Beltrán et al., 2011). En la industria alimentaria, su aplicación se divide en dos enfoques: alta intensidad (20–100 kHz; 10–1000 W/cm²) y baja intensidad (100 kHz–1 MHz, < 1 W/cm²). El ultrasonido de alta intensidad, también conocido como "ultrasonido de potencia", tiene suficiente energía para alterar las propiedades fisicoquímicas y estructura de las matrices alimentarias (Alamilla-Beltrán et al., 2011; Jambrak y Herceg, 2015; Weiss et al., 2011). Por lo tanto, se ha empleado en la asistencia de tratamientos térmicos (Chavan et al., 2022), la extracción de compuestos

bioactivos (Chemat et al., 2017; Laqui-Vilca et al., 2018) y la modificación en la funcionalidad de ingredientes alimentarios (Weiss et al., 2011), así como, la inactivación microbiana (Pérez y Escalante, 2024). En contraste, el ultrasonido de baja intensidad, también conocido como “ultrasonido de diagnóstico”, normalmente se utiliza para determinaciones analíticas en el aseguramiento de la calidad y las inspecciones alimentarias no destructivas (Alamilla-Beltrán et al., 2011; Jambrak y Herceg, 2015).

2.3.2. MECANISMO DEL ULTRASONIDO DE ALTA INTENSIDAD

Las ondas de ultrasonido de alta intensidad inducen la formación de burbujas en regiones de baja presión donde pueden formarse a partir del vapor presente en el líquido (Chavan et al., 2022). Durante el transcurso de la irradiación ultrasónica, estas burbujas experimentan tres etapas: nucleación, crecimiento (hasta un tamaño crítico) y colapso (Figura 3). El colapso implosivo de las burbujas genera un aumento de temperatura y presión en algunos puntos del medio, creando así un ambiente circundante inusual (Pérez y Escalante, 2024; Yu et al., 2024). A este fenómeno físico se le conoce como cavitación acústica (Bermudez-Aguirre, 2017).

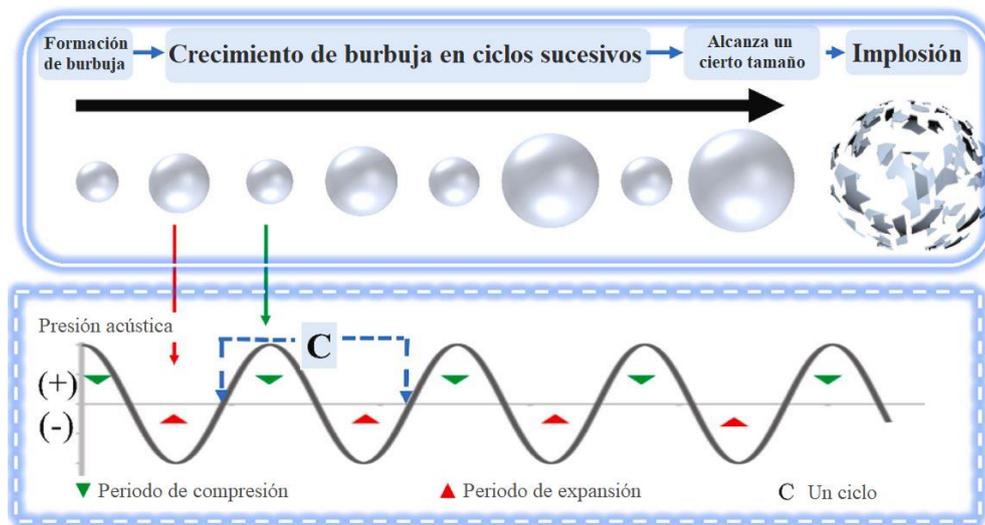


Figura 3: Diagrama esquemático del efecto de cavitación

FUENTE: Yu et al. (2024)

El fenómeno de cavitación acústica ve reflejado en efectos físicos y químicos del sistema. Los efectos físicos representan la mayoría de los impactos de la sonicación. Estos incluyen

la fragmentación molecular de los gases atrapados, incluida la generación de radicales libres tipo hidroxilo, y la alteración de paredes y membranas celulares (Chen et al., 2022; Meena et al., 2024). Los efectos químicos implican la oxidación de radicales libres y el desarrollo de otras reacciones específicas responsables de la modificación de las propiedades fisicoquímicas de la matriz presente en el medio líquido (Chen et al., 2022; Pérez y Escalante, 2024). Precisamente, la sonoquímica aborda el estudio de las reacciones químicas que tienen lugar bajo sonicación (Bermudez-Aguirre, 2017).

Existen varios factores que influyen en el desarrollo de la cavitación acústica. Estos pueden corresponder con las propiedades fisicoquímicas del medio líquido (viscosidad, tensión superficial, presión de vapor, etc.) y las condiciones de proceso (Bermudez-Aguirre, 2017). La sonoquímica considera algunos factores determinantes en la eficacia de la cavitación, los cuales incluyen: la frecuencia, la intensidad y amplitud de energía, y el diseño del reactor (Pérez y Escalante, 2024). La frecuencia tiene una gran influencia en el tamaño de las burbujas y, en consecuencia, la fuerza de la implosión (Pérez y Escalante, 2024). A baja frecuencia, las ondas de ultrasonido generan burbujas más grandes, cuyo colapso violento implica temperaturas y presiones localizadas más altas (Chavan et al., 2022).

Para lograr cavitaciones a frecuencias más altas, se debe aumentar la intensidad de las ondas aplicada para superar la fuerza cohesiva del medio líquido y formar burbujas (Chavan et al., 2022; Weiss et al., 2011). Respecto a la intensidad y amplitud de energía, se confirma que existe una relación directa entre ambas. Se deben emplear vibraciones de mayor amplitud cuando se trabaja con muestras de mayor viscosidad (Chavan et al., 2022). Sin embargo, las amplitudes muy grandes reducen la vida útil del transductor manifestando grietas y fracturas en el dispositivo (Weiss et al., 2011). Finalmente, el diseño del reactor específicamente para el procesamiento de alimentos se clasifica en dos tipos: contacto directo (sonda ultrasónica) y contacto indirecto (baño ultrasónico) (Yu et al., 2024). En el primero, la sonda es sumergida en la muestra líquida, generando ondas ultrasónicas de alta intensidad que se transmiten de forma directa al medio. Estos son los más utilizados en aplicaciones experimentales (Yu et al., 2024). Por otro lado, el baño ultrasónico es un dispositivo donde los transductores se ubican en el fondo del reactor y transmiten las irradiaciones ultrasónicas de manera indirecta (Pérez y Escalante, 2024).

2.3.3. EFECTO DEL ULTRASONIDO EN LAS INTERACCIONES DE UN MATRIZ ALIMENTARIA

Uno de los componentes más sensibles a los efectos de la cavitación son las proteínas (Chen et al., 2022). Cuando las proteínas se exponen a las ondas de ultrasonido de alta intensidad, su estructura puede sufrir despliegue, desnaturalización e, inclusive, reagregación, lo que conduce a cambios conformacionales, principalmente a nivel de la estructura secundaria y terciaria (Yu et al., 2024). Las alteraciones estructurales de las proteínas a menudo resultan en cambios en las propiedades tecnofuncionales (Chavan et al., 2022). Por lo tanto, la comprensión de los cambios en las interacciones de las proteínas de una matriz alimentaria resulta esencial para un uso eficaz de esta tecnología en la obtención de productos con características óptimas (Chen et al., 2022).

El ultrasonido de alta intensidad afecta tanto las interacciones covalentes como las no covalentes en matrices alimentarias a base de proteínas (Meena et al., 2024; Yu et al., 2024). Las formas más comunes de interacciones no covalentes son las fuerzas electrostáticas, las interacciones hidrofóbicas y los enlaces de hidrógeno. El despliegue y aumento de exposición de regiones hidrofóbicas en las proteínas, como efecto de la cavitación, promueve un aumento de fuerzas electrostáticas con otros componentes como los polisacáridos que en su mayoría presentan cargas negativas (Chen et al., 2022; Meena et al., 2024). Además, los residuos polares (tirosina, treonina, cisteína y arginina) y los grupos carbonilo en las proteínas desplegadas pueden interactuar con diferentes grupos hidroxilo de otros nutrientes formando enlaces de hidrógeno (Chen et al., 2022). Respecto a las interacciones covalentes, éstas suelen ocurrir simultáneamente a las no covalentes en la mayoría de las circunstancias. Los conjugados generados mediante enlaces covalentes suelen ser preferibles para aplicaciones alimentarias debido a su alto grado de estabilidad por la fuerza de su enlace (Yu et al., 2024). Algunos de los ejemplos más típicos de la unión covalente entre proteínas y otros componentes, como polifenoles y polisacáridos, tras la aplicación del ultrasonido son la modificación fenólica y la reacción de Maillard (Chen et al., 2022). Un resumen sobre los cambios en las interacciones de las proteínas con otros componentes alimentarios convencionales (agua, polifenoles, polisacáridos y lípidos) como efecto del ultrasonido se describe en la Tabla 2.

Tabla 2: Efectos del ultrasonido en las interacciones de un matriz alimentaria

Interacción	Principales efectos
Proteína - agua	<ul style="list-style-type: none">– Interacción promovida por los cambios estructurales generados en las proteínas como efecto de la cavitación.– Una mayor expresión de esta interacción se relaciona con una mejora en las propiedades de hidratación.
Proteína - polifenoles	<ul style="list-style-type: none">– La actividad de los polifenoles se ve influenciada según el tipo de asociación (covalente o no covalente) con las proteínas.– Las interacciones no covalentes afectan la biodisponibilidad de los polifenoles por su estado incrustado en las proteínas.– Las interacciones covalentes se relacionan con propiedades antioxidantes y características texturales del complejo formado.
Proteína - polisacárido	<ul style="list-style-type: none">– Los complejos formados exhiben una variedad de propiedades tecnológicas mejoradas, incluyendo solubilidad, propiedades gelificantes, emulsificación y estabilidad conformacional.– La sonicación puede modular las reacciones covalentes de esta interacción para obtener productos de la reacción de Maillard con un sabor agradable y una alta capacidad antioxidante.
Proteína - lípido	<ul style="list-style-type: none">– Interacción promovida mediante fuerzas hidrofóbicas después del desdoblamiento de las proteínas.– Su manifestación influye en la actividad y estabilidad emulsionante.

FUENTE: Chen et al. (2022); Yu et al. (2024)

En general, las interacciones entre los componentes de los alimentos varían mucho debido a la complejidad de la matriz alimentaria. Analizar la microestructura es una forma de evaluar la influencia del ultrasonido en las matrices alimentarias a base de proteínas (Chen et al., 2022). Para ello, se disponen de varias técnicas, incluida la espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), dicroísmo circular (CD), espectroscopia de fluorescencia, difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido (SEM), entre otros (Yu et al., 2024). Normalmente, la espectroscopia FTIR, CD y fluorescencia se utilizan para evaluar cambios en la estructura secundaria de las proteínas, mientras que XRD y SEM se emplean para analizar la conformación de orden superior y la microestructura de la superficie de las proteínas (Yu et al., 2024).

2.4. PANES LIBRES DE GLUTEN

2.4.1. GLUTEN: APORTE TECNOLÓGICO Y AFECCIONES RELACIONADAS

El gluten es una mezcla de fracciones proteicas, principalmente prolamina y glutelina, presente en cereales como el trigo, el centeno y la cebada. Desde un enfoque tecnológico, el gluten se define como una red viscoelástica tridimensional que confiere propiedades únicas a las masas de trigo en la panificación (gran volumen, forma y textura) (Bender y Schönlechner, 2020; Šmídová y Rysová, 2022). La ingesta del gluten se ha relacionado con una variedad de afecciones cuya incidencia ha ido en crecimiento en los últimos años. Según el tipo de reacción del organismo frente al gluten, estas afecciones se pueden clasificar en tres tipos: alérgica (alergia al trigo), autoinmune (celiaquía, dermatitis, ataxia al gluten) e inmunomediada (sensibilidad al gluten no celiaca) (Cabanillas, 2020).

La enfermedad celíaca, una de las más conocidas entre ellas, es un trastorno crónico autoinmune del intestino delgado inducido por la ingesta de gluten e influenciado por factores genéticos y ambientales cuyas manifestaciones clínicas son principalmente síntomas gastrointestinales (Di Liberto et al., 2020). Ante ello, una dieta libre de gluten es el tratamiento fundamental para los pacientes con enfermedad celiaca y una opción recomendada para pacientes con otras afecciones relacionadas con la ingesta de gluten debido a los potenciales efectos beneficiosos que sostendría en el tiempo (Cabanillas, 2020; Di Liberto et al., 2020). A nivel comercial, la limitada gama de materias primas empleadas en la producción de alimentos libres de gluten conduce a formulaciones que carecen de micronutrientes (minerales y vitaminas) y proteínas de alta calidad, y a su vez, sostienen una alta densidad energética (Rybicka et al., 2019). Diseñar productos sin gluten sigue siendo un desafío importante, tanto desde el punto de vista nutricional como, especialmente, desde el punto de vista tecnológico (Šmídová y Rysová, 2022).

2.4.2. DESAFÍOS Y ESTRATEGIAS PARA ABORDAR LA AUSENCIA DE GLUTEN EN PANIFICADOS

El pan es un alimento base en la dieta diaria en muchos países. En la producción de panes libres de gluten, la ausencia de este complejo de proteínas conlleva a masas menos viscosas, cohesivas y elásticas, con alta permeabilidad al dióxido de carbono y dificultades para mantener la estructura. Estas limitaciones se traducen en panes con un volumen reducido y una miga propensa a desmoronarse, principalmente (Bender y Schönlechner, 2020; Siminiuc y Turcanu, 2023; Šmídová y Rysová, 2022). Para abordar estas dificultades, se han empleado diversas estrategias las cual se pueden agrupar en dos enfoques (Figura 4): basado en el uso de varios ingredientes o aditivos, y b) basado en tecnologías aplicadas en materias primas (cereales y harinas), productos intermedios (masas), y procedimientos de cocción (horneado) (Bender y Schönlechner, 2020; Siminiuc y Turcanu, 2023).

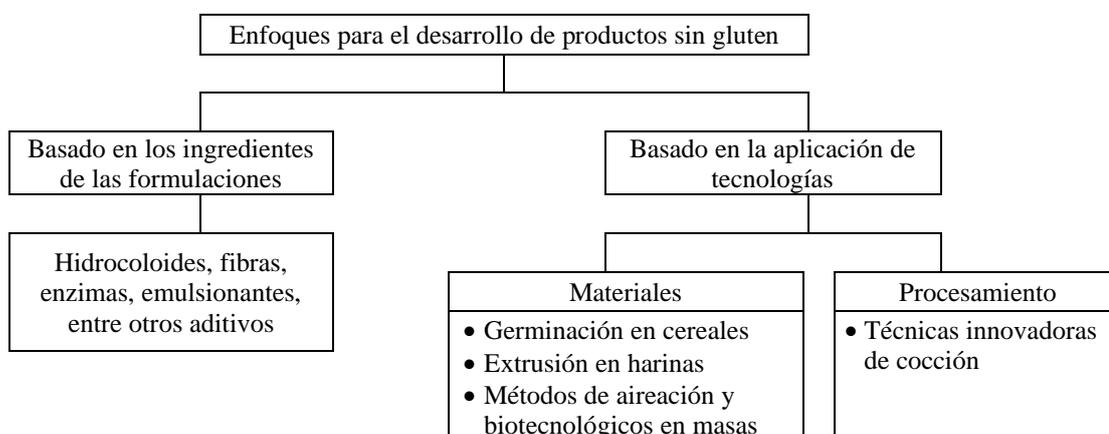


Figura 4: Enfoques para el desarrollo de productos sin gluten

FUENTE: Adaptado de Bender y Schönlechner (2020); Siminiuc y Turcanu (2023)

El uso de formulaciones complejas basadas en harinas y almidones, entre otros ingredientes como hidrocoloides, emulsionantes y proteínas (aisladas) para imitar las propiedades de la red de gluten ha sido uno de los enfoques más desarrollados (Siminiuc y Turcanu, 2023; Waziroh et al., 2022). Al respecto, existe una amplia gama de estudios que describen el uso de diversos ingredientes y sus efectos. En la Tabla 3 se describe la función de los ingredientes más comunes.

Tabla 3: Ingredientes comunes en formulaciones de los panes libres de gluten

Ingrediente	Ejemplos	Función/efecto principal
Harinas libres de gluten	Harinas de arroz, maíz y yuca	<ul style="list-style-type: none">- Ser sucedáneo a la harina de trigo.- Intervenir en la formación de estructura básica de la miga.- Aportar textura a la miga.
Harinas libres de gluten enriquecidas en proteínas	Harinas de granos andinos y legumbres	<ul style="list-style-type: none">- Aportar nutrientes como aminoácidos esenciales, fibras y minerales.- Incorporar proteínas a disponibilidad para la formación de masa.
Almidón	Almidones de arroz, papa, maíz y yuca.	<ul style="list-style-type: none">- Mejorar la estabilidad de la masa a través de una estructura permeable a los gases.- Retener humedad para mantener la frescura del pan.
Hydrocoloides	HPMC Goma xantana Goma guar Goma de tara	<ul style="list-style-type: none">- Ser agentes espesantes o estabilizadores de masa.- Aumentar la viscosidad favoreciendo interacciones entre el almidón y las proteínas.
Ingredientes proteicos	Albúmina Concentrados o aislados vegetales	<ul style="list-style-type: none">- Sustituir la funcionalidad del gluten- Fortalecer de las propiedades viscoelásticas de la masa
Grasas y emulsionantes	Margarina Aceite	<ul style="list-style-type: none">- Estabilizar las células de gas en la masa durante la fermentación.- Actuar como lubricante en la masa para disminuir su resistencia al mezclado.- Retrasar la gelatinización del almidón y aumenta el tiempo de expansión del pan.

FUENTE: Luna-Mercado y Repo-Carrasco-Valencia (2021); Mir et al. (2016); Šmídová y Rysová (2022); Vidaurre-Ruiz et al. (2021); Waziroh et al. (2022)

Un ingrediente crucial para la calidad de panes sin gluten son los hidrocoloides. Estos compuestos cuando entran en contacto con agua se hinchan y forman un gel. Al exponerse al calor, este gel espesa la masa y forma paredes de burbujas de gas, evitando la pérdida de

gas liberado durante el batido. Después del horneado, los hidrocoloides estabilizan la estructura de la miga, retienen el agua y previenen la rápida retrogradación del almidón. Debido a su alta capacidad de unión de agua, las formulaciones con hidrocoloides contienen dosis más altas de agua (Šmídová y Rysová, 2022; Vidaurre-Ruiz et al., 2019). El efecto de los hidrocoloides sobre una matriz sin gluten se encuentra modulado por factores como su estructura química, el nivel de dosificación y la interacción con otros componentes, entre los más influyentes (Vidaurre-Ruiz et al., 2019). Existen diversas fuentes de hidrocoloides empleados en la preparación de productos de panadería sin gluten: gomas vegetales (goma guar, goma garrofín, goma arábica, goma de tara, algarroba, goma konjac), betaglucanos, pentosanos y arabinoxilanos, derivados de celulosa (metilcelulosa MC, carboximetilcelulosa CMC, hidroxipropilmetilcelulosa HPMC), y polisacáridos de algas (agar, carragenanos) se (Bender y Schönlechner, 2020).

El uso de tecnologías es un enfoque innovador para mejorar la calidad de los panificados libres de gluten. Particularmente, las tecnologías de cocción no convencionales vienen ganando mayor protagonismo en el campo de la panificación (Waziroh et al., 2022). Algunas de las ventajas atractivas incluyen menores costos y tiempos de procesamiento, y su potencial de conservar o mejorar las propiedades del pan (Bender y Schönlechner, 2020). Entre estas tecnologías se encuentra el calentamiento por microondas, infrarrojos, híbrido y el calentamiento óhmico (Šmídová y Rysová, 2022). En particular, el calentamiento híbrido mediante horneado con microondas infrarrojos ha superado las limitaciones propias de cada técnica permitiendo obtener panes de calidad aceptable (Šmídová y Rysová, 2022). Respecto al calentamiento óhmico, es uno de los enfoques tecnológicos más recientes; por tal motivo, solo unos pocos estudios han informado con éxito el uso de esta técnica mediante una mejora significativa en el volumen del pan y las propiedades de la miga (Bender y Schönlechner, 2020; Waziroh et al., 2022).

III. METODOLOGÍA

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), el Centro de Investigación e Innovación de Productos Derivados de Cultivos Andinos (CIINCA) ubicado en el Instituto de Desarrollo Agroindustrial (INDDA), y el Laboratorio de Investigación en Funcionalidad y Tecnología de Alimentos (LIFTA) en la Universidad Nacional de Quilmes. El periodo de ejecución se llevó a cabo entre junio del 2023 y abril del 2024.

3.2. MATERIAS PRIMAS E INSUMOS

3.2.1. MATERIA PRIMA

Granos de tarwi (*Lupinus mutabilis* S.) desamargados y deshidratados provenientes de la Cooperativa La Perla de los Andes, ubicada en el distrito de Caraz, provincia de Huaylas, departamento de Ancash.

3.2.2. INSUMOS

- Harina de arroz (Costeño, Perú).
- Almidón de papa (Aro, Perú).
- Azúcar blanca (Dulcefina, Perú).
- Levadura seca instantánea (*Saccharomyces cerevisiae*) (Mauripan, España).
- Goma xantana (Frutaron, Perú).

- Sal yodada (Emsal, Perú).
- Aceite vegetal (Basso, Uruguay).
- Agua de mesa (Cielo, Perú).

3.3. MATERIALES, REACTIVOS Y EQUIPOS

3.3.1. MATERIALES

- Balones de digestión Kjeldahl.
- Bolsas ziploc.
- Campana desecadora.
- Cuchillo.
- Crisoles.
- Embudo Büchner.
- Envases de vidrio y ámbar.
- Fiolas de 100 mL.
- Guantes de nitrilo.
- Material de vidrio: Kitassato, probeta.
- Moldes de pan.
- Papel filtro Whatman (análisis de fibra).
- Papel toalla.
- Pipetas Pasteur.
- Pinzas.
- Plancha de calentamiento.
- Probetas de 100 mL.
- Recipientes y utensilios metálicos.
- Tamiz N°100 (150 micras).
- Tubos de extracción de grasa (Mojonnier).
- Tubos Falcon 15 y 50 mL.
- Vasos de precipitado de 100 mL, 250 mL, 600 mL y 1 L.

3.3.2. REACTIVOS

- 2-propanol A.R. (CDH, India).
- Ácido sulfúrico (JT Backer, Países Bajos).
- Éter de petróleo (CDH, India).
- Hidróxido de sodio (Spectrum, USA).

Para análisis de proteínas por el método de Kjeldahl:

- Catalizador $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O} : \text{K}_2\text{SO}_4 : 1 : 300$.
- Solución de ácido bórico al 4 % con indicador.
- Solución indicadora de rojo de metilo/verde de bromocresol.

3.3.3. EQUIPOS

- Agitador magnético digital con calefacción (MS-H340-S4, Dlab, Perú).
- Agitador vórtex (Vórtex 2, IKA, Ecuador).
- Analizador Rápido de Viscosidad (RVA 4500, Perten Instruments, Australia).
- Analizador Zetasizer Nano ZSP (ZEN 5600, Malvern Instruments, Reino Unido).
- Balanza analítica (PX 224, OHAUS, EE. UU.).
- Balanza de humedad (MB45, OHAUS, EE. UU.).
- Balanza digital (TA-300, OHAUS, EE. UU.).
- Batidora (FZ 6810B, Finezza, Perú).
- Estufa incubadora (IB100, Fravill, Perú).
- Cámara termográfica (C5, FLIR, Estonia).
- Centrífuga con refrigeración (SL 40R, Thermo Scientific, EE. UU.).
- Colorímetro digital (CR-400, Konica Minolta, Japón).
- Destilador para determinar Nitrógeno (UDK 129, Velp Scientifica, Italia).
- Equipo Soxhlet (Gerhardt, Francia).
- Espectrofotómetro UV-VIS (Genesys 150, Thermo Scientific, EE. UU.).
- Homogeneizador de alta velocidad (T25, IKA, Ecuador).
- Horno eléctrico (EOCC24T7MQS, Electrolux, Suecia).
- Horno mufla (MR 170, Heraeus, Alemania).

- Impresora-escáner (Pixma MG-2550, Cannon, Japón).
- Medidor de actividad de agua (Modelo 4TE, Aqualab, EE. UU.).
- Medidor de volumen topográfico (BVM-6610, Perten Instruments, Suecia).
- Molino de rotor (SR 300, Retsch, Alemania).
- Molino (A10 basic, IKA, Ecuador).
- Placa calefactora de 4 series (Gerhardt, Francia).
- Potenciómetro (PH 9500, Apera instruments, EE. UU.).
- Prensa-expeller (CA 59 G, KOMET, Alemania).
- Procesador ultrasónico (VC-505, Sonics & Materials Inc, EE. UU.).
- Termómetro de termopar tipo K (DTM-507, Tecpel, Taiwan).
- Texturómetro (Modelo 3365, Instron, EE. UU.).

3.4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.4.1. OBTENCIÓN DE OKARAS DE TARWI

Las okaras de tarwi, control (OK) y sonicada (OKS), fueron preparadas basándose el procedimiento propuesto por Moscoso-Ospina et al. (2023). El flujo de proceso (Figura 5) puede dividirse en 3 etapas, según el tipo de producto obtenido en cada una. Estas etapas son: 1) obtención de harina desengrasada, 2) recuperación de okara húmeda de tarwi como residuo de extracción de proteínas (Ver Anexo 1), y 3) acondicionamiento de okara de tarwi.

a. Etapa 1: Obtención de harina desengrasada

- **Molienda:** Los granos de tarwi enteros (desamargados y deshidratados) fueron triturados en un molino manual para reducir su tamaño de partícula.
- **Hidratación:** Primero, se determinó la humedad inicial de la muestra triturada. En base a ella, se calculó la cantidad de agua requerida para hidratar la muestra y elevar su valor a 13 % (condición de humedad deseada para el expeller). El agua se adicionó a través de un pulverizador a la muestra esparcida en bandejas. Después de 24 horas, se verificó el cambio a la humedad deseada.

- **Prensado:** La muestra hidratada se procesó a través de la prensa expeller. Los parámetros empleados fueron 70 °C, 20 rpm y boquilla D8, los cuales se adoptaron del trabajo de Pascual-Chagman et al. (2021) para obtención de aceite de tarwi. El rendimiento de aceite extracción resultó igual a 14 %, en promedio.
 - **Molienda y tamizado:** La torta desengrasada se trituroó manualmente y luego en una licuadora, antes de su molienda a 0,75 mm para su transformación en harina.
- b. Etapa 2: Recuperación de okara húmeda de tarwi como residuo de extracción de proteínas**
- **Disolución y alcalinización:** La harina desengrasada se disolvió en agua (proporción 1:11 p/p) y agitó suavemente durante un minuto. La dispersión formada se llevó a pH 9,0 con una solución de NaOH 5 M, bajo constante agitación.
 - **Homogeneización:** La dispersión alcalinizada se agitó en caliente a 60 °C durante 30 minutos. Luego, se dejó en reposo para enfriar por 5 minutos.
 - **Centrifugación:** La dispersión se repartió en tubos de centrífuga de 50 mL y colocó en los cestos correspondientes. La centrifugación se llevó a cabo a una velocidad de 4400 xg, por 15 minutos y a 4 °C. Finalmente, los tubos fueron decantados y el precipitado obtenido representó la okara húmeda.
- c. Etapa 3: Acondicionamiento de okara de tarwi**
- Solo para el caso de la obtención de okara de tarwi sonicada (OKS), se realizó la aplicación del ultrasonido durante el proceso. La descripción de este tratamiento se desarrolla en la Sección 3.4.1.a. Luego, se continuó con las siguientes operaciones.
 - **Disolución y centrifugación:** La okara húmeda recolectada se disolvió en agua (1:2 p/p) y centrifugó bajo las mismas condiciones anteriores (4400 xg, 15 min, 4 °C). Ambas operaciones se repitieron una vez más con el precipitado recuperado.
 - **Remojo y centrifugación:** El precipitado lavado se remojó en alcohol isopropílico (proporción 1:1 p/p) durante 1,5 horas y luego se centrifugó. El precipitado obtenido se remojó una segunda vez en alcohol isopropílico durante 30 minutos y se centrifugó.

- **Secado:** El precipitado finalmente recuperado tras los lavados con agua y remojo en isopropílico se deshidrató en una estufa a 40 °C.
- **Molienda y tamizado:** El producto seco fue molido y tamizado a un tamaño de 150 μm . Para su almacenamiento, se conservó en frascos de vidrio en un ambiente fresco y sin exposición a la luz.

3.4.2. APLICACIÓN DEL ULTRASONIDO PARA LA OBTENCIÓN DE OKARA DE TARWI SONICADA (OKS)

La aplicación del ultrasonido se realizó sobre una dispersión de okara fresca en agua (1:3 p/p). El equipo empleado se trató de un homogeneizador ultrasónico Vibra Cell VC-505 (Sonics & Materials Inc, Newtown, EE. UU.) de tipo monofrecuencia (20 kHz) y con una sonda estándar (12.5 mm de diámetro). Los parámetros de operación incluyeron un tiempo de 10 minutos efectivos con un pulso de 10 segundos encendido y 10 segundos apagado. La potencia de salida se ajustó con una amplitud del 40 %, en base al trabajo de referencia de Moscoso-Ospina et al. (2023). El volumen de la muestra se mantuvo constante (200 mL) en un vaso de 250 mL. La sonda se introdujo en la muestra a una distancia respecto a la base del vaso de precipitado igual a 4 cm aproximadamente. Adicionalmente, se colocó un baño de hielo alrededor de la muestra para atenuar la elevación de temperatura durante la sonicación. Al inicio y final del proceso, se midió la temperatura con una cámara termográfica para validar este efecto. La Figura 6 muestra un esquema del sistema de trabajo en el tratamiento de ultrasonido.



Figura 5: Esquema del sistema de trabajo en el tratamiento de ultrasonido

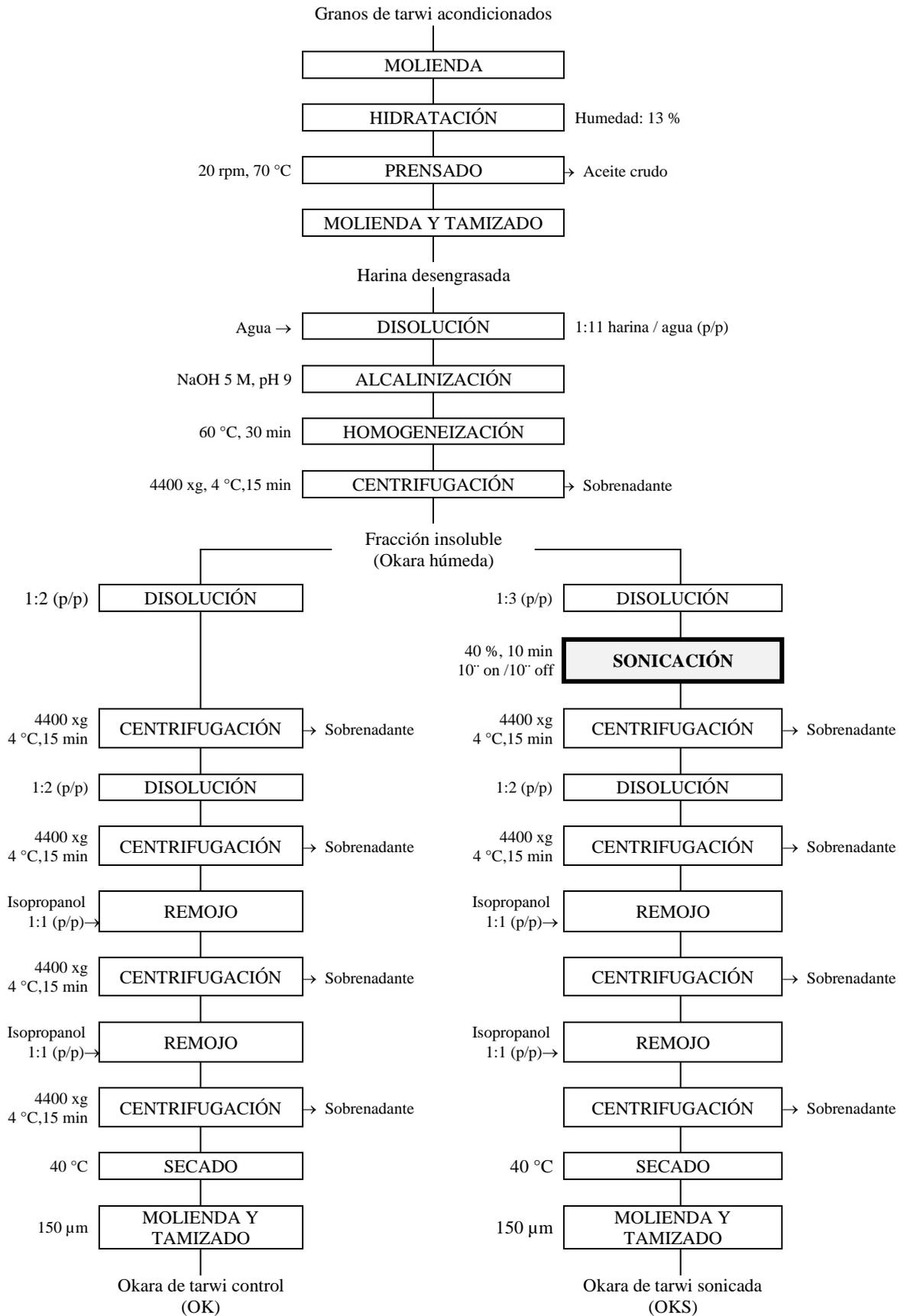


Figura 6: Flujo de operaciones para la obtención de okaras de tarwi (OK y OKS)

a. Caracterización del campo ultrasónico

La potencia de ultrasonido se midió mediante ensayos calorimétricos basado en la metodología de (Galvão et al., 2024). Para ello, se dispuso de un sistema de trabajo conformado por un vaso de 250 mL como recipiente de muestra con las paredes cubiertas por espuma de poliestireno para minimizar las pérdidas por calor (aislamiento térmico), un volumen de agua de 200 mL como muestra, un termómetro de termopar tipo K (DTM-507, Tecpel, Taiwan) y el homogeneizador ultrasónico dispuesto dentro de una cabina de sonido (aislamiento acústico). A fin de evidenciar los aumentos de temperatura, no se colocó un baño de agua helada alrededor de la muestra. El termopar se dispuso junto a la punta del sonotrodo, y ambos se sumergieron hasta el centro de la muestra. La temperatura se registró a intervalos de 1 segundo durante el tiempo total de sonicación (20 minutos) bajo los parámetros de operación establecidos en anteriormente (Sección 3.4.2.). El ensayo se realizó por triplicado. La potencia acústica (P) se calculó mediante la Ecuación 1. Cabe mencionar que este método asume que el sistema no tiene pérdidas de energía en forma de calor.

$$\text{Potencia acústica (W)} = m * C_p * \left(\frac{dT}{dt}\right) \quad (1)$$

Donde: C_p es la capacidad calorífica del solvente (J/kg °C); m , la masa del solvente utilizado (kg) y dT/dt , la pendiente de la temperatura registrada– curva de tiempo.

Posteriormente, la intensidad del ultrasonido y la densidad energética se determinaron a partir de la potencia acústica utilizando las Ecuaciones 2 y 3, respectivamente.

$$\text{Intensidad del ultrasonido (W/cm}^2\text{)} = \frac{4 * \text{Potencia acústica}}{\pi * D^2} \quad (2)$$

$$\text{Densidad energética (W/cm}^3\text{)} = \frac{\text{Potencia acústica}}{V} \quad (3)$$

Donde: D es el diámetro de la sonda (cm) y V es el volumen de solución de muestra (cm³).

3.4.3. ELABORACIÓN DE PANES LIBRES DE GLUTEN

La formulación base de pan libre de gluten utilizada en esta investigación consistió en una adaptación de los trabajos de Bird et al. (2017) y Vidaurre-Ruiz et al. (2019). Las formulaciones de los panes libres de gluten empleadas para la evaluación del efecto de la adición de las okaras de tarwi (OK y OKS) se indican en la Tabla 4. Respecto a la formulación control, cabe mencionar que, inicialmente se ensayó sin la adición de goma xantana. Sin embargo, esta mezcla produjo un batido inestable y de baja consistencia, donde las burbujas de aire se fusionaron en una sola, manifestándose como un agujero en el centro al interior de los moldes de pan horneados. Bajo esta condición, no fue posible la toma de muestra de pan para los análisis de caracterización; por lo tanto, se descartó entre los tratamientos a evaluar.

Tabla 4: Formulaciones de los tratamientos de panes libres de gluten

Ingrediente	Formulaciones				
	Control	OK3	OK5	OKS3	OKS5
Harina de arroz (%)	50	50	50	50	50
Almidón de papa (%)	50	50	50	50	50
Goma xantana (%)	0.5	0	0	0	0
OK (%)	0	3	5	0	0
OKS (%)	0	0	0	3	5
Aceite (%)	6	6	6	6	6
Azúcar (%)	3	3	3	3	3
Levadura (%)	2	2	2	2	2
Sal (%)	2	2	2	2	2
Agua (%)	77	77	77	77	77

El procedimiento de elaboración de los panes libres de gluten se presenta en la Figura 7. Las operaciones del proceso se describen a continuación:

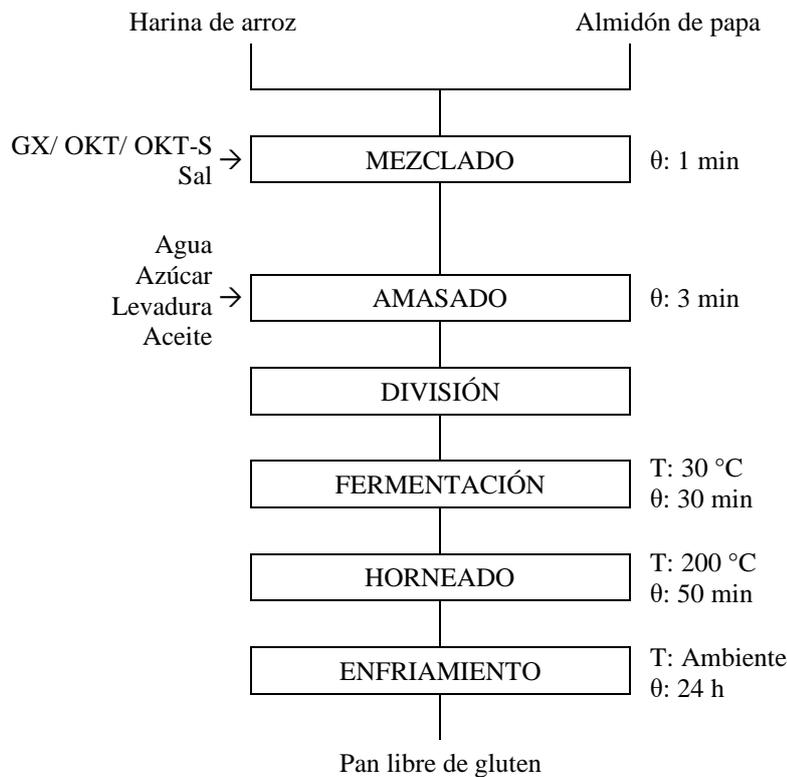


Figura 7: Flujo de elaboración de los panes libres de gluten

FUENTE: Vidaurre-Ruiz et al. (2019)

- **Mezclado:** Los ingredientes secos como harina de arroz, almidón de papa, sal y aditivo mejorador (goma xantana u okaras de tarwi), previamente pesados, se mezclaron en la batidora a baja velocidad (400 rpm) por 1 minuto.
- **Amasado:** La levadura empleada, de tipo seca instantánea, no necesitó activación previa; por lo tanto, solo se disolvió en agua y azúcar, y añadió directamente a la mezcla anterior. El amasado se realizó en la misma batidora a velocidad intermedia (600 rpm). Después de 2 minutos, se agregó el aceite y se continuó amasando hasta completar el tiempo total de 3 minutos.
- **División:** El batido se dividió en los moldes previamente engrasados y pesados. La cantidad de batido en cada molde fue de aproximadamente 200 g.
- **Fermentación:** Los moldes con los batidos se dispusieron dentro de la estufa incubadora acondicionada a 30 °C durante 30 minutos. En este periodo, los batidos se expandieron gradualmente en altura.
- **Horneado:** Completado el tiempo de fermentación, los moldes se colocaron en el horno eléctrico precalentado a 200 °C. La cocción se realizó por 50 minutos.

- **Enfriado:** Los panes se mantuvieron en su respectivo molde a temperatura ambiente para su enfriamiento. Después de 24 horas, se desmoldaron para ser evaluados según los análisis respectivos.

3.5. MÉTODOS DE ANÁLISIS

3.5.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS OKARAS DE TARWI

a. Composición proximal

La composición proximal de las okaras de tarwi (OK y OKS) se analizó según los métodos estándar aprobados en la directriz AOAC 21^a Edición (2019). Los procedimientos empleados incluyeron el método gravimétrico para el contenido de humedad (AOAC 934.01), el método Kjeldahl para el contenido de proteína (AOAC 920.87), el método de extracción Soxhlet para el contenido de grasa (AOAC 920.39), el método de incineración para el contenido de ceniza (AOAC 923.03) y el método de digestión ácida para el contenido de fibra cruda (AOAC 962.09). Los carbohidratos se calcularon por diferencia. El factor de conversión de nitrógeno utilizado para el cálculo del contenido de proteína ($N \times 5,4$) fue propuesto por Czubinski et al. (2021), considerando la proporción de compuestos nitrogenados no proteicos presentes en los lupinos. Los análisis se realizaron por triplicado para cada tratamiento de okara de tarwi.

b. Potencial zeta

El potencial zeta de las dispersiones de okara de tarwi se determinaron a 25 ± 2 °C con un analizador Zetasizer Nano ZSP (ZEN 5600, Malvern Instruments, Reino Unido) a pH 7. Los índices de refracción fueron 1,54 y 1,33 para las okaras y agua, respectivamente. Para las mediciones, las okaras se diluyeron (1:40 v/v) con agua desionizada (Lo et al., 2022). El análisis se realizó por triplicado para cada tratamiento de okara de tarwi.

3.5.2. PROPIEDADES TECNOFUNCIONALES DE LAS OKARAS DE TARWI

a. Capacidad de absorción de agua (CAA)

Para determinar esta propiedad, se pesaron 0,5 g de okara de tarwi en un tubo de centrífuga de 15 mL y luego se adicionó 10 mL de agua destilada. La mezcla se agitó por 5 minutos y posteriormente se centrifugó a 4400 xg durante 10 minutos. El sobrenadante se decantó y se pesó el sedimento restante (Aussanasuwannakul et al., 2023). El resultado se obtuvo con la Ecuación 4 y fue expresado en g de agua/g de muestra. El análisis se realizó por triplicado para cada tratamiento de okara.

$$CAA \text{ (g/g)} = \frac{\text{Peso de la muestra después decantar} - \text{Peso inicial de la muestra}}{\text{Peso inicial de la muestra}} \quad (4)$$

b. Capacidad de absorción de aceite (CAAC)

Para determinar esta propiedad, se pesó 1 g de okara de tarwi en un tubo de centrífuga de 15 mL y luego se adicionó 10 mL de aceite de girasol. La mezcla se agitó por 5 minutos y dejó reposar durante 30 minutos. Después, se centrifugó a 4400 xg durante 25 minutos. El sobrenadante se decantó y se pesó el sedimento restante (Aussanasuwannakul et al., 2023). El resultado se obtuvo con la Ecuación 5 y fue expresado en g de aceite/g de muestra. El análisis se realizó por triplicado para cada tratamiento de okara.

$$CAAC \text{ (g/g)} = \frac{\text{Peso de la muestra después decantar} - \text{Peso inicial de la muestra}}{\text{Peso inicial de la muestra}} \quad (5)$$

c. Capacidad de hinchamiento (CH)

Esta propiedad refleja la capacidad de aumentar el volumen de un material en presencia de un exceso de agua. Para ello, se pesaron 0,5 g de okara de tarwi y añadieron 6 mL de agua destilada. La solución se agitó por 5 minutos y luego se dejó reposar durante 24 horas a temperatura ambiente (Ostermann-Porcel et al., 2017). El volumen final de la muestra se

midió en mililitros. El resultado se obtuvo con la Ecuación 6 y fue expresado en mL de agua/g de muestra. El análisis se realizó por triplicado para cada tratamiento de okara.

$$CH \text{ (mL/g)} = \frac{\text{Volumen final de la muestra}}{\text{Peso inicial de la muestra}} \quad (6)$$

d. Índice de actividad y estabilidad emulsionante

El índice de actividad emulsionante (IAE) se determinó según el método propuesto por Lian et al. (2020). El procedimiento inició con la preparación de una mezcla de 1,25 g de okara de tarwi, 10 mL de aceite de girasol y 10 mL de agua destilada en un tubo de centrifuga de 50 mL. Esta mezcla se homogeneizó en un equipo ultraturrax (T25, IKA, Ecuador) a alta velocidad (2000 rpm) durante 1 minuto. La emulsión formada se diluyó con agua destilada en una fiola de 10 mL (FD 250). La densidad óptica de la emulsión diluida (OD) se midió en el espectrofotómetro UV-VIS (Genesys 150, Thermo Scientific, EE. UU.) a 500 nm. El fundamento de este método relaciona la densidad óptica de las emulsiones diluidas con el área interfacial de las películas de proteínas que rodean las gotas de aceite emulsionadas (Pearce & Kinsella, 1978). El resultado se obtuvo con la Ecuación 7 y fue expresado en m²/g de muestra. El análisis se realizó por triplicado para cada tratamiento de okara.

$$IAE \text{ (m}^2\text{/g)} = \frac{4,606 \times OD}{C \times VF \times 1000} \times DF \quad (7)$$

Donde: C es la concentración (g/mL) de la muestra en agua destilada antes de la emulsificación, VF es la fracción volumétrica de aceite (0.5) y DF es el factor de dilución (250).

$$ISE \text{ (min)} = \frac{OD}{OD - OD_{10}} * 10 \quad (8)$$

Para determinar el índice de estabilidad emulsionante, se realizó una segunda lectura de OD a los 10 minutos (OD₁₀). El resultado se obtuvo con la Ecuación 8 y fue expresado en min. El análisis se realizó por triplicado para cada tratamiento de okara.

3.5.3. ANÁLISIS DE LOS BATIDOS DE PANES LIBRES DE GLUTEN

a. Propiedades de pasta

Las propiedades de pasta de los batidos (sin levadura, ni aceite) se evaluaron según el método AACC 76-21.01 (2010) con un analizador rápido de viscosidad (RVA 4500, Perten Instruments, Australia). Inicialmente, se determinó la humedad de la muestra (13 % en promedio) y con el dato obtenido se calculó el peso del agua (25 mL aprox.) y la cantidad de muestra a analizar (3,5 g aprox.). Ambos ingredientes se pesaron por separado y luego se mezclaron en un recipiente cilíndrico de metal. El recipiente fue colocado en el equipo junto a una paleta. La configuración de la prueba se realizó en el software Thermocline para Windows (TCW) v3, propio del equipo, donde se seleccionó el programa de 13 minutos. Este programa comprendió tres etapas diferenciadas: (1) un periodo de calentamiento desde 50 °C hasta 95 °C, (2) un periodo isotérmico a 95 °C, y finalmente (3) un periodo de enfriamiento desde 95 °C hasta 50 °C. Durante todo el proceso la muestra fue sometida a agitación constante de 160 rpm. De la gráfica obtenida, se identificaron los valores de: Viscosidad pico (η_p), viscosidad mínima (η_{\min}), viscosidad de descomposición (η_{quiebre}), viscosidad final (η_f) y viscosidad de retrogradación (η_{retrog}). Las pruebas se realizaron por triplicado para cada formulación.

b. Modelamiento del perfil de viscosidad

Los datos obtenidos a partir de la curva de viscosidad se analizaron mediante el modelo matemático propuesto por Vidaurre-Ruiz et al. (2024), a fin de lograr una mayor comprensión sobre la influencia de las okaras de tarwi en el comportamiento de las matrices de los batidos durante el análisis viscoamilográfico. Este modelo divide el perfil de viscosidad en tres secciones que hacen referencia a los procesos consecutivos de gelatinización, descomposición y retrogradación (Figura 8). La primera parte de la curva comprende la región desde el inicio hasta η_p y considera la ecuación de Hill modificada (Ecuación 9) para su modelamiento.

$$\eta(t) = \frac{\eta_p * t^S}{R^S + t^S} \quad (9)$$

Donde: $\eta(t)$ es la viscosidad en función del tiempo (t) (min), R es el tiempo necesario para alcanzar el 50% de la viscosidad máxima y S es la velocidad de hinchamiento del almidón.

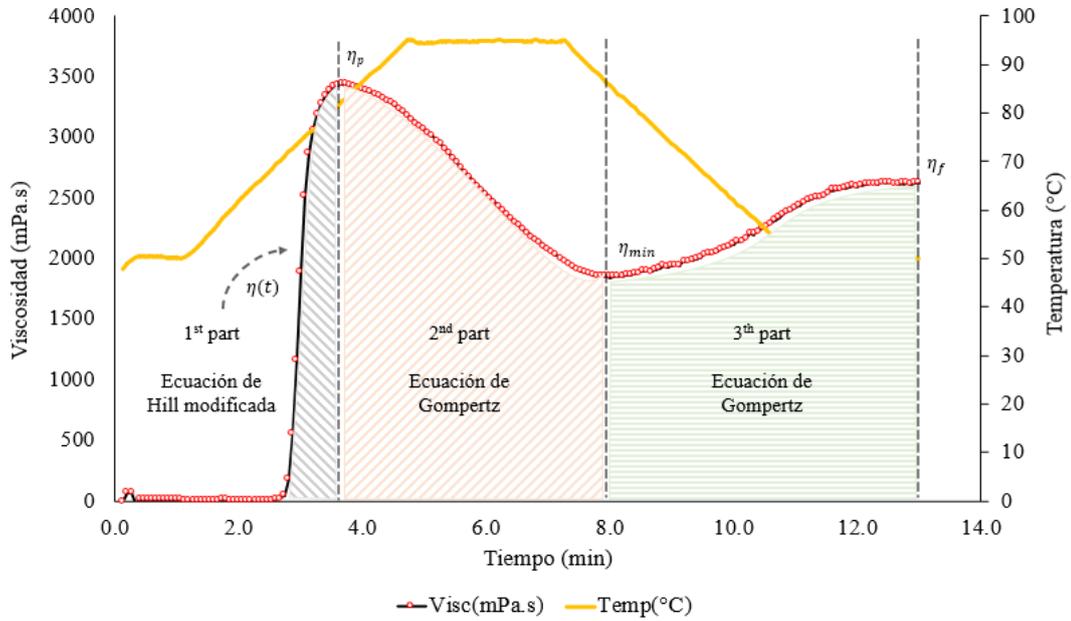


Figura 8: Diagrama de la curva de viscosidad y su división por etapas

FUENTE: Vidaurre-Ruiz et al. (2024)

La segunda y tercera parte de la curva se delimitan con η_{\min} y η_f , e incluyen la ecuación de Gompertz (Ecuación 10 y 11) para su modelamiento.

$$\eta(t) = \eta_p - A_1 \exp\{-\exp[-B_1(t - C_1)]\} \quad (10)$$

$$\eta(t) = \eta_{\min} - A_2 \exp\{-\exp[-B_2(t - C_2)]\} \quad (11)$$

Donde:

A_1 es la diferencia entre $\eta_p - \eta_{\min}$

A_2 es la diferencia entre $\eta_f - \eta_{\min}$

B_1 es la tasa de disminución relativa de la viscosidad en el momento C_1

B_2 es la tasa de crecimiento relativa de la viscosidad en el momento C_2

C_1 es el momento en que la tasa de disminución es máxima

C_2 es el momento en que la tasa de crecimiento es máxima

Asimismo, a partir de los coeficientes obtenidos en la Ecuación de Gompertz, se calcularon los parámetros cinéticos como el tiempo de desfase (Ecuación 12) y la tasa máxima de declive o crecimiento (Ecuación 13) de las secciones 2 y 3 de la curva.

$$\text{Tiempo de retardo } (\lambda_{1\ 0\ 2}) = C_{1\ 0\ 2} - \frac{1}{B_{1\ 0\ 2}}, \text{ en min} \quad (12)$$

$$\text{Tasa máxima de declive o crecimiento } (\mu_{\text{máx}\ 1\ 0\ 2}) = \frac{B_{1\ 0\ 2} * A_{1\ 0\ 2}}{2.72}, \text{ en Pa.s} \quad (13)$$

Donde: subíndices 1 y 2 corresponde a la sección 2 (descomposición) y 3 (retrogradación) de la curva, respectivamente.

Finalmente, se estimaron los índices de consistencia reomaláxico (unidades Pa.s²) generados durante la gelatinización (K rheo1), descomposición (K rheo2) y retrogradación (K rheo3), como las áreas bajo la curva de cada sección. El modelo de Vidaurre-Ruiz et al. (2024) propone estos tres nuevos índices para expresar el cambio de consistencia de la pasta debido a los cambios estructurales del almidón.

c. Propiedades de textura

El perfil de textura de los batidos (sin levadura) se analizó en un texturómetro universal (Modelo 3365, Instron, EE. UU.) utilizando una celda *Back Extrusion* (cilindro de 50 mm de diámetro y 70 mm de altura) y un embolo de 42 mm de diámetro. La prueba se realizó según el procedimiento descrito por Vidaurre-Ruiz et al. (2021). La celda se llenó completamente con el batido a evaluar, el cual fue preparado en el momento de la medición. Durante la prueba, el embolo penetró la muestra hasta un 50 % a una velocidad de 60 mm/min y una precarga de 10 gf; luego el embolo regresó a su posición inicial a la misma velocidad. A partir de la curva obtenida (Figura 9), se extrajeron los datos para ser procesados en el software “Back Extrusion Analyzer 1.1v” desarrollado y reportado por Vidaurre (2020). Los parámetros texturales calculados fueron: firmeza (fuerza máxima; en N), consistencia (área positiva de la curva; en N.s), cohesividad (valor mínimo de la curva; en N), índice de viscosidad (área negativa de la curva en; N.s). Las pruebas se realizaron por quintuplicado para cada formulación.

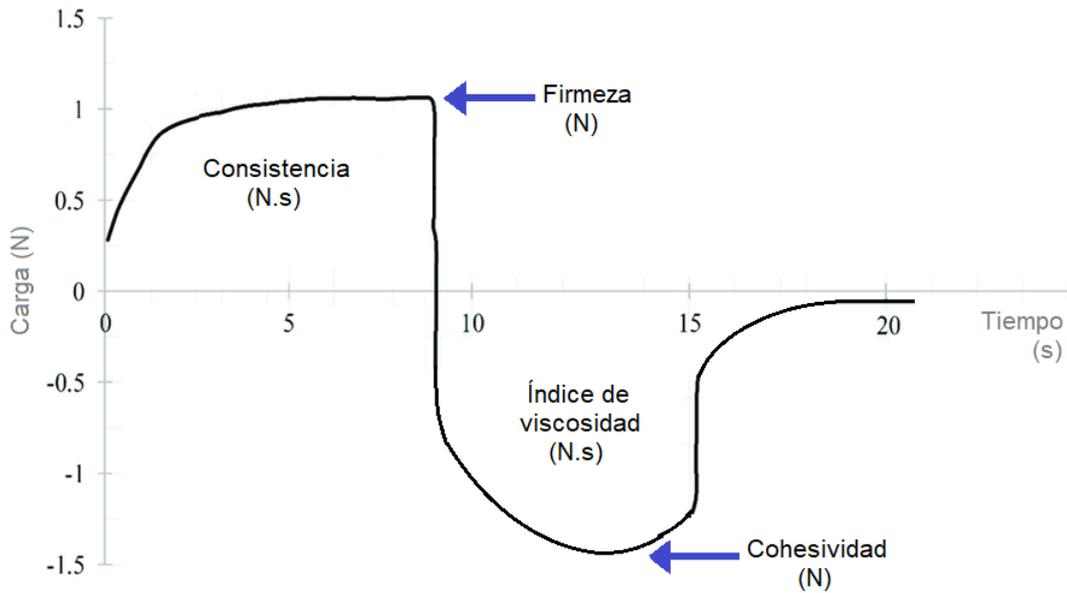


Figura 9: Perfil de textura de la prueba de *Back Extrusion*

3.5.4. ANÁLISIS DE LOS PANES LIBRES DE GLUTEN

Las muestras para estos análisis se obtuvieron de los panes de molde libres de gluten reposados 24 horas después su cocción. El desarrollo de los análisis se realizó según la secuencia propuesta en esta sección, la cual consideró aplicar las pruebas destructivas al final con el propósito de optimizar la cantidad total de muestra requerida.

a. Pérdida por horneado

La pérdida por horneado se obtuvo como la diferencia entre el peso del batido y el peso del producto horneado (Vidaurre-Ruiz et al., 2019). El resultado se obtuvo con la Ecuación 14 y fue expresado en % de muestra. El análisis se realizó por triplicado para cada formulación.

$$\text{Pérdida por horneado (\%)} = \frac{\text{Peso de la masa} - \text{Peso del pan después del enfriamiento}}{\text{Peso del pan después del enfriamiento}} * 100 \quad (14)$$

b. Volumen específico del pan

El volumen del pan se determinó con el equipo medidor de volumen (BVM-6610, Perten Instruments, Suecia), el cual se basa en el uso de topografía láser para modelar digitalmente una muestra y calcular así su volumen (mL). El volumen específico se estimó dividiendo el volumen del pan entre el peso de la pieza entera (Vidaurre-Ruiz et al., 2019). El resultado se expresó en mL/g. El análisis se realizó por triplicado para cada formulación.

c. Estructura alveolar de la miga

El análisis se desarrolló según el método propuesto por Vidaurre-Ruiz et al. (2019). Inicialmente, se obtuvieron las imágenes digitales de las rebanadas de pan mediante una impresora-escáner (MG3610, Canon, Japón) a una resolución de 600 dpi. Después, las imágenes se procesaron en el software ImageJ 1.51j8 (National Institutes of Health, EE. UU.). En este procesamiento, las imágenes se escalaron en cm, luego se extrajeron zonas cuadradas de 4 cm de lado, las cuales fueron convertidas a 8 bit y binarizadas. El análisis de partícula en las imágenes procesadas consideró aquellas de forma elíptica. La estructura alveolar de la miga se describió a través de 3 parámetros: la fracción de vacío (%), densidad alveolar (número de alvéolos/cm²), y el área alveolar promedio (mm²).

d. Color de la miga y la corteza

Los parámetros de color correspondientes al sistema CIE-L*a*b* (L: Luminosidad, a*: variación de rojo a verde, y b*: variación de amarillo a azul) se midieron con un colorímetro digital (CR-400, Konica Minolta). Las muestras miga se obtuvieron como rebanadas del centro del pan y para corteza, se tomó lectura de la parte superior del pan (Correa et al., 2021). Los análisis se realizaron por quintuplicado para cada formulación.

La intensidad del tono marrón en la corteza y miga de pan se expresó a través del índice de pardeamiento (Correa et al., 2021), el cual se calculó con la Ecuación 9.

$$IP = 100 \times \left[\left(\frac{a^* + 1,75 L}{5,645 L + a^* - 3,012 b^*} \right) - 0,31 \right] / 0,172 \quad (9)$$

e. Actividad de agua de la miga

La actividad de agua de la miga se determinó a 20 °C utilizando el medidor de actividad de agua (Modelo 4TE, Aqualab, EE. UU.). Primero, se obtuvo una porción de miga del centro del pan (10 g aprox.) y se desmenuzó con el fin de aumentar la superficie de exposición durante el análisis. La miga desmenuzada se distribuyó de manera uniforme dentro de un pequeño recipiente de plástico propio del equipo. Luego, éste se colocó en la cámara de medición del equipo para iniciar la lectura. El tiempo de lectura consistió en el necesario para calibrar la temperatura del equipo y muestra (Correa et al., 2021). El análisis se realizó por triplicado para cada formulación.

f. Análisis del perfil de textura de la miga

El análisis se desarrolló según el procedimiento descrito por Vidaurre-Ruiz et al. (2019). Las muestras se obtuvieron en forma de cilindro (2,5 cm de diámetro y 2,5 cm de altura) extraído de rodajas de la parte central del pan. La prueba se realizó en el texturómetro universal Instron (Modelo 3365, Instron, EE. UU.), a una velocidad de 60 mm/min para comprimir la miga al 50 % de su altura original. Durante la prueba, se aplicó fuerza de compresión en dos momentos. De la curva obtenida, se determinaron los siguientes parámetros: dureza (N), cohesividad, elasticidad y masticabilidad (N). El análisis se realizó por quintuplicado para cada formulación.

3.6. DISEÑO EXPERIMENTAL

El experimento se dividió en tres etapas entre las cuales se distribuyen los análisis de la Sección 3.5. En la Tabla 5 se presenta un esquema de la secuencia de la metodología experimental.

Tabla 5: Diseño experimental de la investigación

Etapa	Obtención de okaras de tarwi			Preparación de formulaciones	Elaboración de panes libres de gluten		
Principales operaciones	Materia prima acondicionada	Obtención de okara húmeda	Post-tratamiento	Caracterización	Preparación de batidos	Fermentación y horneado	Enfriamiento de los productos
Tratamientos	<p>Harina de tarwi desengrasada</p>	<pre> graph LR A[Harina de tarwi desengrasada] --> B[OK] A --> C[OKS] </pre>	<p>Control</p> <p>OK</p> <p>OKS</p>	<p>OK3</p> <p>OK5</p> <p>OKS3</p> <p>OKS5</p>			
Controles	<ul style="list-style-type: none"> • Condiciones de extracción de aceite 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo de homogeneización • pH de extracción alcalina 	<ul style="list-style-type: none"> • Parámetros del ultrasonido 	<ul style="list-style-type: none"> • Pesado de ingredientes 	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidad • Tiempo 	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura • Tiempo 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo de reposo
Análisis			<ul style="list-style-type: none"> • Composición • CAA • CAAC • IAE / ISE • CH 	<ul style="list-style-type: none"> • Perfil de viscosidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Perfil de textura 		<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de horneado • Volumen específico • Color • Aw • TPA • Estructura alveolar

3.7. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los análisis estadísticos se desarrollaron en el Statgraphics Centurion 19, e incluyeron el análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de comparación múltiple de Tukey. El efecto del ultrasonido sobre las propiedades de la okara de tarwi se evaluó a través de un diseño de experimentos completamente al azar (DCA) con 2 tratamientos, los cuales corresponden a los dos tipos de okaras de tarwi (OK y OKS) (Ver Anexo 2). De manera similar, el efecto de la adición de okaras sobre las propiedades de los batidos y los panes de molde libre de gluten se evaluó a través de un diseño de experimentos completamente al azar (DCA) con 5 tratamientos, los cuales corresponden a las formulaciones experimentales consideradas en la metodología (Control, OK3, OK5, OKS3, OKS5) (Ver Anexo 3).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE TRABAJO EN EL TRATAMIENTO DE ULTRASONIDO

La energía de ultrasonido propagada a través de un medio puede expresarse mediante distintos parámetros, tales como la potencia de ultrasonido (W), la intensidad de ultrasonido (W/cm^2) y la densidad de energía acústica (W/cm^3) (Das et al., 2022; Galvão et al., 2024). La potencia de ultrasonido se refiere a la velocidad a la que se emite la energía acústica por unidad de tiempo al medio líquido en tratamiento, motivo por el cual también se denomina potencia real (Costa y Neto, 2020; Das et al., 2022). Normalmente, su magnitud es inferior al de la potencia nominal (energía consumida por el equipo) debido a diversos factores que incluyen los parámetros de proceso y las propiedades del medio (Costa y Neto, 2020). Sin embargo, es común encontrar en la literatura los valores de potencia nominal como parte de la descripción del tratamiento de ultrasonido aplicado. La Tabla 6 reúne los parámetros configurados y calculados correspondientes a la aplicación del ultrasonido. El desarrollo de los cálculos realizados se detalla en el Anexo 4.

Tabla 6: Parámetros de operación del tratamiento de ultrasonido

Parámetros configurados	
Potencia nominal (W)	500
Frecuencia (kHz)	20
Amplitud (%)	40
Tiempo efectivo (min)	10
Pulso (on/off)	10"/10"
Parámetros calculados	
Potencia de ultrasonido o potencia real (W)	$16,77 \pm 1,08$
Potencia real específica (W/g)	$84,17 \pm 5,41$
Intensidad de ultrasonido (W/cm^2)	$13,66 \pm 0,88$
Densidad energética (W/cm^3)	$0,08 \pm 0,01$

La potencia de ultrasonido suministrada al sistema de trabajo fue igual a $16,77 \pm 1,08$ W. Galvão et al. (2024) estimaron valores más altos de este parámetro ($56,25 - 49,56$ W) en el tratamiento de ultrasonido (60 – 70 % amplitud) como tecnología de asistencia a la extracción de proteínas de lenteja. Al respecto, se ha señalado que la potencia de ultrasonido se rige principalmente por la amplitud de las vibraciones. Un aumento en la amplitud se asocia con una mayor potencia y, en consecuencia, una mayor intensidad de ultrasonido (Chavan et al., 2022; Yu et al., 2024). En base a lo anterior, se infiere que el uso de una baja amplitud (40 %) haya afectado el nivel de potencia suministrada a la muestra. No obstante, este nivel de amplitud se considera adecuado para el tipo de muestra procesada que consistió en una dilución de okara de tarwi húmeda en agua. Las vibraciones de ultrasonido de alta amplitud se recomiendan en particular para muestras viscosas. Caso contrario, una cavitación vigorosa en muestras diluidas tiende a la formación de espuma, la cual disminuye la eficiencia de la sonicación (Chavan et al., 2022; Yu et al., 2024). Asimismo, un detalle a considerar es que el uso de amplitudes elevadas provoca un daño más rápido de los transductores del ultrasonido (Das et al., 2022).

La intensidad en particular se expresa como la potencia acústica transmitida por unidad de área de la superficie emisora del transductor, y se considera esencial para determinar los efectos del ultrasonido (Das et al., 2022). La intensidad ultrasónica estimada en el sistema de trabajo ($13,66$ W/cm²) se incluye dentro de la categoría de aplicaciones de alta energía (20 – 100 kHz, $10 - 1000$ W/cm²) (Chavan et al., 2022; Chen et al., 2022; Yu et al., 2024). Normalmente, el ultrasonido de alta intensidad es acompañado de una alta densidad de energía ($1 - 10$ W/cm³). Sin embargo, la densidad energética calculada del sistema de trabajo ($0,08 \pm 0,01$ W/cm³) se encontró dentro del rango de baja energía ($0,01 - 0,1$ W/cm³) (Ampofo y Ngadi, 2022). Cuando una muestra se expone a ultrasonidos de alta intensidad a través de una pequeña superficie, la energía ultrasónica se concentra en un área reducida de la muestra y su difusión se ve limitada. Esto se traduce en una menor densidad acústica y, por ende, en una reducción de los efectos de cavitación (Ampofo y Ngadi, 2022). La compañía de fabricación Sonics® expresa que un mayor diámetro de sonda permite procesar un mayor volumen de muestra, pero a menor intensidad. En ese sentido, la baja densidad energética en el sistema correspondió con el uso de una superficie de sonda pequeña (12,5 mm diámetro) y un volumen de muestra significativo (200 mL).

El pulso configurado (10 on /10 off), equivalente a un ciclo de trabajo del 50 %, se encuentra dentro de las condiciones aceptables de operación, según lo expuesto por (Das et al., 2022). Los autores señalaron que los rendimientos de extracción de proteínas vegetales son mejorados hasta cierto umbral del ciclo de trabajo (~60 %), después de los cuales los rendimientos pueden permanecer sin cambios o incluso disminuir como efecto de una agregación de proteínas indeseable. Además, añadieron que los tiempos de reposo prolongados previenen la rápida elevación de temperatura en el sistema, cuyo impacto puede sumarse los efectos sonofísicos del tratamiento.

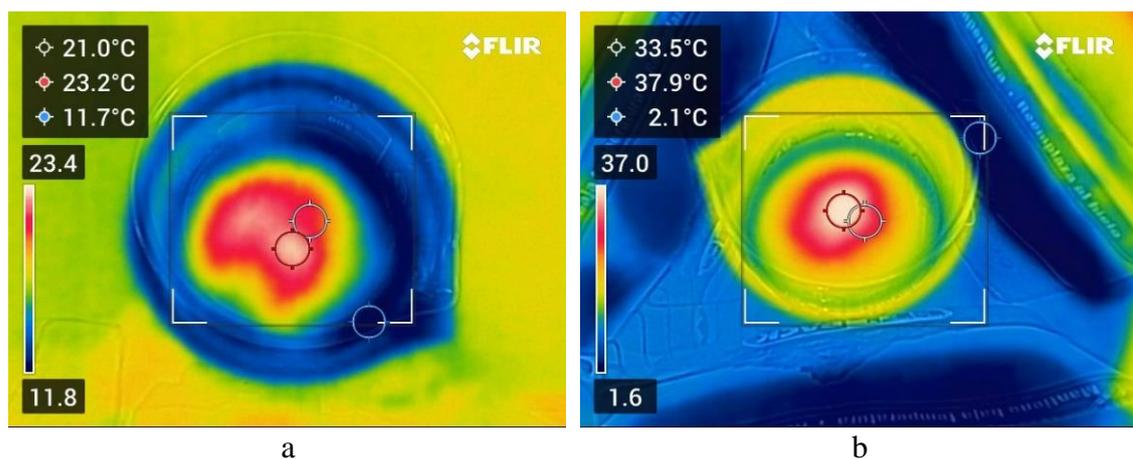


Figura 10: Mediciones de temperatura de la dispersión de okara de tarwi al inicio (a) y final (b) del tratamiento de ultrasonido

En este estudio, la disposición de un baño de agua helada alrededor de la dispersión de okara de tarwi ayudó a atenuar el aumento de temperatura en la misma. Este efecto fue verificado mediante la lectura de temperatura de la muestra con la cámara termográfica al inicio y al final del tratamiento de ultrasonido (Figura 10), cuyos valores (en promedio) fueron de $23,78 \pm 1,72$ °C y $35,67 \pm 2,34$ °C, respectivamente. Cabe mencionar que, la dispersión de okara de tarwi en todas las repeticiones no superó los 40 °C en el punto más caliente identificado por la cámara térmica. De esta manera, se logró afirmar que los agentes de cambio en la matriz de la dispersión de okara correspondieron esencialmente a los efectos mecánicos de la cavitación.

4.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS OKARAS DE TARWI

La caracterización fisicoquímica de las okaras de tarwi (OK y OKS) incluyó los análisis de composición proximal y potencial zeta. Los resultados se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7: Caracterización fisicoquímica de las okaras de tarwi

	OK	OKS
Humedad b.h. (%)	10,18 ± 0,04 ^a	9,91 ± 0,09 ^b
Proteína b.h. (%)	42,71 ± 0,80 ^a	31,27 ± 0,54 ^b
Grasa b.h. (%)	1,47 ± 0,07 ^a	1,10 ± 0,06 ^b
Cenizas b.h. (%)	1,94 ± 0,01 ^b	2,07 ± 0,04 ^a
Fibra b.h. (%)	16,95 ± 0,21 ^b	33,06 ± 0,35 ^a
Carbohidratos (sin fibra) b.h. (%)	26,36 ± 0,31 ^a	21,94 ± 0,39 ^b
Potencial zeta (mV)	-37,30 ± 1,60 ^a	-29,40 ± 1,20 ^b

Los datos se presentan como media ± D.S (n=3). Letras diferentes en una misma fila indican diferencias significativas (p<0,05).

4.2.1. COMPOSICIÓN PROXIMAL

La proteína fue el componente mayoritario en la okara de tarwi control (42,71 ± 0,80 %). La presencia de proteínas en este residuo obtenido de una extracción alcalina corresponde a la fracción proteica no extraíble mediante técnicas convencionales. De acuerdo con Aguilar-Acosta et al. (2020), las proteínas de *L. mutabilis* S. se componen principalmente por globulinas y albuminas (58 %), seguido de una fracción residual (30 %) que no estaría disponible incluso al final de un protocolo intensivo. Los parámetros de extracción en el presente estudio incluyeron un valor de pH convencionalmente empleado para la obtención de aislados proteicos (pH 9,0) (Bou et al., 2022; Lo et al., 2022; Loushigam y Shanmugam, 2023). En relación con ello, se ha informado que niveles elevados de pH (superior a 9) si bien pueden mejorar el rendimiento de extracción de las proteínas, también puedan comprometer cambios fisicoquímicos en dichas moléculas que conlleven a una limitación en su desempeño tecnofuncional (Miranda et al. 2022; Huamaní-Perales et al., 2024). De allí, la importancia de balancear la intensidad de los parámetros de proceso según el propósito deseado.

Después del tratamiento de ultrasonido, el contenido de proteína en la okara de tarwi sonicada disminuyó en un 11 %. Moscoso Ospina et al. (2022) reportaron una misma tendencia en la okara de soya sonicada después de la extracción alcalina: disminución del contenido de proteína en un 12 %. Esta disminución fue atribuida a los efectos del ultrasonido sobre la matriz de muestra, los cuales implican una reducción del tamaño de las partículas en general y, en el caso de las proteínas, una mejora en sus interacciones con el agua. Este hecho promueve un aumento de las proteínas solubilizadas y, con ello, un mayor rendimiento de extracción (Loushigam y Shanmugam, 2023).

En contraste a las proteínas, la proporción de fibras en la okara de tarwi sonicada aumentó significativamente en un 16 % respecto a la okara de tarwi control. Este incremento a su vez fue equivalente a la disminución conjunta de sus contenidos de proteínas y carbohidratos (~16 %). La vibración mecánica generada por el ultrasonido amplía la superficie de contacto entre el soluto y la solución. Este efecto, además de favorecer la solubilización de proteínas, promueve la extracción de otros compuestos solubles como azúcares, oligosacáridos y fibra soluble (Wang et al., 2020). Las fibras en *L. mutabilis* S. son del tipo insoluble en su mayoría (95 % en promedio) (Villacrés et al., 2020); por lo tanto, es probable que la cantidad de fibra en la okara de tarwi sonicada haya permanecido invariable tras el tratamiento de ultrasonido. Finalmente, con respecto al contenido de grasa y cenizas, ambos componentes en conjunto representaron menos del 4 % en las okaras de tarwi.

4.2.2. POTENCIAL ZETA

El potencial zeta refleja el valor medio de la carga superficial de las partículas de un sistema complejo, y comúnmente se ha empleado para caracterizar la estabilidad de las proteínas en una solución (Adal, 2024; Wang et al., 2024). Cabe mencionar que, el potencial zeta de las dispersiones de okara de tarwi en este estudio se midió a pH 7 con fines de comparación al de otros valores reportados en la literatura para dispersiones de proteínas de legumbres, que comúnmente se evalúan bajo las mismas condiciones.

La dispersión de okara de tarwi control (OK) exhibió un potencial zeta ($-37,3 \pm 1,60$ mV) menor en comparación al de proteínas nativas de legumbres como haba ($-40,8$ mV) (Adal, 2024) y soya ($-43,5$ mV) (Hamed et al., 2024). En el caso de las proteínas, se ha señalado

que estas moléculas típicamente estabilizan una solución cuando sus cargas superficiales son altas (por encima de +30 mV o por debajo de -30 mV), mientras que con cargas superficiales entre ± 30 mV, las proteínas tienden a agregarse (Hamed et al., 2024). En base a ello, la carga superficial de OK le permitiría exhibir cierto poder de estabilización en soluciones.

La aplicación de ultrasonido disminuyó significativamente la magnitud del potencial zeta de las dispersiones de OKS a $-29,4 \pm 1,20$ mV. En las proteínas, la reducción de la carga superficial significa que el grado de ionización de los grupos de superficie fue debilitado (Adal, 2024; Martínez-Velasco et al., 2018). Este suceso podría extrapolarse a las okaras de tarwi para explicar la disminución de su carga superficial después del ultrasonido: la sonicación provocó una mayor exposición de grupos con carga positiva, los cuales neutralizaron parte de los grupos con carga negativa en la superficie de las partículas, demostrando así finalmente un menor potencial zeta. Por el contrario, Liu et al. (2021) informaron un aumento en la carga negativa superficial de la okara soya después de la aplicación de ultrasonido. Los autores sostuvieron que la ruptura de los enlaces entre la celulosa y otros polisacáridos en la fibra de okara implicó la exposición de más grupos polares libres y la liberación de fibras solubles cargadas, lo cual condujo a exhibir un potencial ζ más alto. El efecto opuesto presentado en el cambio de carga superficial de las okaras de tarwi y soya en mención con el tratamiento de ultrasonido se relacionó con factores intrínsecos determinantes de las propiedades electroquímicas de la superficie de las partículas. Entre ellos se encuentran la composición de la matriz, la conformación de proteínas y el perfil de aminoácidos presentes (Hamed et al., 2024).

4.2.3. PROPIEDADES TECNOFUNCIONALES

Los resultados de las propiedades tecnofuncionales evaluadas en las okaras de tarwi se presentan en la Tabla 8.

a. Capacidad de retención de agua y aceite

La okara de tarwi control (OK) exhibió una buena capacidad de absorción de agua ($3,32 \pm 0,03$ g/g), comparable a la de concentrados de proteína de soya (3,5 g/g) (de Paiva Gouvêa

et al., 2023) y arveja (3,0 g/g) (Wang et al., 2020). En okaras de garbanzo y soya, se han encontrado valores de 6,0 g/g y 8,3 g/g, respectivamente (Lian et al., 2020). No obstante, además de proceder de otras especies de leguminosas, las propiedades fisicoquímicas de las okaras en mención (garbanzo y soya) serían distintas respecto a la okara de tarwi en estudio, dado que fueron recuperadas mediante otro método (elaboración de bebidas vegetales).

Tabla 8: Propiedades tecnofuncionales de las okaras de tarwi

Propiedad	OK	OKS
Capacidad de absorción de agua (g/g)	3,32 ± 0,03 ^a	4,30 ± 0,04 ^b
Capacidad de absorción de aceite (g/g)	1,15 ± 0,02 ^a	1,31 ± 0,05 ^b
Índice de actividad emulsionante (m ² /g)	13,44 ± 0,44 ^a	16,89 ± 0,52 ^b
Índice de estabilidad emulsionante (min)	25,12 ± 0,51 ^a	26,22 ± 0,29 ^b
Capacidad de hinchamiento (mL/g)	5,37 ± 0,21 ^a	7,14 ± 0,85 ^b

Los datos se presentan como media ± D.S (n=3). Letras diferentes en una misma fila indican diferencias significativas (p<0,05).

La capacidad de absorción de agua en las okaras de tarwi (OK y OKS) se atribuyó a las proteínas y fibras presentes en las matrices de composición. Las proteínas sostienen propiedades de hidratación debido a su estructura tridimensional capaz de interactuar con el agua (de Paiva Gouvêa et al., 2023); mientras que, las fibras poseen una estructura fibrilar compacta, formada por la red de polisacáridos que las conforman, donde el agua puede quedar atrapada (Gutöhrlein et al., 2020). En el caso de la capacidad de absorción de aceite en OK (1,15 ± 0,02 g/g), ésta se asoció específicamente a su contenido de proteínas. Las numerosas cadenas laterales no polares en las proteínas de origen vegetal son responsables del atrapamiento físico de los lípidos, permitiéndoles así exhibir la propiedad de absorción de aceite (Bou et al., 2022).

Las capacidades de absorción de agua y aceite de OKS se vieron incrementadas frente a OK en un 30 % y 14 %, respectivamente. La naturaleza contrastante del agua y el aceite pueden significar un desafío en el intento de promover las habilidades de interacción de las proteínas con ambas sustancias de manera simultánea. Ante ello, el uso de tecnologías de asistencia a los procesos de extracción alcalina, como el ultrasonido de alta intensidad, han demostrado conseguir este resultado en las proteínas de legumbres (Huamaní-Perales et al., 2024). Los efectos del ultrasonido de alta intensidad sobre las proteínas en general incluyen la reducción

del tamaño de partícula y la exposición de grupos hidrofóbicos internos. Esto conduce a la formación de una estructura de gel más firme capaz de retener más moléculas de agua, y el aumento de la hidrofobicidad superficial de las proteínas para absorber con mayor eficiencia las gotas de aceite en la superficie (Bou et al., 2022; Wang et al., 2020; Yu et al., 2024). En base a ello, se asume que las proteínas en OKS también experimentaron estos efectos en cierta medida. Además, la concentración del contenido de fibras en OKS también es probable que haya contribuido al incremento en la capacidad de absorción de agua. Entre los efectos del ultrasonido de alta intensidad sobre las fibras, se menciona la desfibrilación. Este fenómeno consiste en un relajamiento de la estructura fibrilar compacta acompañado de un aumento de microporos y cavidades donde atrapar más agua (Kumar et al., 2023). El impacto del tratamiento de ultrasonido sobre los componentes mayoritarios de OKS (fibras y proteínas) respalda las mejoras en sus propiedades de absorción de agua y aceite. Ambas propiedades están relacionadas con atributos de textura y retención de sabor en los alimentos; por lo tanto, juegan un papel importante en una amplia gama de productos, incluidos los productos de panadería (Yu et al., 2024).

b. Propiedades emulsionantes

Las proteínas presentes en las okaras de tarwi (OK y OKS) son primordialmente responsables de sus propiedades de emulsión. El carácter anfifílico de las proteínas (hidrofílico e hidrofóbico) les permite absorberse en la interfaz aceite-agua y crear una capa protectora en la superficie de la fase dispersa para formar y estabilizar emulsiones (Ampofo y Ngadi, 2022; Yu et al., 2024). Las propiedades de emulsión se evalúan mediante diferentes métodos, uno de ellos se basa en la turbidimetría y se expresa a través de los índices de actividad emulsionante (EAI) y estabilidad emulsionante (ESI). El primero representa el área interfacial estabilizada por unidad de peso de proteína, y el segundo mide la estabilidad de la emulsión basándose en el cambio de turbidez de la emulsión, como resultado de la coalescencia después de un determinado tiempo (Huamaní-Perales et al., 2024). Los índices de actividad y estabilidad emulsionante de las okaras de tarwi (OK y OKS) resultaron próximos y en algunos casos inclusive superiores a los de ingredientes proteicos de legumbres diversas (EAI 14,03 – 19,39 m²/g y ESI 12,59 – 21,26 min) (Paiva Gouvêa et al., 2023).

El tratamiento de ultrasonido promovió los índices de actividad y estabilidad emulsionante de OKS frente a OK en un 26 % y 4 %, respectivamente. Los efectos de su mecanismo implican el despliegue parcial de proteínas y la redistribución de los grupos cargados en la interfaz. El primero mejora la flexibilidad conformacional de las proteínas para migrar más rápido a la interfaz de una emulsión (Yan et al., 2021), y el segundo se refleja a través de cambios en la hidrofobicidad y la carga superficial (Bou et al., 2022). Este hecho produce que las proteínas exhiban fuerzas de repulsión electrostática, lo que dificulta eficazmente la agregación de las gotas de emulsión mejorando así la estabilidad del sistema (Ampofo y Ngadi, 2022; Yu et al., 2024). Por otro lado, las fibras tienen la capacidad de aumentar la viscosidad de un sistema disperso debido a sus propiedades de hidratación (Gutöhrlein et al., 2020). Consecuentemente, el aumento de la concentración de fibras en OKS contribuyó a una mayor estabilidad al sistema, favoreciendo así a su índice de estabilidad emulsionante.

c. Capacidad de hinchamiento

La capacidad de hinchamiento de las partículas inicia como un fenómeno a nivel superficial y continua en el interior de la estructura molecular, donde un mayor nivel de absorción de agua conduce a una expansión de la matriz (Kumar et al., 2023). Además de los almidones, esta propiedad también es exhibida por otros compuestos como las proteínas y las fibras cuando se encuentran en condiciones de exceso de agua (Keskin et al., 2022; Kumar et al., 2023, Lo et al., 2021). Dado que el tarwi es una leguminosa casi sin contenido de almidón (De-La-Cruz-Yoshiura et al., 2023), la expresión de esta propiedad en ambos tipos de okara (OK y OKS) recae en las proteínas y fibras parte de su composición. Los valores obtenidos (5,37 mL/g y 7.14 mL/g) se encontraron dentro del rango de 5,43 mL/g a 7,99 mL/g, reportado para okaras de soya nativas obtenidas por el método tradicional (Kumar et al., 2023; Ostermann-Porcel et al., 2017).

La okara de tarwi sonicada (OKS) exhibió un incremento en la capacidad de hinchamiento del 33%. Fan et al. (2020) también demostraron un incremento de esta propiedad en la okara de soya alrededor de un 32 % tras la aplicación de ultrasonido de baja densidad de potencia (1 - 2 W/mL) alcanzando valores de hasta 7,16 mL/g. Los autores asociaron los resultados al cambio en los grupos hidrófilos y la apertura de la estructura compacta de las fibras de okara. Además, relacionaron una mayor capacidad de absorción de agua con un aumento de

la capacidad de hinchamiento, tendencia que también fue observada en el presente estudio. Por otro lado, Kumar et al. (2023) informaron que el ultrasonido puede modular eficazmente las proporciones de fibra soluble e insoluble en frijoles. Las proporciones de fibra en un material afecta directamente sus propiedades hidratación, como la capacidad de hinchamiento. Las fibras solubles, debido a su carácter hidrófilo, han demostrado mayor capacidad de hinchamiento que las de tipo insoluble (Keskin et al., 2022).

4.3. ANÁLISIS DE LOS BATIDOS

4.3.1. PERFIL DE VISCOSIDAD

El perfil de viscosidad de una formulación mediante la prueba del Analizador Rápido de Viscosidad (RVA) brinda información relevante sobre su rendimiento durante el horneado, dado que simula las condiciones de calentamiento (Vidaurre-Ruiz et al., 2023). Las propiedades de pasta de las formulaciones estudiadas se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9: Propiedades de pasta de las formulaciones de pan libre de gluten

Formulación	η_p (Pa.s)	$\eta_{mín}$ (Pa.s)	$\eta_{descomp.}$ (Pa.s)	η_f (Pa.s)	$\eta_{retrog.}$ (Pa.s)
Control	4,54 ± 0,05 ^a	2,92 ± 0,02 ^a	1,58 ± 0,07 ^a	4,23 ± 0,01 ^a	1,31 ± 0,01 ^{a,b}
OK3	3,95 ± 0,13 ^b	2,63 ± 0,05 ^b	1,32 ± 0,08 ^b	3,84 ± 0,02 ^{b,c}	1,22 ± 0,03 ^b
OK5	3,96 ± 0,11 ^b	2,44 ± 0,06 ^c	1,52 ± 0,05 ^{a,b}	3,67 ± 0,07 ^c	1,23 ± 0,02 ^b
OXS3	4,16 ± 0,02 ^b	2,64 ± 0,03 ^b	1,52 ± 0,01 ^{a,b}	3,99 ± 0,04 ^b	1,35 ± 0,01 ^a
OXS5	4,09 ± 0,03 ^b	2,63 ± 0,02 ^b	1,46 ± 0,05 ^{a,b}	3,88 ± 0,07 ^b	1,25 ± 0,05 ^{a,b}

η_p , viscosidad pico; $\eta_{mín}$, viscosidad mínima; $\eta_{descomp.}$, viscosidad de descomposición; η_f , viscosidad final y $\eta_{retrog.}$, viscosidad de retrogradación. Los datos se presentan como media ± D.S (n=3). Letras diferentes en una misma columna indican diferencias significativas (p<0,05).

La viscosidad pico indica el punto donde los gránulos de almidón se hinchan al máximo durante el proceso de gelatinización (William et al., 2023). Entre los tratamientos evaluados (formulaciones a base de harina de arroz y almidón de papa), el control presentó la viscosidad pico más alta (4,54 Pa.s). En otro estudio, un valor más bajo (3,34 Pa.s) fue registrado para una matriz similar a base de almidón de papa con goma xantana (Vidaurre-Ruiz et al., 2019). Al respecto, se ha señalado que la harina de arroz tiene una buena capacidad de retención de

agua y capacidad de gelificación, superior incluso a la harina de trigo (Yang et al., 2024). Por lo tanto, la incorporación de este ingrediente habría reforzado las características fisicoquímicas de la matriz base en estudio para alcanzar un mayor grado de gelificación. El grado de disminución de la viscosidad pico en los batidos con OK (~13 %) fue mayor en comparación al de los batidos con OKS (8 - 10 %). Este resultado se relacionó con la habilidad de absorción de agua de las okaras de tarwi, donde OKS ($4,30 \pm 0,04$ g/g) tuvo una mayor capacidad frente a OK ($3,32 \pm 0,03$ g/g). Lian et al. (2020) sostuvieron que la viscosidad pico en una mezcla refleja la capacidad de hinchamiento de los gránulos de almidón presentes, así como, la capacidad de absorción de agua del almidón y otros ingredientes. La presencia de otros componentes, como proteínas y fibras, también puede intervenir en la capacidad de hinchamiento del almidón (Bender y Schönlechner, 2020; Zhang et al., 2021). Las proteínas interactúan con los almidones formando complejos que limitan las interacciones almidón-agua y, por lo tanto, la gelatinización del almidón (Zhang et al., 2021). Por otro lado, las fibras compiten con el almidón por el agua debido a sus propiedades de retención de agua (Bender y Schönlechner, 2020). El nivel de proteínas y fibras en las formulaciones propio de la adición de okaras de tarwi (OK y OKS) correspondió con el efecto de disminución de la viscosidad pico. En mezclas para el desarrollo de productos que requieren alta resistencia al gel y elasticidad, como los productos de panificación, es de carácter idóneo presentar picos altos de viscosidad (William et al., 2023).

La presencia de okaras de tarwi (OK y OKS) en los batidos condujo a una disminución de la viscosidad mínima entre un 9 % a 16 %, respecto al control. La viscosidad mínima corresponde al estado de mayor descomposición de los gránulos de almidón, tras haber experimentado los efectos de la exposición al calor y continua agitación (Vidaurre-Ruiz et al., 2024). El grado de reducción de la viscosidad en este punto generalmente se encuentra asociado a la lixiviación de amilosa en la solución (William et al., 2023). Las interacciones entre almidones y proteínas pueden reducir la cantidad de amilosa lixiviada durante la gelatinización (Zhang et al., 2021), como fue el caso de los batidos cuyas matrices incluyen las okaras de tarwi. Respecto a la viscosidad de descomposición ($\eta_p - \eta_{\text{mín}}$), los batidos OK5, OKS3 y OKS5 sostuvieron los grados de desintegración estadísticamente más parecidos al control ($p > 0.05$). A pesar de las disminuciones en la viscosidad mínima, las viscosidades de descomposición de estos batidos reflejan cierto nivel de estabilidad de la matriz de almidón frente a las fuerzas de corte y tensión.

La viscosidad final es alcanzada con la formación de una red tridimensional por las cadenas de amilosa que se liberaron de los gránulos de almidón (Vidaurre-Ruiz et al., 2023). Los batidos con okara de tarwi control (OK3 y OK5) alcanzaron las viscosidades finales más bajas. Las proteínas, predominantemente presentes en OK, interactuaron con el almidón e impidieron su reordenamiento molecular durante el enfriamiento, lo cual se vio reflejado en una viscosidad final más baja (Zhang et al., 2021). Por último, la viscosidad de retrogradación se mantuvo similar entre todas las formulaciones, incluido el control. Las mezclas con alto grado de retorno a la conformación nativa del almidón son particularmente recomendables para la elaboración de panes (William et al., 2023).

4.3.2. PARÁMETROS DERIVADOS DEL MODELAMIENTO DEL PERFIL DE VISCOSIDAD

El modelamiento del perfil de viscosidad de las formulaciones experimentales permitió obtener parámetros cinéticos e índices de consistencia que describen el proceso de gelatinización, descomposición y retrogradación de los almidones (Tabla 10). En general, se observó que cada de las 3 partes de la curva se ajustaron satisfactoriamente con el modelo matemático propuesto por Vidaurre-Ruiz et al.(2024) (R^2 : 0,992 – 0,999). Los valores de los coeficientes obtenidos de la Ecuación de Gompertz en la segunda y tercera parte de la curva se reportan en el Anexo 5.

La primera parte de la curva señala el proceso de gelatinización del almidón. En esta sección, el tiempo estimado para alcanzar el 50 % de la viscosidad máxima (parámetro R) osciló en el estrecho rango de 3,45 min a 3,61 min, sin diferencias significativas ($p > 0,05$). Ante ello, se induce que la presencia de okaras de tarwi (OK y OKS) no afectó la resistividad de los almidones presentes para ralentizar el tiempo de gelatinización durante el calentamiento. Valores de R más bajos (2,97 - 3,40 min) se han informado para formulaciones a base de almidón de papa y harinas de granos andinos, como kañiwa y tarwi, con goma xantana (Vidaurre-Ruiz et al., 2024). Así mismo, en la caracterización de almidones provenientes de maíz, yuca y trigo se han reportado valores más altos, entre 3,4 a 5,5 min (Palabiyik et al., 2017).

Tabla 10: Parámetros derivados del modelamiento de las curvas de viscosidad de los batidos de pan libre de gluten

Parámetro	Control	OK3	OK5	OKS3	OKS5
Primera parte de la curva					
R (min)	3,61 ± 0,03 ^a	3,51 ± 0,07 ^a	3,45 ± 0,03 ^a	3,45 ± 0,05 ^a	3,50 ± 0,01 ^a
S	10,25 ± 0,08 ^a	8,58 ± 0,41 ^{a,b}	8,83 ± 0,26 ^{a,b}	9,45 ± 0,75 ^{a,b}	8,78 ± 0,17 ^{a,b}
K rheo1 (x10 ⁻⁴ Pa.s ²)	43,71 ± 0,22 ^a	38,52 ± 1,67 ^{a,b}	38,47 ± 1,44 ^{a,b}	40,76 ± 0,55 ^{a,b}	37,84 ± 1,91 ^b
R ²	0,996	0,992	0,992	0,993	0,992
Segunda parte de la curva					
λ1 (min)	5,52 ± 0,08 ^a	5,70 ± 0,08 ^a	5,47 ± 0,00 ^a	5,58 ± 0,01 ^a	5,52 ± 0,05 ^a
μ1 (mPa.s/min)	941,21 ± 45,81 ^a	771,75 ± 17,18 ^b	834,06 ± 22,42 ^{a,b}	868,38 ± 29,10 ^{a,b}	786,89 ± 6,81 ^b
K rheo2 (x10 ⁻⁴ Pa.s ²)	60,39 ± 2,29 ^a	57,47 ± 4,01 ^a	55,84 ± 1,83 ^a	59,65 ± 4,21 ^a	62,96 ± 0,06 ^a
R ²	0,999	0,998	0,998	0,999	0,999
Tercera parte de la curva					
λ2 (min)	9,21 ± 0,03 ^a	9,42 ± 0,07 ^b	9,33 ± 0,04 ^{a,b}	9,33 ± 0,01 ^{a,b}	9,39 ± 0,02 ^b
μ2 (mPa.s/min)	525,94 ± 0,27 ^a	519,93 ± 6,09 ^a	535,75 ± 18,76 ^a	554,27 ± 24,94 ^a	534,32 ± 23,43 ^a
K rheo3 (x10 ⁻⁴ Pa.s ²)	106,08 ± 1,39 ^a	92,89 ± 0,90 ^{b,c}	88,37 ± 0,39 ^c	96,09 ± 1,50 ^d	90,99 ± 0,87 ^{b,c}
R ²	0,997	0,998	0,998	0,999	0,998

Donde: R, tiempo estimado para alcanzar el 50% de la viscosidad máxima; S, tasa de hinchamiento del almidón; λ1, tiempo de retardo la degradación de los almidones (min); μ1, tasa máxima de degradación de los almidones; λ2, tiempo de retardo en la retrogradación de los almidones (min); μ2, tasa máxima de retrogradación de los almidones; índices de consistencia reomaláxico durante la gelatinización (K rheo1), la descomposición (K rheo2) y la retrogradación (K rheo3). Los datos se presentan como media ± D.S (n=3). Letras diferentes en una misma fila indican diferencias significativas (p<0,05).

La tasa de hinchamiento de los almidones (parámetro S) en los batidos con okaras de tarwi (OK y OKS) disminuyó entre 8 % a 16 %, respecto al control. Este resultado se asoció con una reducción equivalente (8 – 13 %) observada en la viscosidad pico de los batidos con okaras de tarwi (OK y OKS). Ciertamente, una menor tasa de hinchamiento corresponde a un menor nivel de viscosidad pico alcanzado por los almidones presentes. Los valores del parámetro S en este estudio resultaron menores frente a los reportados en la literatura para matrices a base almidón de papa y harinas de granos andinos con goma xantana (11,92 - 35,29) (Vidaurre et al., 2023). Respecto al índice de consistencia reomaláxico durante la gelatinización (K_{rheo1}), solo se presentó diferencia significativa con el batido OKS5 ($p < 0,05$), el cual además alcanzó el menor valor. La baja consistencia de la formulación OKS5 durante la gelatinización se explica a través de la interferencia causada por la significativa presencia de fibras en la capacidad de hinchamiento de los gránulos de almidón en esta etapa (Lian et al., 2020).

La segunda parte de la curva hace referencia a la descomposición del almidón gelatinizado. En esta etapa, un mayor tiempo de retardo (λ_1) se asocia con una mayor estabilidad del sistema (Vidaurre-Ruiz et al., 2024). No hubo diferencias significativas en este parámetro entre todos los batidos ($p > 0,05$). Respecto a la tasa máxima de ruptura de los almidones (μ_{max1}), los batidos OK5 y OKS3 presentaron los valores más parecidos al control ($p > 0,05$). Una misma tendencia también se expresó en las viscosidades de descomposición para los mismos batidos (OK5 y OKS3), cuyos valores no mostraron diferencias significativas frente al control (Tabla 9). Estos resultados sugirieron que los almidones gelatinizados en OK5 y OKS3 se descomponen gradualmente a una velocidad que les permite conservar su viscosidad en mejor medida al final del proceso de ruptura. Con relación al índice de consistencia reomaláxica alcanzado durante esta etapa (K_{rheo2}), no se observó cambios significativos entre los batidos ($p > 0,05$), es decir, los batidos con okaras de tarwi, incluso en ausencia de hidocoloide (goma xantana), presentaron cierto grado de estabilidad para mantener en lo posible su consistencia al final del proceso de descomposición (K_{rheo2}).

La tercera parte de la curva describe la retrogradación del almidón también a través de los parámetros del tiempo de retardo (λ_2) y la tasa máxima (μ_{max2}) exhibida en este proceso. La formulación control sostuvo el menor λ_2 , el cual se prolongó estrechamente hasta en un 2 % en los batidos con okaras de tarwi (OK y OKS). En contraste, los valores de μ_{max2} no

presentó diferencias significativas entre los batidos ($p > 0,05$). Pese a las ligeras modificaciones en los parámetros cinéticos λ_2 y μ_{max2} , el índice de consistencia reomaláxica durante la retrogradación (K_{rheo3}) evidenció diferencias relevantes entre cada batido. La consistencia en esta etapa disminuyó en los batidos con okaras de tarwi (OK y OKS) entre 9 % a 17 %, donde OKS3 conservó el valor más alto. En general, los batidos con okaras de tarwi sonicadas (OKS3 y OKS5) tuvieron una mejor consistencia tras la retrogradación (K_{rheo3}) que sus respectivos análogos (OK3 y OK5).

La Figura 11 (a, b y c) muestra las curvas promedio de las repeticiones realizadas para cada uno de los 5 tratamientos evaluados en el análisis de viscosidad. A partir de ellas, se puede observar que los batidos con adición de okara de tarwi sonicada (OKS3 y OKS5) exhibieron perfiles de viscosidad más semejantes al control con respecto a sus batidos análogos (OK3 y OK5) (Figura 11a y 11b). Además, las diferencias entre los perfiles de viscosidad e los batidos OKS3 y OKS5 se encontraron sustancialmente en la sección I correspondiente a la gelatinización de los almidones (Figura 11c).

4.3.3. PERFIL DE TEXTURA

Las propiedades texturales de las masas son indicadores del comportamiento de las masas durante su manipulación (Burbano et al., 2022); por lo tanto, se encuentran estrechamente relacionadas con la calidad física de los panes sin gluten (Encina-Zelada et al., 2019). Las propiedades texturales de los batidos analizados mediante el método de *Back extrusión* se reportan en la Tabla 11.

Tabla 11: Propiedades texturales de los batidos de pan libre de gluten

Formulación	Firmeza (N)	Consistencia (N.s)	Cohesividad (N)	Índ. Viscosidad (N.s)
Control	5,16 ± 0,11 ^b	155,61 ± 4,25 ^b	4,15 ± 0,03 ^a	103,34 ± 2,60 ^a
OK3	1,79 ± 0,08 ^d	56,05 ± 3,25 ^d	1,30 ± 0,05 ^c	35,84 ± 2,22 ^d
OK5	5,27 ± 0,19 ^b	154,95 ± 2,41 ^b	4,14 ± 0,04 ^a	96,45 ± 1,56 ^b
OKS3	2,82 ± 0,12 ^c	97,07 ± 2,41 ^c	2,02 ± 0,11 ^b	51,01 ± 1,79 ^c
OKS5	9,03 ± 0,29 ^a	237,71 ± 7,22 ^a	n.d.	n.d.

Donde: n.d., no determinado. Los datos se presentan como media ± D.S (n=5). Letras diferentes en una misma columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

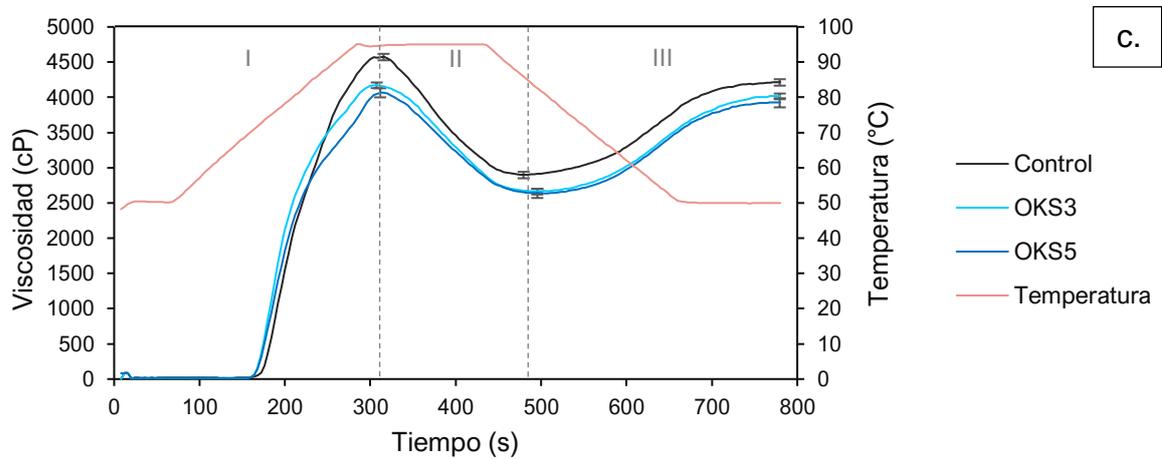
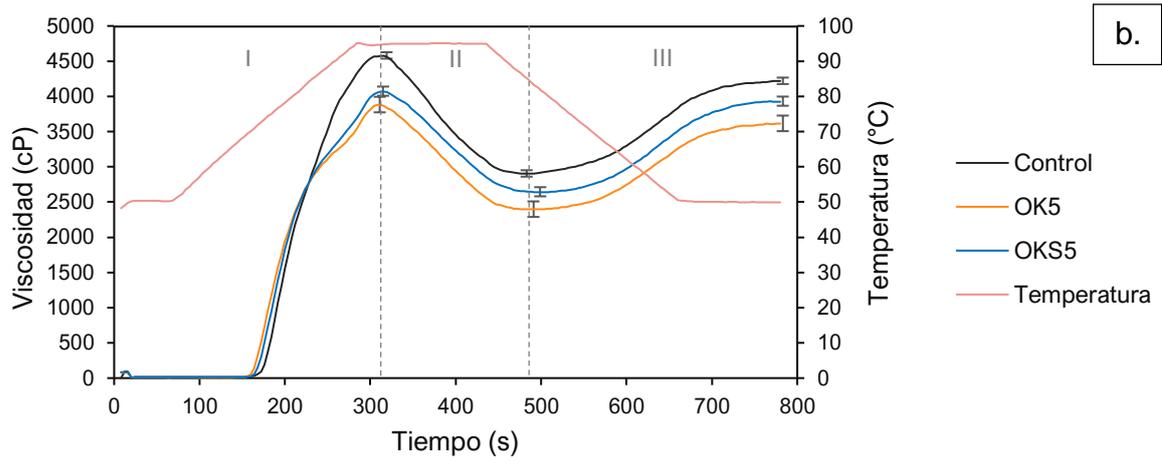
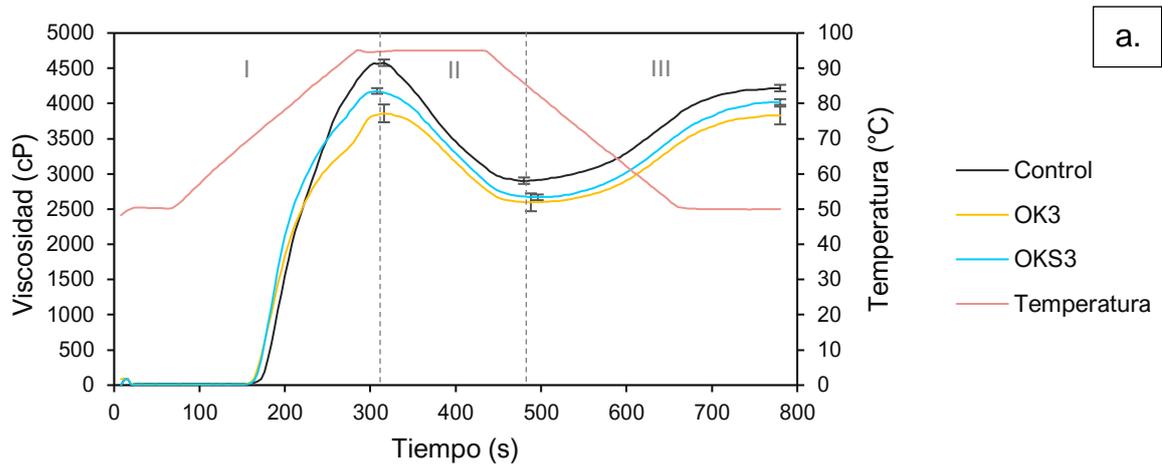


Figura 11: Perfiles de viscosidad de las formulaciones de pan libre de gluten

a) Formulaciones con OK y OKS al 3%, b) Formulaciones con OK y OKS al 5%, c) Formulaciones con OKS al 3% y 5%.

La firmeza de los batidos osciló entre 1,79 N y 9,73 N. En la literatura, también se ha encontrado amplios rangos de variación de firmeza según la composición de las formulaciones. Batidos a base almidón de papa con sustitución por harina de quinua y harina de tarwi y goma xantana (0,5 %) sostuvieron firmezas entre 2,07 N y 29,63 N (Vidaurre-Ruiz et al., 2021). De igual manera, batidos a base de harina de arroz (50 %), harina de maíz (30 %) y harina de quinua (20 %) con diferentes niveles de goma xantana (1,5 - 3,5 %) sostuvieron firmezas entre 5,52 N y 14,06 N (Encina-Zelada et al., 2019). De estas investigaciones, se observó que los aumentos en el contenido de ingredientes ricos en proteínas o goma xantana, componentes con buenas propiedades de absorción de agua, condujeron al aumento de la fuerza máxima en la curva de *Back extrusión*. Por ello, se indujo que OKS y su alta capacidad de absorción de agua incrementó la firmeza de los batidos en mayor medida en comparación aquellos que incluían OK a un mismo nivel de incorporación.

Los batidos con el menor nivel de incorporación de okara de tarwi (OK3 y OKS3) exhibieron menor firmeza que el control. Una misma tendencia se observó para los índices de consistencia de estos batidos (OK3 y OKS3). Al respecto, Burbano et al. (2022) señalaron que los batidos con baja consistencia son capaces de crecer rápidamente, perdiendo burbujas de aire lo que da lugar a horneados de bajo volumen; en contraste, los batidos con una consistencia muy alta limitan la expansión de la pieza, lo que lleva a menores volúmenes. Esta reflexión llevó a los autores a sostener que existir una consistencia óptima para lograr horneados con gran volumen.

En referencia a lo anteriormente expuesto, la alta consistencia del batido OKS5 ($237,71 \pm 7,22$ N) no permitió que la muestra complete la prueba de una sola compresión antes de la aparición de un punto fractura; por lo tanto, no se registraron valores de cohesividad e índice de viscosidad para este tratamiento. En los batidos OK3 y OKS3, tanto la cohesividad como el índice de viscosidad experimentaron una disminución significativa (>50 %) respecto al control. Finalmente, en base los resultados obtenidos, se afirma que el batido OK5 fue aquel que presentó un perfil de textura más semejante al control. El efecto conjunto de las propiedades de los componentes mayoritarios en la okara control (proteínas, carbohidratos y fibras) y a un determinado nivel (5 %) permitió sostener características texturales balanceadas para su posterior manipulación.

4.4. CARACTERIZACIÓN DE LOS PANES LIBRES DE GLUTEN

4.4.1. ANÁLISIS FÍSICO

Los resultados de su caracterización física de los panes libres de gluten correspondientes a los tratamientos evaluados se reportan en la Tabla 12. Cabe mencionar que, el aspecto general de los panes referidos se observa en el Anexo 6.

Tabla 12: Caracterización física de los panes libres de gluten

Formulación	Volumen específico (mL/g)	Pérdida por horneado (%)	Aw
Control	1,89 ± 0,05 ^a	16,44 ± 0,29 ^a	0,9706 ± 0,0007 ^{a,c}
OK3	1,79 ± 0,02 ^b	17,32 ± 0,37 ^b	0,9693 ± 0,0007 ^{a,b}
OK5	1,82 ± 0,02 ^{a,b}	18,27 ± 0,17 ^c	0,9680 ± 0,0005 ^b
OXS3	1,83 ± 0,02 ^{a,b}	17,52 ± 0,41 ^b	0,9683 ± 0,0003 ^b
OXS5	1,66 ± 0,06 ^c	17,26 ± 0,38 ^b	0,9712 ± 0,0006 ^c

Los datos se presentan como media ± D.S (n=3). Letras diferentes en una misma columna indican diferencias significativas (p<0,05).

Un atributo de calidad determinante en la aceptabilidad de los panes libres de gluten por parte de los consumidores es el volumen específico (Ammar et al., 2022). Asimismo, desde un enfoque de rendimiento en producción, también es deseable una elevada relación de volumen por peso (Encina-Zelada et al., 2019). El volumen específico de los panes osciló entre 1,66 mL/g a 1,89 mL/g, encontrándose dentro del rango común en panes libres de gluten diversos de 1,31 mL/g a 2,92 mL/g (Repo-Carrasco-Valencia y Vidaurre-Ruiz, 2022). En el pan control, la inclusión de goma xantana fortaleció las propiedades viscoelásticas del batido y evitó el escape del gas durante la fermentación y horneado, llevándolo a exhibir el volumen más alto.

El volumen específico de los tratamientos OK5 y OXS3 no mostró diferencias significativas en comparación con el control (p>0,05). Moscoso Ospina et al. (2023) también demostraron un impacto positivo sobre este atributo con la adición de okaras de soya nativa y sonicada al 2 % y 3 % en panes libres de gluten. Los autores atribuyeron este resultado al aporte de proteínas y fibras a través de la okaras de soya. La incorporación de fibras en panes libres de gluten ha evidenciado diversos efectos respecto al volumen específicos. Estos efectos se

encuentran altamente influenciado por la cantidad y el tipo de fibra agregada; así como, el volumen de agua (Bird et al., 2017; Chockchaisawasdee et al., 2023; Hryhorenko et al., 2023). Las fibras solubles son capaces de crear una red que estabiliza y retiene el gas producido, mientras que, las fibras insolubles promueven puntos de éxtasis que hacen que el gas se escape y conduzcan al colapso estructural (Chockchaisawasdee et al., 2023). En las okaras de tarwi, se asume que las fibras de su composición son mayoritariamente del tipo insoluble, tal como se presenta en la matriz de origen (harina de tarwi) (Repo-Carrasco-Valencia y Vidaurre-Ruiz, 2022). La combinación de un alto contenido de proteínas ($42,71 \pm 0,80$ %) y un bajo contenido de fibra ($16,95 \pm 0,21$ %) en la composición de OK, le permitió sostener un buen desempeño en términos de volumen, siempre y cuando, el nivel de adición de fuera del 5% en la formulación. A un nivel más bajo (3%), el batido no presentó la consistencia suficiente para mantener el volumen al final del horneado. Una tendencia opuesta se evidenció en los panes con OKS. A mayor nivel de OKS menor volumen específico. Las propiedades hidratantes y de emulsión mejoradas en OKS hicieron que al menor nivel de ensayo (3%) se lograra un equilibrio adecuado para el desarrollo de matriz con buena capacidad para retener las burbujas de gas. El incremento de OKS en la matriz afectó esta capacidad debido a la competencia por el agua entre la fibra y las proteínas, reflejado finalmente en un menor volumen.

Los menores volúmenes también se asociaron con menores pérdidas por horneado, a excepción del control. Las pérdidas por horneado dependen principalmente del contenido de agua en la masa (Bird et al., 2017). En el pan control, la menor pérdida de peso correspondió con la presencia de goma xantana y su capacidad para sostener una red capaz de retener suficiente agua (Vidaurre-Ruiz et al., 2019). Por el contrario, en los tratamientos con okaras de tarwi (OK y OKS), las pérdidas de peso se incrementaron entre un 5 % a 11%.

En cuanto a la actividad de agua, todas las formulaciones se encontraron dentro del estrecho rango de 0,9680 a 0,9712, similar al de panes sin gluten con adición de okara de soya ($0,9715 - 0,9744$) (Moscoso-Ospina et al., 2023). En general, los panes libres de gluten suelen tener mayor actividad acuosa correspondiente a su mayor contenido en las formulaciones en comparación a los panes con gluten (Šmídová y Rysová, 2022). Sin embargo, durante su almacenamiento, este parámetro experimenta una reducción asociada a su vez con el incremento de dureza de la miga (Mir et al., 2016).

4.4.2. ESTRUCTURA ALVEOLAR DE LA MIGA

La estructura alveolar de la miga se caracterizó a través de tres parámetros comunes como la fracción vacía, el área celular media y la densidad celular. Los resultados de este análisis se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13: Caracterización de la estructura alveolar de la miga de los panes libres de gluten

Formulación	Fracción de vacío (%)	Densidad alveolar (alveolos/cm ²)	Área alveolar media (mm ²)
Control	26,18 ± 0,40 ^a	39,42 ± 1,13 ^b	0,67 ± 0,06 ^a
OK3	15,88 ± 0,63 ^c	49,92 ± 1,70 ^a	0,27 ± 0,06 ^c
OK5	22,99 ± 0,83 ^b	39,58 ± 2,81 ^b	0,63 ± 0,06 ^a
OXS3	23,58 ± 0,75 ^b	45,50 ± 1,39 ^a	0,53 ± 0,06 ^{a,b}
OXS5	16,49 ± 0,96 ^c	36,00 ± 2,46 ^b	0,47 ± 0,06 ^b

Los datos se presentan como media ± D.S (n=3). Letras diferentes en una misma columna indican diferencias significativas (p<0,05).

La fracción de vacío en la miga representa un valor estimado de la proporción de burbujas de gas en el área total de una rebanada de pan. Los resultados muestran que la fracción de vacío osciló en paralelo con el volumen específico de los panes. Las migas con mayor fracción de vacío correspondieron a los panes control (26,18 ± 0,40 %), seguido de OXS3 (23,58 ± 0,75%) y OK5 (22,99 ± 0,83 %). Moscoso-Ospina et al. (2023) reportaron mayores fracciones de vacío (41- 50 %) en migas de pan con okara de soya nativa y sonicada al 2 % y 3 %. Ante estos resultados, se hace referencia al efecto de la proporción de grasa en una formulación, debido a que este componente actúa como un lubricante para contrarrestar el efecto de las fibras y contribuir a la estabilidad de las células gaseosas (Vidaurre-Ruiz et al., 2021). El nivel de grasa incluido en las formulaciones con okara de soya fue mayor (en un 4 % aproximadamente) en comparación con el presente estudio.

Las migas de OK5 y OXS3, además de presentar entre las fracciones de vacío más altas, también exhibieron los tamaños promedio de alveolos más similares al control (p<0,05). Esto refleja la buena capacidad de extensibilidad de sus matrices para permitir el crecimiento

estable de las burbujas de gas. Por el contrario, la elevada consistencia del batido OKS5 debido a la significativa presencia de fibras condujo a una red rígida que impidió el crecimiento de los alveolos reflejado en una miga con bajo tamaño promedio celular ($0,47 \pm 0,06 \text{ mm}^2$). En el caso de la miga de OK3, su menor área alveolar promedio ($0,27 \pm 0,06 \text{ mm}^2$) se asoció con un mayor número de células de gas por unidad de área ($49,92 \pm 1,70$ alveolos/cm²). En resumen, las migas de OK5 y OKS3 alcanzaron los parámetros de estructura alveolar más semejantes al control, lo cual se observó en las imágenes binarias obtenidas del análisis (Figura 12).

4.4.3. COLOR DE CORTEZA Y MIGA

El color de la corteza de pan es resultado de las reacciones de Maillard y caramelización, que tienen lugar durante el horneado (Vela et al., 2023). La reacción de Maillard ocurre en presencia de un grupo amino libre y un grupo carbonilo (como el presente en los azúcares reductores); mientras que, la caramelización es resultado de la descomposición térmica de los azúcares (Correa et al., 2021). Los compuestos formados de estas reacciones no enzimáticas son los principales responsables de los atributos sensoriales en los productos horneados (Hryhorenko et al., 2023). La composición de la masa y las condiciones de horneado son factores modulares del nivel de expresión de estas reacciones y, por lo tanto, del color (Chockchaisawasdee et al., 2023).

La incorporación de okaras de tarwi (OK y OKS) afectó significativamente los parámetros de color en la corteza (Tabla 14). Las cortezas más oscuras y rojizas a la vez se mostraron en los panes OK5 y OKS5. Durante el horneado de los batidos correspondientes, el mayor contenido de proteínas y fibras conllevó a un incremento de los sustratos disponibles para llevar a cabo las reacciones de Maillard y caramelización, así como, una reducción del agua disponible para concentrar los compuestos reactantes (Vela et al., 2023). Además, cabe la posibilidad que las fibras en la okara de tarwi sonicada se hayan descompuesto en oligómeros más pequeños, los cuales favorecen la velocidad de estas reacciones tal como fue observado en el caso de fibras de cáscara de habas añadidas en panes libres de gluten (Chockchaisawasdee et al., 2023).

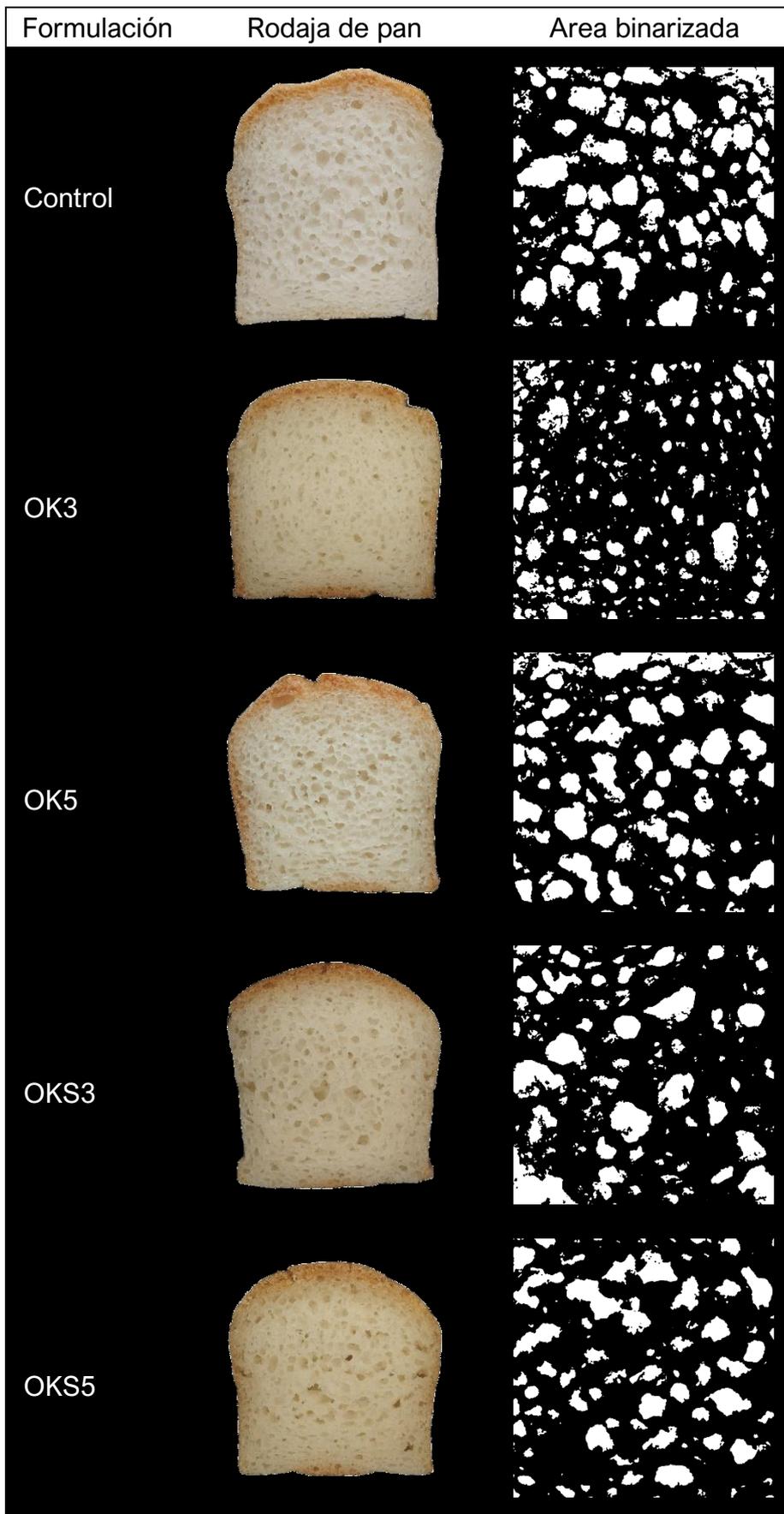


Figura 12: Distribución alveolar en la miga de panes libres de gluten

En el interior del pan, las reacciones de Maillard y caramelización tienden a ser más lentas en el interior del producto debido a una menor temperatura y mayor actividad de agua que en la superficie (Hryhorenko et al., 2023). Por lo tanto, el color de la miga se ve principalmente influenciado por los colores propios de los ingredientes utilizados. La miga del control presentó parámetros a^* y b^* cercanos a los reportados para harina de arroz (L^* 93,55, a^* 1,45 y b^* 4,63) (Ammar et al., 2022). En la mayoría de los casos, las fibras utilizadas, especialmente las de subproductos como cáscaras de habas, no tienen un color neutro y pueden contribuir al color de los productos horneados (Chockchaisawasdee et al., 2023). En este estudio, se sugiere que el postratamiento aplicado en las okaras húmedas (lavados en agua y remojos en isopropílico) habría reducido el contenido de compuestos pigmentantes otorgándoles una apariencia más clara, la cual fue ligeramente más pronunciada en OKS. Este efecto se asoció con un mayor oscurecimiento de la miga en los panes con OK, en comparación con la miga de los panes con OKS.

Tabla 14: Parámetros de color en la corteza y miga de panes libres de gluten

Formulación	a^*	b^*	IP	L
<i>Corteza</i>				
Control	8,54 ± 0,12 ^a	34,52 ± 0,32 ^{b,c}	84,58 ± 1,45 ^a	63,89 ± 0,30 ^a
OK3	11,38 ± 0,19 ^b	34,70 ± 0,32 ^c	105,23 ± 1,64 ^b	56,36 ± 0,44 ^b
OK5	13,06 ± 0,12 ^c	33,94 ± 0,19 ^a	112,61 ± 0,36 ^c	53,46 ± 0,17 ^d
OKS3	11,40 ± 0,17 ^b	34,05 ± 0,23 ^{a,b}	102,98 ± 1,36 ^b	59,29 ± 0,27 ^b
OKS5	13,20 ± 0,11 ^c	34,66 ± 0,17 ^c	110,16 ± 0,65 ^c	55,39 ± 0,24 ^c
<i>Miga</i>				
Control	1,45 ± 0,10 ^b	6,63 ± 0,27 ^a	8,78 ± 0,42 ^a	65,49 ± 0,29 ^a
OK3	1,39 ± 0,05 ^b	8,69 ± 0,33 ^b	12,93 ± 0,61 ^b	62,56 ± 0,12 ^b
OK5	1,37 ± 0,03 ^{a,b}	10,96 ± 0,15 ^c	18,09 ± 0,39 ^c	59,63 ± 0,28 ^d
OKS3	1,47 ± 0,04 ^b	8,31 ± 0,28 ^b	12,42 ± 0,55 ^b	61,29 ± 0,29 ^c
OKS5	1,24 ± 0,07 ^a	11,47 ± 0,32 ^c	18,42 ± 0,56 ^c	62,11 ± 0,13 ^b

Donde: IP, índice de pardeamiento; L: luminosidad. Los datos se presentan como media ± D.S (n=3). Letras diferentes en una misma columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Un parámetro importante para caracterizar los cambios generales en el color de productos alimenticios que contienen azúcar, como los productos de panificación, es el índice de pardeamiento (IP). Los resultados mostraron que la expresión del pardeamiento varió en

paralelo con la luminosidad tanto en la corteza como en la miga. El pardeamiento más pronunciado, tanto en la corteza como la miga, se presentó en los tratamientos OK5 y OKS5, lo cual coincide con los cambios en los parámetros de color anteriormente descritos.

Asimismo, el tiempo prolongado (50 min) y alta temperatura (200 °C) de horneado también se consideran haber influido en los altos valores alcanzados para este índice, especialmente en la corteza (Helou et al., 2016; Kinner et al., 2021). En general, se ha relacionado la presencia de tonos más intensos del color marrón en la corteza de pan con una mayor preferencia de los consumidores (Ammar et al., 2022).

4.4.4. ANÁLISIS DEL PERFIL DE TEXTURA

Los resultados del análisis de textura de miga de los panes evaluados se presentan en la Tabla 15. La dureza indica la máxima fuerza que se registra durante la primera compresión del ensayo, es decir, representa la fuerza de mordida. Se considera un atributo textural importante que, junto con la humedad de la miga, se relaciona con la frescura del producto. Entre los tratamientos evaluados, el control presentó la miga más suave ($4,64 \pm 0,31$ N); mientras que, OKS5 presentó la miga más dura ($10,13 \pm 0,27$ N). Además, se observó que los valores de dureza obtenidos variaron en paralelo con el volumen específico, a través de una relación inversa.

La dureza de la miga se incrementó significativamente con la adición de okaras de tarwi (OK y OKS) entre un 17 % a 118 %, respecto al control. Esta tendencia se acentuó en mayor medida con la presencia en particular de OKS. Moscoso-Ospina et al. (2023) demostraron un efecto contrario con la adición de okara de soya sonicada, la cual condujo a migas más suaves que la okara de soya control. Las diferencias encontradas pueden explicarse a través de la composición de las okaras empleadas y los niveles de incorporación. El tratamiento de ultrasonido afectó de distinta manera las proporciones de proteínas y fibras en la okara de soya sonicada (38 % proteína y 48 % fibra) y la okara de tarwi sonicada (31 % proteína y 33 % fibra). Además, los menores niveles de adición de okara de soya (al 2 y 3 %) no comprometieron mayores efectos deshidratación de la red de almidón para acelerar el endurecimiento. En otro estudio, la adición de okaras de soya (18 % proteína y 57 % fibra) y garbanzo (10 % proteína y 43 % fibra) al 4 % incrementó la dureza de la miga hasta en un

45 % (Lian et al., 2020). En consecuente, se observa que altos contenidos de fibra en una formulación de pan conduce a la formación de masas más compactas sostenida por una fuerte red, cuyas paredes rígidas rodean los alveolos de gas dificultando su crecimiento (Ostermann-Porcel et al., 2017; Vidaurre-Ruiz et al., 2021).

La miga de los panes con okaras de tarwi (OK y OKS) sostuvieron una cohesividad reducida en comparación al control, y sin mostrar diferencias significativas entre ellas (Tabla 15). La cohesividad caracteriza el grado en que un material puede deformarse antes de romperse, y se relaciona con la fuerza de los enlaces internos dentro de una matriz alimentaria (Hamdani et al., 2024). Las fibras, además de conducir al desarrollo de estructuras más densas, también son capaces de interferir con la habilidad de los almidones y las proteínas en formar una estructura más cohesiva (Chockchaisawasdee et al., 2023). Es deseable una miga con alta cohesividad puesto que logra formar un bolo, en lugar de desintegrarse durante la masticación; mientras que, una miga con baja cohesividad indica una mayor susceptibilidad del pan a fracturarse o desmoronarse (Encina-Zelada et al., 2019).

Tabla 15: Propiedades texturales de la miga de los panes libres de gluten

Formulación	Dureza (N)	Cohesividad	Elasticidad	Masticabilidad (N)
Control	4,64 ± 0,31 ^a	0,24 ± 0,01 ^a	0,90 ± 0,01 ^a	0,97 ± 0,03 ^b
OK3	5,41 ± 0,22 ^b	0,18 ± 0,01 ^b	0,87 ± 0,01 ^{a,b}	0,86 ± 0,05 ^c
OK5	5,83 ± 0,28 ^{b,c}	0,16 ± 0,01 ^b	0,84 ± 0,02 ^b	0,85 ± 0,04 ^c
OKS3	6,06 ± 0,13 ^c	0,18 ± 0,01 ^b	0,87 ± 0,01 ^{a,b}	0,88 ± 0,04 ^{b,c}
OKS5	10,13 ± 0,27 ^d	0,17 ± 0,01 ^b	0,85 ± 0,03 ^b	1,41 ± 0,05 ^a

Los datos se presentan como media ± D.S (n=3). Letras diferentes en una misma columna indican diferencias significativas (p<0,05).

Respecto a la elasticidad de la miga, los tratamientos OK3 y OKS3 no mostraron diferencia significativa respecto al control y en el caso de los otros tratamientos (OK5 y OKS5), solo sostuvieron una ligera disminución (~7 %). Los valores de elasticidad de las migas de pan con okaras de tarwi (0,84 – 0,87) se encontraron dentro de un rango muy similar (0,84 – 0,88) reportado para migas de panes a base de una mezcla de harinas de arroz, maíz y quinua (50:30:20) con distintos niveles goma xantana (1,5 - 3,5 %) (Encina-Zelada et al., 2019). Finalmente, la masticabilidad, obtenida como un producto de la dureza, cohesión y

elasticidad, representa la energía necesaria para masticar un alimento hasta convertirse en bolo. Se ha señalado que los alimentos con menor masticabilidad demuestran mejores propiedades de sabor y aceptabilidad (Hamdani et al., 2024). A excepción de OKS5, las migas de OK3, OK5 y OKS3 redujeron la masticabilidad del control en un 9 a 12 %. En su mayoría, la disminución en la cohesión y la elasticidad parece haber compensado el aumento de la dureza en estos tratamientos para reflejar un conjunto un efecto de mejora en la masticabilidad.

Finalmente, cabe mencionar que un resumen de los principales resultados obtenidos hasta etapa de la investigación fue presentado a través de la categoría póster en el Congreso Internacional de Cereales y Panes (Edición N° 17), el cual fue llevado a cabo en abril del presente año (Ver Anexo 7).

V. CONCLUSIONES

1. Se obtuvieron okaras de tarwi en su forma nativa (control) y modificada por ultrasonido de alta intensidad (sonicada). La aplicación de este tratamiento tuvo un impacto significativo sobre las características fisicoquímicas de la okara de tarwi. Los principales cambios se encontraron en los contenidos de proteínas (disminución del 11,44 %) y fibras (aumento del 16,11 %) a nivel de composición, y en la carga neta superficial (disminución de -37,30 a -29,40 mV). Estas modificaciones, a su vez, se asociaron con una mejora en las propiedades tecnofuncionales de la okara de tarwi (hasta en un 40 %), como la capacidad de absorción de agua y aceite, la capacidad de hinchamiento y las propiedades emulsionantes.
2. Las okaras de tarwi en los batidos de pan libre de gluten afectaron las propiedades texturales y de pasta en distinta manera según el tipo (control o sonicada) y el nivel de adición (3 o 5 % p/p). En términos de textura, los batidos con okara de tarwi control al 5 % (p/p) u okara de tarwi sonicada al 3 % (p/p) presentaron las consistencias más adecuadas para su manipulación (97,07 – 154,95 N.s). Por otro lado, con relación a las propiedades de pasta, los batidos con okara de tarwi sonicada, independientemente del nivel de adición, exhibieron los perfiles de viscosidad más comparables al batido control que fue elaborado con goma xantana.
3. Los panes de molde libres de gluten con okara de tarwi sostuvieron estructuras estables en la miga, con distinta capacidad de extensibilidad para retener las burbujas de gas producidas durante el horneado. Además, incrementaron los índices de pardeamiento, una cualidad comúnmente apreciada en este tipo de productos. Particularmente, los panes con okara de tarwi control al 5 % u okara de tarwi sonicada al 3 % (p/p) exhibieron los mejores atributos de calidad tecnológica a través de volúmenes específicos relativamente altos (1,82 – 1,83 mL/g), estructura

alveolar de la miga semejante al control (39,58 – 45,50 alveolos/cm²), y mejora en la masticabilidad de la miga (0,85 – 0,88 N). En este contexto, se apoya la hipótesis de que el ultrasonido favorece la eficiencia de la okara de tarwi como ingrediente mejorador de la calidad tecnológica en panes de molde libres de gluten, al lograr resultados satisfactorios con un menor nivel de adición respecto a su forma nativa (okara control).

VI. RECOMENDACIONES

- Profundizar la caracterización de los batidos con análisis como microcopia confocal de barrido láser a fin de lograr una mayor comprensión sobre las interacciones entre los principales componentes de las matrices (almidón, proteínas y fibras).
- Realizar un análisis proximal de los panes libres de gluten de los tratamientos OK3 y OKS5 para conocer el perfil nutricional de los mismos.
- Realizar un estudio de análisis sensorial de los panes libres de gluten de los tratamientos OK3 y OKS5 para evaluar la aceptabilidad del producto en personas con problemas de celiaquía e intolerancia al gluten.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Adal, E. (2024). Modification of faba bean protein isolate by high-intensity ultrasound treatment: screening of physicochemical, thermal, and structural properties. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 18(3), 2438–2449. <https://doi.org/10.1007/s11694-024-02379-z>
- Aguilar-Acosta, L. A., Serna-Saldivar, S. O., Rodríguez-Rodríguez, J., Escalante-Aburto, A., & Chuck-Hernández, C. (2020). Effect of ultrasound application on protein yield and fate of alkaloids during lupin alkaline extraction process. *Biomolecules*, 10(292). <https://doi.org/10.3390/biom10020292>
- Alamilla-Beltrán, L., Welti-Chanes, J., Chanona-Pérez, J., De, M., Perea-Flores, J., & Gutierrez-López, G. F. (2011). Emerging Technologies for Food Processing. In *Food Processing Handbook* (pp. 205–224).
- Ammar, I., Sebi, H., Aloui, T., Attia, H., Hadrich, B., & Felfoul, I. (2022). Optimization of a novel, gluten-free bread's formulation based on chickpea, carob and rice flours using response surface design. *Heliyon*, 8(1e12164). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12164>
- Ampofo, J. Ngadi, M. (2022). Ultrasound-assisted processing: Science, technology and challenges for the plant-based protein industry. *Ultrasonics Sonochemistry*, 84(105955). <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.105955>
- AOAC. (Association of Official Analytical Chemist). (2019). *Official Methods of Analysis* (21^{ed.}). Washington, United State

- Asghar, A., Afzaal, M., Saeed, F., Ahmed, A., Ateeq, H., Shah, Y. A., Islam, F., Hussain, M., Akram, N., & Shah, M. A. (2023). Valorization and food applications of okara (soybean residue): A concurrent review. *Food Science and Nutrition*, 11(7), 3631–3640. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3363>
- Aussanasuwannakul, A., Boonbumrung, S., Pantoa, T. (2023). Valorization of Soybean Residue (Okara) by Supercritical Carbon Dioxide Extraction: Compositional, Physicochemical, and Functional Properties of Oil and Defatted Powder. *Foods*, 12(14). <https://doi.org/10.3390/foods12142698>
- Aydar, E. F., Tutuncu, S., Ozcelik, B. (2020). Plant-based milk substitutes: Bioactive compounds, conventional and novel processes, bioavailability studies, and health effects. *Journal of Functional Foods*, 70(103975). <https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.103975>
- Badui, S. (2006). Lípidos. In *Química de los alimentos* (4th ed., pp. 245–300). Pearson Educacion.
- Bender, D. y Schönlechner, R. (2020). Innovative approaches towards improved gluten-free bread properties. *Journal of Cereal Science*, 91(102904). <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.102904>
- Bermudez-Aguirre, D. (2017). Sonochemistry of Foods. In *Ultrasound: Advances in Food Processing and Preservation* (pp. 131–143). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804581-7.00005-1>
- Berru, L., Glorio-Paulet, P., Basso, C., Scarafoni, A., Camarena, F., Hidalgo, A., & Brandolini, A. (2021). Chemical Composition, Tocopherol and Carotenoid Content of Seeds from Different Andean Lupin (*Lupinus mutabilis*) Ecotypes. *Plant Foods for Human Nutrition*, 76, 98–104. <https://doi.org/10.1007/s11130-021-00880-0/Published>
- Bird, L. G., Pilkington, C. L., Saputra, A., & Serventi, L. (2017). Products of chickpea processing as texture improvers in gluten-free bread. *Food Science and Technology International*, 23(8), 690–698. <https://doi.org/10.1177/1082013217717802>

- Bou, R., Navarro-Vozmediano, P., Domínguez, R., López-Gómez, M., Pinent, M., Ribas-Agustí, A., Benedito, J. J., Lorenzo, J. M., Terra, X., García-Pérez, J. V., Pateiro, M., Herrera-Cervera, J. A., & Jorba-Martín, R. (2022). Application of emerging technologies to obtain legume protein isolates with improved techno-functional properties and health effects. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(3), 2200–2232. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12936>
- Brandolini, A., Glorio-Paulet, P., Estivi, L., Locatelli, N., Cordova-Ramos, J. S., & Hidalgo, A. (2022). Tocopherols, carotenoids and phenolics changes during Andean lupin (*Lupinus mutabilis* Sweet) seeds processing. *Journal of Food Composition and Analysis*, 106(104335). <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104335>
- Breña Diaz, D. A. (2018). Obtención de un aislado proteico de torta de tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet) y evaluación de sus propiedades tecno-funcionales. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Briceño, L., Glorio-Paulet, P., Basso, C., Scarafoni, A., Camarena, F., Hidalgo, A., & Brandolini, A. (2021). Chemical Composition, Tocopherol and Carotenoid Content of Seeds from Different Andean Lupin (*Lupinus mutabilis*) Ecotypes. *Plant Foods for Human Nutrition*, 76, 98–104.
- Burbano, J. J., Cabezas, D. M., & Correa, M. J. (2022). Effect of walnut flour addition on rheological, thermal and microstructural properties of a gluten free-batter. *LWT*, 154. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112819>
- Cabanillas, B. (2020). Gluten-related disorders: Celiac disease, wheat allergy, and nonceliac gluten sensitivity. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(15), 2606–2621. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1651689>
- Carvajal-Larenas, F. E., Linnemann, A. R., Nout, M. J. R., Koziol, M., & van Boekel, M. A. J. S. (2016). *Lupinus mutabilis*: Composition, Uses, Toxicology, and Debittering. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(9), 1454–1487. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.772089>

- Carvajal-Larenas, F. E., Nout, M. J. R., van Boekel, M. A. J. S., Koziol, M., & Linnemann, A. R. (2013). Modelling of the aqueous debittering process of *Lupinus mutabilis* Sweet. *LWT - Food Science and Technology*, 53(2), 507–516. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.03.017>
- Chavan, P., Sharma, P., Sharma, S. R., Mittal, T. C., & Jaiswal, A. K. (2022). Application of High-Intensity Ultrasound to Improve Food Processing Efficiency: A Review. *Foods*, 11(122). <https://doi.org/10.3390/foods11010122>
- Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A. G., Meullemiestre, A., Fabiano-Tixier, A. S., & Abert-Vian, M. (2017). Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 540–560. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.035>
- Chen, J., Chen, X., Zhou, G., & Xu, X. (2022). Ultrasound: A reliable method for regulating food component interactions in protein-based food matrices. *Trends in Food Science and Technology*, 128, 316–330. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.08.014>
- Chirinos-Arias, M. C. (2015). Tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet) una planta con potencial nutritivo y medicinal. *Revista Bio Ciencias*, 3(3), 163–172. <https://doi.org/10.15741/revbio.03.03.03>
- Chockchaisawasdee, S., Mendoza, M. C., Beecroft, C. A., Kerr, A. C., Stathopoulos, C. E., & Fiore, A. (2023). Development of a gluten free bread enriched with faba bean husk as a fibre supplement. *LWT - Food Science and Technology*, 173(114362). <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114362>
- Cisneros, F. H., Talavera, M. J., & Cisneros-Zevallos, L. (2022). The Impact of Andean Biodiversity on a Healthy Diet and Assessment of the Anti-Inflammatory Potential of the Peruvian Cuisine. In *Native Crops in Latin America: Biochemical, Processing, and Nutraceutical Aspects* (pp. 115–159). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003087618-5>

- Colletti, A., Attrovio, A., Boffa, L., Mantegna, S., & Cravotto, G. (2020). Valorisation of by-products from soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) processing. *Molecules*, 25(9). <https://doi.org/10.3390/molecules25092129>
- Córdova-Ramos, J. S., Glorio-Paulet, P., Camarena, F., Brandolini, A., & Hidalgo, A. (2020). Andean lupin (*Lupinus mutabilis* Sweet): Processing effects on chemical composition, heat damage, and in vitro protein digestibility. *Cereal Chemistry*, 97(4), 827–835. <https://doi.org/10.1002/cche.10303>
- Correa, M. J., Burbano Moreano, J. J., Guardianelli, L. M., Weisstaub, A. R., Zuleta, A., & Salinas, M. V. (2021). Garlic: A natural bread improver for wheat bread with a high level of resistant starch. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(6). <https://doi.org/10.1111/jfpp.15519>
- Costa, J. M., & Neto, A. F. de. (2020). Ultrasound-assisted electrodeposition and synthesis of alloys and composite materials: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 68(105193). <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105193>
- Czubinski, J., Grygier, A., & Siger, A. (2021). *Lupinus mutabilis* seed composition and its comparison with other lupin species. *Journal of Food Composition and Analysis*, 99(103875). <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.103875>
- Das, R. S., Tiwari, B. K., Chemat, F., & Garcia-Vaquero, M. (2022). Impact of ultrasound processing on alternative protein systems: Protein extraction, nutritional effects and associated challenges. *Ultrasonics Sonochemistry*, 91(106234). <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106234>
- de Paiva Gouvêa, L., Caldeira, R., de Lima Azevedo, T., Galdeano, M. C., Felberg, I., Lima, J. R., & Grassi Mellinger, C. (2023). Physical and techno-functional properties of a common bean protein concentrate compared to commercial legume ingredients for the plant-based market. *Food Hydrocolloids*, 137(108351). <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108351>

- Di Liberto, D., Carlisi, D., D'anneo, A., Emanuele, S., Giuliano, M., De Blasio, A., Calvaruso, G., & Lauricella, M. (2020). Gluten free diet for the management of non celiac diseases: The two sides of the coin. *Healthcare (Switzerland)*, 8(4). <https://doi.org/10.3390/healthcare8040400>
- Diniz, R. C., Coura, F. M., & Rodrigues, J. F. (2021). Effect of different gluten-free flours on the sensory characteristics of a vegan alfajor: Vegan gluten-free Alfajor development. *Food Science and Technology International*, 27(2), 145–150. <https://doi.org/10.1177/1082013220939792>
- Encina-Zelada, C. R., Cadavez, V., Monteiro, F., Teixeira, J. A., & 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. <https://doi.org/10.1007/s00217-018-3176-3>
- Fan, X., Chang, H., Lin, Y., Zhao, X., Zhang, A., Li, S., Feng, Z., & Chen, X. (2020). Effects of ultrasound-assisted enzyme hydrolysis on the microstructure and physicochemical properties of okara fibers. *Ultrasonics Sonochemistry*, 69. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105247>
- Fayaz, G., Plazzotta, S., Calligaris, S., Manzocco, L., & Nicoli, M. C. (2019). Impact of high pressure homogenization on physical properties, extraction yield and biopolymer structure of soybean okara. *LWT - Food Science and Technology*, 113(108324). <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108324>
- Galvão, A. M. M. T., Rasera, M. L., de F Furtado, G., Karatay, G., Tavares, G., & Hubinger, M. (2024). Lentil protein isolate (*Lens culinaris*) subjected to ultrasound treatment combined or not with heat-treatment: structural characterization and ability to stabilize high internal phase emulsions. *Food Research International*, 183. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114212>
- Guimarães, R. M., Silva, T. E., Lemes, A. C., Boldrin, M. C. F., da Silva, M. A. P., Silva, F. G., & Egea, M. B. (2018). Okara: A soybean by-product as an alternative to enrich

vegetable paste. *LWT - Food Science and Technology*, 92, 593–599.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.02.058>

Gulisano, A., Alves, S., Martins, J. N., & Trindade, L. M. (2019). Genetics and Breeding of *Lupinus mutabilis*: An Emerging Protein Crop. *Frontiers in Plant Science*, 10(1385).
<https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01385>

Gutöhrlein, F., Morales-Medina, R., Boje, A. L., Drusch, S., & Schalow, S. (2020). Modulating the hydration properties of pea hull fibre by its composition as affected by mechanical processing and various extraction procedures. *Food Hydrocolloids*, 107(105958). <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105958>

Hamdani, A. M., Wani, I. A., Bhat, N. A., Maqbool, K., & Mir, S. A. (2024). Effect of apricot, guar and locust bean gum hydrocolloids on pasting, antioxidant, rheology, thermal and sensory properties of gluten-free breads. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 31(100397). <https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2023.100397>

Hamed, H. A., Kobacy, W., Mahmoud, E. A., & El-Geddawy, M. M. A. (2024). Looking for a Novel Vegan Protein Supplement from Faba Bean, Lupine, and Soybean: a Dietary and Industrial Standpoint. *Plant Foods for Human Nutrition*, 79(1), 90–97.
<https://doi.org/10.1007/s11130-023-01125-y>

Helou, C., Jacolot, P., Niquet-Léridon, C., Gadonna-Widehem, P., & Tessier, F. J. (2016). Maillard reaction products in bread: A novel semi-quantitative method for evaluating melanoidins in bread. *Food Chemistry*, 190, 904–911.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.06.032>

Helstad, A., Marefati, A., Ahlström, C., Rayner, M., Purhagen, J., & Östbring, K. (2023). High-Pressure Pasteurization of Soy Okara. *Foods*, 12(3736).
<https://doi.org/10.3390/foods12203736>

Hryhorenko, N., Krupa-Kozak, U., Bączek, N., Rudnicka, B., & Wróblewska, B. (2023). Gluten-free bread enriched with whole-grain red sorghum flour gains favourable

technological and functional properties and consumers acceptance. *Journal of Cereal Science*, 110(103646). <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2023.103646>

Huamaní-Perales, C., Vidaurre-Ruiz, J., Salas-Valerio, W., Cabezas, D. M., & Repo-Carrasco-Valencia, R. (2024). A review of techno-functional properties of legume proteins and their potential for development of new products. *European Food Research and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00217-024-04536-6>

Jacobsen, S.-E., & Mujica, A. (2006). El tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet.) y sus parientes silvestres. *Botánica Económica de Los Andes Centrales*, 458–482.

Jambrak, A. R., & Herceg, Z. (2015). 21 Application of Ultrasonics in Food Preservation and Processing.

Kajzer, M., & Diowksz, A. (2021). The clean label concept: Novel approaches in gluten-free breadmaking. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 13). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/app11136129>

Keskin, S. O., Ali, T. M., Ahmed, J., Shaikh, M., Siddiq, M., & Uebersax, M. A. (2022). Physico-chemical and functional properties of legume protein, starch, and dietary fiber—A review. *Legume Science*, 4(1). <https://doi.org/10.1002/leg3.117>

Kinner, M., Rüegg, R., Weber, C. A., Buchli, J., Durrer, L., & Müller, N. (2021). Impact of selected baking and vacuum cooling parameters on the quality of toast bread. *Journal of Food Science and Technology*, 58(12), 4578–4586. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04945-x>

Kumar, G., Le, D. T., Durco, J., Cianciosi, S., Devkota, L., & Dhital, S. (2023). Innovations in legume processing: Ultrasound-based strategies for enhanced legume hydration and processing. *Trends in Food Science and Technology*, 139(104122). <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104122>

Laqui-Vilca, C., Aguilar-Tuesta, S., Mamani-Navarro, W., Montaña-Bustamante, J., & Condezo-Hoyos, L. (2018). Ultrasound-assisted optimal extraction and thermal

stability of betalains from colored quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) hulls. *Industrial Crops and Products*, 111, 606–614. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.034>

Lian, H., Luo, K., Gong, Y., Zhang, S., & Serventi, L. (2020). Okara flours from chickpea and soy are thickeners: increased dough viscosity and moisture content in gluten-free bread. *International Journal of Food Science and Technology*, 55(2), 805–812. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14332>

Liu, Y., Yi, S., Ye, T., Leng, Y., Alomgir Hossen, M., Sameen, D. E., Dai, J., Li, S., & Qin, W. (2021). Effects of ultrasonic treatment and homogenization on physicochemical properties of okara dietary fibers for 3D printing cookies. *Ultrasonics Sonochemistry*, 77. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105693>

Lo, B., Kasapis, S., Farahnaky, A. (2022). Effect of low frequency ultrasound on the functional characteristics of isolated lupin protein. *Food Hydrocolloids*, 124 (107345). <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107345>

Lopes, M., Pierrepont, C., Duarte, C. M., Filipe, A., Medronho, B., & Sousa, I. (2020). Legume beverages from chickpea and lupin, as new milk alternatives. *Foods*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/foods9101458>

Loushigam, G., & Shanmugam, A. (2023). Modifications to functional and biological properties of proteins of cowpea pulse crop by ultrasound-assisted extraction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 97(106448). <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106448>

Luna-Mercado, G. I., & Repo-Carrasco-Valencia, R. (2021). Gluten-free bread applications: Thermo-mechanical and techno-functional characterization of Kañiwa flour. *Cereal Chemistry*, 98(3), 474–481. <https://doi.org/10.1002/cche.10386>

Martínez-Velasco, A., Lobato-Calleros, C., Hernández-Rodríguez, B. E., Román-Guerrero, A., Alvarez-Ramirez, J., & Vernon-Carter, E. J. (2018). High intensity ultrasound treatment of faba bean (*Vicia faba* L.) protein: Effect on surface properties, foaming

ability and structural changes. *Ultrasonics Sonochemistry*, 44, 97–105.
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.02.007>

Meena, L., Gowda, N. N., Sunil, C. K., Rawson, A., & Janghu, S. (2024). Effect of ultrasonication on food bioactive compounds and their bio-accessibility: A review. *Journal of Food Composition and Analysis*, 126(105899).
<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105899>

Mir, S. A., Shah, M. A., Naik, H. R., & Zargar, I. A. (2016). Influence of hydrocolloids on dough handling and technological properties of gluten-free breads. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 51, pp. 49–57). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.03.005>

Miranda, C. G., Speranza, P., Kurozawa, L. E., & Kawazoe Sato, A. C. (2022). Lentil protein: impact of different extraction methods on structural and functional properties. *Heliyon*, 8(11). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11775>

Moscoso Ospina, Y. A., Lionello, M. E., Garófalo, L., Burbano, J. J., Cabezas, D. M., & Correa, M. J. (2023). Effect of ultrasonic treatment on soybean okara to be used as a gluten-free bread improver. *International Journal of Food Science and Technology*, 58(7), 3827–3837. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16484>

Moscoso Ospina, Y. A., Porfiri, M. C., & Cabezas, D. M. (2022). Soybean okara: Effect of ultrasound on compositional and emulsifying properties. *International Journal of Food Science and Technology*, 57(7), 3914–3923. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15470>

Ostermann-Porcel, M. V., Rinaldoni, A. N., Rodriguez-Furlán, L. T., & Campderrós, M. E. (2017). Quality assessment of dried okara as a source of production of gluten-free flour. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(9), 2934–2941.
<https://doi.org/10.1002/jsfa.8131>

Palabiyik, İ., Toker, O. S., Karaman, S., & Yildiz, Ö. (2017). A modeling approach in the interpretation of starch pasting properties. *Journal of Cereal Science*, 74, 272–278.
<https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.02.008>

- Papagianni, E., Kotsiou, K., Matsakidou, A., Biliaderis, C. G., & Lazaridou, A. (2024). Development of “clean label” gluten-free breads fortified with flaxseed slurry and sesame cake: Implications on batter rheology, bread quality and shelf life. *Food Hydrocolloids*, 150. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.109734>
- Pascual-Chagman, G., Santa-Cruz-Olivos, J., Hidalgo, A., Benavente, F., Pérez-Camino, M. C., Sotelo-Mendez, A., Paucar-Menacho, L. M., & Encina-Zelada, C. R. (2021a). Lupinus mutabilis oil obtained by expeller press: Yield, physicochemical characterization, antioxidant capacity, fatty acids and oxidative stability analyses. *Scientia Agropecuaria*, 12(2), 219–227. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.025>
- Pascual-Chagman, G., Santa-Cruz-Olivos, J., Hidalgo, A., Benavente, F., Pérez-Camino, M., Sotelo-Mendez, A., Paucar-Menacho, L. M., & Encina-Zelada, C. R. (2021b). Lupinus mutabilis oil obtained by expeller press: Yield, physicochemical characterization, antioxidant capacity, fatty acids and oxidative stability analyses. *Scientia Agropecuaria*, 12(2), 219–227. <https://doi.org/10.17268/SCI.AGROPECU.2021.025>
- Pearce, K. & Kinsella, J. (1978). Emulsifying properties of proteins: evaluation of a turbidimetric technique. *J. Agric. Food Chem.* 26(3), 716–723. <https://doi.org/10.1021/jf60217a041>
- Pérez, A. R., & Escalante, K. E. (2024). The Evolution of Sonochemistry: From the Beginnings to Novel Applications. *ChemPlusChem*, 1–23. <https://doi.org/10.1002/cplu.202300660>
- Porfiri, M. C., Vaccaro, J., Stortz, C. A., Navarro, D. A., Wagner, J. R., & Cabezas, D. M. (2017). Insoluble soybean polysaccharides: Obtaining and evaluation of their O/W emulsifying properties. *Food Hydrocolloids*, 73, 262–273. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.06.034>
- Ragonese, V. E., Moscoso Ospina, Y. A., Cabezas, D. M., & Kakisu, E. J. (2024). Effect of ultrasound treatment on the composition and emulsifying properties of quinoa okara.

International Journal of Food Science and Technology, 59(3), 1481–1489.
<https://doi.org/10.1111/ijfs.16896>

Repo-Carrasco-Valencia, R., & Vidaurre-Ruiz, J. M. (2022). Quinoa, Kañiwa, Amaranth, and Lupin as Ingredients in Gluten-Free Baking. In *Native Crops in Latin America Biochemical, Processing, and Nutraceutical Aspects* (pp. 35–59). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781003087618-2>

Rybicka, I., Doba, K., & Bińczak, O. (2019). Improving the sensory and nutritional value of gluten-free bread. *International Journal of Food Science and Technology*, 54(9), 2661–2667. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14190>

Salazar, D., Arancibia, M., Ocaña, I., Rodríguez-Maecker, R., Bedón, M., López-Caballero, M. E., & Montero, M. P. (2021). Characterization and technological potential of underutilized ancestral andean crop flours from ecuador. *Agronomy*, 11(1693).
<https://doi.org/10.3390/agronomy11091693>

Schönlechner, H., Gross, R., Cremer, H. D., & Elmadfa, I. (1982). Composition and Protein Quality of *Lupinus Mutabilis*. *The Journal of Nutrition*, 112(1), 70–76.
<https://doi.org/10.1093/jn/112.1.70>

Siminiuc, R., & Turcanu, D. (2023). Technological approaches applied in the design of gluten-free bakery products. *Czech Journal of Food Sciences*, 41(3), 155–172.
<https://doi.org/10.17221/180/2022-CJFS>

Šmídová, Z., & Rysová, J. (2022). Gluten-Free Bread and Bakery Products Technology. *Foods*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/foods11030480>

Suca, G. R., & Suca, C. A. (2015). Potencial del tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet) como futura fuente proteínica y avances de su desarrollo agroindustrial. *Rev. Per. Quím. Ing. Quím*, 18(2), 55.

- Tuly, J. A., & Ma, H. (2024). Bioconversion of food industrial waste okara by microbial fermentation: Scope of omics study and possibility. *Trends in Food Science and Technology*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104391>
- Vela, A. J., Villanueva, M., & Ronda, F. (2023). Physical modification caused by acoustic cavitation improves rice flour bread-making performance. *LWT - Food Science and Technology*, 183(114950). <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114950>
- 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., Salas-Valerio, F., Schoenlechner, R., & Repo-Carrasco-Valencia, R. (2021). Rheological and textural properties of gluten-free doughs made from Andean grains. *International Journal of Food Science and Technology*, 56(1), 468–479. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14662>
- Vidaurre-Ruiz, J., Salas-Valerio, W., Briceño-Berrú, L., Baldeón, E. O., Repo-Carrasco-Valencia, R., & Correa, M. J. (2024). A proposal to model the pasting curve of gluten-free bakery formulations. *Journal of Food Process Engineering*, 47(1). <https://doi.org/10.1111/jfpe.14506>
- Villacrés, E., Cueva, P., Díaz, M., & Rosell, C. M. (2020). Replacing Wheat Flour with Debittered and Fermented Lupin: Effects on Bread's Physical and Nutritional Features. *Plant Foods for Human Nutrition*, 75(4), 569–575. <https://doi.org/10.1007/s11130-020-00844-w>
- Villacrés, E., Navarrete, M., Lucero, O., Espín, S., & Peralta, E. (2010). Evaluación del Rendimiento, Características Físico-Químicas y Nutraceuticas del Aceite de Chocho (*Lupinus mutabilis* sweet). *Revista Tecnológica ESPOL-RTE*, 23(2), 57–62.

- Vong, W. C., & Liu, S.-Q. (2016). Biovalorisation of okara (soybean residue) for food and nutrition. *Trends in Food Science and Technology*, 52, 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.04.011>
- Wang, F., Zhang, Y., Xu, L., & Ma, H. (2020). An efficient ultrasound-assisted extraction method of pea protein and its effect on protein functional properties and biological activities. *LWT - Food Science and Technology*, 127(109348). <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109348>
- Wang, M., Yang, S., Sun, N., Zhu, T., Lian, Z., Dai, S., Xu, J., Tong, X., Wang, H., & Jiang, L. (2024). Soybean isolate protein complexes with different concentrations of inulin by ultrasound treatment: Structural and functional properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 105. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.106864>
- Wang, S., Chelikani, V., & Serventi, L. (2018). Evaluation of chickpea as alternative to soy in plant-based beverages, fresh and fermented. *LWT - Food Science and Technology*, 97, 570–572. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.07.067>
- Waziroh, E., Schoenlechner, R., Jaeger, H., Brusadelli, G., & Bender, D. (2022). Understanding gluten-free bread ingredients during ohmic heating: function, effect and potential application for breadmaking. *European Food Research and Technology*, 248(4), 1021–1034. <https://doi.org/10.1007/s00217-021-03942-4>
- Weiss, J., Kristbergsson, K., & Kjartansson, G. T. (2011). Engineering food ingredients with high-intensity ultrasound. In *Food Engineering Series* (pp. 239–285). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7472-3_10
- William, D. A., Armel, A. A. J., Fabien, D. D. F., & Inocent, G. (2023). Effect of bleaching and fermentation on the physico-chemical, pasting properties and bread baking performance of various gluten free flour. *Measurement: Food*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.meafao.2022.100073>

- Yan, S., Xu, J., Zhang, S., & Li, Y. (2021). Effects of flexibility and surface hydrophobicity on emulsifying properties: Ultrasound-treated soybean protein isolate. *LWT - Food Science and Technology*, 142(110881). <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.110881>
- Yang, Y., Zhang, C., Ma, C. M., Hu, L. S., Bian, X., Wang, B., & Zhang, N. (2024). Impact of soybean protein isolate on gluten-free bread: a comprehensive study of physicochemical properties of gluten-free dough and bread matrix properties. *International Journal of Food Science and Technology*, 59(1), 251–264. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16799>
- Yu, Z., Gao, Y., Shang, Z., Ma, L., Xu, Y., Zhang, L., & Chen, Y. (2024). Structural and functional modification of miscellaneous beans protein by high-intensity ultrasound: Mechanism, processing, and new insights. *Food Hydrocolloids*, 151(109774). <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.109774>
- Zhang, B., Qiao, D., Zhao, S., Lin, Q., Wang, J., & Xie, F. (2021). Starch-based food matrices containing protein: Recent understanding of morphology, structure, and properties. *Trends in Food Science and Technology*, 114, 212–231. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.05.033>

VIII. ANEXOS

ANEXO 1: FLUJO GRÁFICO DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE OKARA DE TARWI HÚMEDA



1 Preparación de la disolución de la harina de tarwi



2 Alcalinización de la disolución de harina de tarwi



3 Homogeneización en caliente de la disolución alcalina



4 Centrifugación de disolución alcalina homogeneizada



5 Recuperación de la fracción insoluble (okara húmeda)

Figura 1: Flujo fotográfico de la recuperación de okara de tarwi húmeda

**ANEXO 2: RESUMEN DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LOS
TRATAMIENTOS DE OKARAS DE TARWI**

a. CONTENIDO DE PROTEÍNA

Análisis de varianza ANOVA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	196.883	1	196.883	421.35	0.0000
Intra grupos	1.86907	4	0.467267		
Total (Corr.)	198.752	5			

Pruebas de Múltiple Rangos

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
OKS	3	31.2633	A
OK	3	42.72	B

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
OK - OKS	*	11.4567	1.54963

* indica una diferencia significativa.

b. CONTENIDO DE FIBRA

Análisis de varianza ANOVA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	418.836	1	418.836	5022.02	0.0000
Intra grupos	0.3336	4	0.0834		
Total (Corr.)	419.17	5			

Pruebas de Múltiple Rangos

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
OKS	3	16.95	A
OK	3	33.66	B

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
OK - OKS	*	-16.71	0.654678

* indica una diferencia significativa.

c. POTENCIAL Z

Análisis de varianza ANOVA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	93.615	1	93.615	46.34	0.0024
Intra grupos	8.08	4	2.02		
Total (Corr.)	101.695	5			

Pruebas de Múltiple Rangos

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
OKS	3	-37.3	A
OK	3	-29.4	B

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
OK - OKS	*	-7.9	3.22196

* indica una diferencia significativa.

d. CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE AGUA

Análisis de varianza ANOVA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	1.42107	1	1.42107	1332.25	0.0000
Intra grupos	0.00426667	4	0.00106667		
Total (Corr.)	1.42533	5			

Pruebas de Múltiple Rangos

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
OKS	3	3.32	A
OK	3	4.29333	B

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
OK - OKS	*	-0.973333	0.0740388

* indica una diferencia significativa.

**ANEXO 3: RESUMEN DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LOS
TRATAMIENTOS DE PANES LIBRES DE GLUTEN EVALUADOS**

a. VOLUMEN ESPECÍFICO

Análisis de varianza ANOVA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.13528	4	0.03382	35.29	0.0000
Intra grupos	0.014375	15	0.000958333		
Total (Corr.)	0.149655	19			

Pruebas de Múltiple Rangos

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
OKS5	4	1.645	A
OK3	4	1.79	B
OK5	4	1.8275	BC
OKS3	4	1.83	BC
Control	4	1.89	C

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Control - OK3	*	0.1	0.0678344
Control - OK5		0.0625	0.0678344
Control - OKS3		0.06	0.0678344
Control - OKS5	*	0.245	0.0678344
OK3 - OK5		-0.0375	0.0678344
OK3 - OKS3		-0.04	0.0678344
OK3 - OKS5	*	0.145	0.0678344
OK5 - OKS3		-0.0025	0.0678344
OK5 - OKS5	*	0.1825	0.0678344
OKS3 - OKS5	*	0.185	0.0678344

* indica una diferencia significativa.

b. ÁREA ALVEOLAR MEDIA

Análisis de varianza ANOVA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.304	4	0.076	22.80	0.0001
Intra grupos	0.0333333	10	0.00333333		
Total (Corr.)	0.337333	14			

Pruebas de Múltiple Rangos

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
OK3	3	0.266667	A
OKS5	3	0.466667	B
OKS3	3	0.533333	BC
OK5	3	0.633333	C
Control	3	0.666667	C

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Control - OK3	*	0.4	0.155157
Control - OK5		0.0333333	0.155157
Control - OKS3		0.133333	0.155157
Control - OKS5	*	0.2	0.155157
OK3 - OK5	*	-0.366667	0.155157
OK3 - OKS3	*	-0.266667	0.155157
OK3 - OKS5	*	-0.2	0.155157
OK5 - OKS3		0.1	0.155157
OK5 - OKS5	*	0.166667	0.155157
OKS3 - OKS5		0.0666667	0.155157

* indica una diferencia significativa.

c. DUREZA

Análisis de varianza ANOVA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	73.6972	4	18.4243	294.35	0.0000
Intra grupos	0.9389	15	0.0625933		
Total (Corr.)	74.6361	19			

Pruebas de Múltiple Rangos

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Control	4	4.64	A
OK3	4	5.41	B
OK5	4	5.835	BC
OKS3	4	6.06	C
OKS5	4	10.13	D

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Control - OK3	*	-0.77	0.548221
Control - OK5	*	-1.195	0.548221
Control - OKS3	*	-1.42	0.548221
Control - OKS5	*	-5.49	0.548221
OK3 - OK5		-0.425	0.548221
OK3 - OKS3	*	-0.65	0.548221
OK3 - OKS5	*	-4.72	0.548221
OK5 - OKS3		-0.225	0.548221
OK5 - OKS5	*	-4.295	0.548221
OKS3 - OKS5	*	-4.07	0.548221

* indica una diferencia significativa.

d. MASTICABILIDAD

Análisis de varianza ANOVA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.89343	4	0.223357	113.76	0.0000
Intra grupos	0.02945	15	0.00196333		
Total (Corr.)	0.92288	19			

Pruebas de Múltiple Rangos

Método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

Tratamiento	Casos	Media	Grupos Homogéneos
OK5	4	0.8525	A
OK3	4	0.86	A
OKS3	4	0.885	AB
GX	4	0.9725	B
OKS5	4	1.41	C

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Control - OK3	*	0.1125	0.0970932
Control - OK5	*	0.12	0.0970932
Control - OKS3		0.0875	0.0970932
Control - OKS5	*	-0.4375	0.0970932
OK3 - OK5		0.0075	0.0970932
OK3 - OKS3		-0.025	0.0970932
OK3 - OKS5	*	-0.55	0.0970932
OK5 - OKS3		-0.0325	0.0970932
OK5 - OKS5	*	-0.5575	0.0970932
OKS3 - OKS5	*	-0.525	0.0970932

* indica una diferencia significativa.

ANEXO 4: CÁLCULOS DEL ENSAYO CALORÍMETRO PARA DETERMINAR LA POTENCIA DE ULTRASONIDO

Los parámetros constantes utilizados para los cálculos del ensayo calorimétrico se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros del sistema de trabajo en el ensayo calorimétrico

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Volumen de agua	V	200	mL
Densidad del agua	ρ	996,02	kg/m ³
Masa de agua	m	0,199	kg
Calor específico del agua	Cp	4,185	KJ/kg°C
Tiempo total	Δt	1200	s
Diámetro de la sonda	D	12,5	mm
Diámetro del vaso de precipitado	D _{vp}	70	mm
Ratio D/D _{vp}		0,18	

Los valores registrados de temperatura del agua en función del tiempo durante la aplicación del tratamiento de ultrasonido se presentan de manera promedio en la Figura 1 y el detalle por repetición en la Tabla 2.

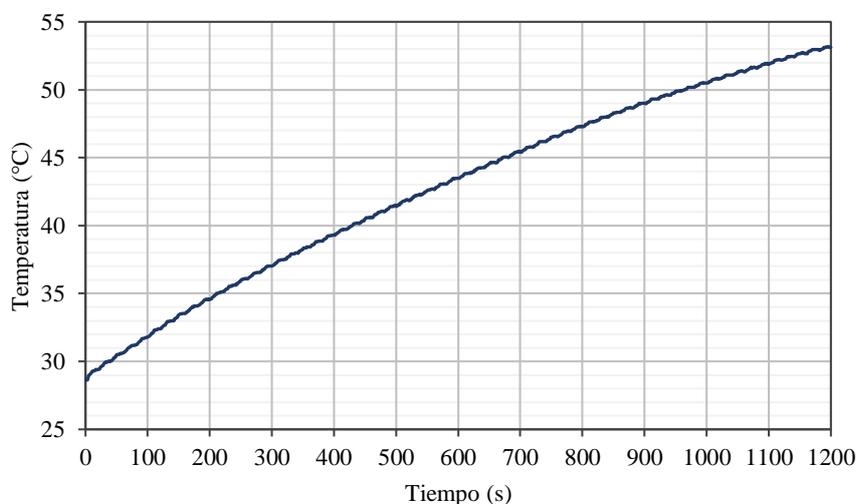


Figura 1: Temperatura del agua en función del tiempo durante el tratamiento de ultrasonido - Curva promedio a partir de las repeticiones

Tabla 2: Valores de temperatura del agua registrados durante el tratamiento de ultrasonido (Resumen por intervalos de 30 segundos)

Tiempo (s)	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
1	29,50	28,30	28,10
30	30,70	29,60	29,20
60	31,50	30,40	30,00
90	32,80	31,30	30,80
120	33,70	31,90	31,60
150	35,00	32,80	32,40
180	35,70	33,40	33,10
210	36,70	34,20	33,90
240	37,40	34,90	34,60
270	38,30	35,70	35,30
300	38,90	36,20	36,00
330	39,90	37,00	36,70
360	40,40	37,60	37,30
390	41,30	38,30	38,00
420	41,80	38,80	38,60
450	42,70	39,50	39,30
480	43,20	40,10	39,80
510	44,10	40,70	40,50
540	44,60	41,20	41,10
570	45,40	41,90	41,70
600	45,80	42,40	42,20
630	46,60	43,00	42,90
660	47,10	43,40	43,40
690	47,90	44,10	44,10
720	48,40	44,50	44,50
750	49,20	45,10	45,20
780	49,60	45,60	45,60
810	50,40	46,10	46,30
840	50,80	46,50	46,70
870	51,40	47,10	47,30
900	51,80	47,50	47,70
930	52,30	48,00	48,30
960	52,70	48,40	48,70
990	53,20	48,90	49,30
1020	53,50	49,30	49,60
1050	53,90	49,80	50,20
1080	54,20	50,10	50,50
1120	54,70	50,30	50,60
1150	55,10	50,70	51,00
1180	55,40	51,00	51,20
1200	55,40	51,30	51,60

a. Cálculo de la potencia del ultrasonido o potencia real

Los valores del cambio de temperatura (ΔT) registrado en el ensayo calorimétrico, junto a los datos constantes del sistema (m , C_p , Δt), se introdujeron en la Ecuación 1 para el cálculo de la potencia del ultrasonido en unidades Watts.

Tabla 3: Resultados de la determinación de la potencia de ultrasonido

N°	T. inicial (°C)	T. final (°C)	ΔT (°C)	Δt (s)	m (kg)	C_p (KJ/kg°C)	Potencia de ultrasonido (W)
1	29,5	55,4	25,9	1200	0,199204	4,185	17,99
2	28,3	51,3	23,0	1200	0,199204	4,185	15,98
3	28,1	51,6	23,5	1200	0,199204	4,185	16,33
Promedio							16,77
D.S.							1,08

b. Cálculo de la intensidad del ultrasonido y densidad energética

A partir de los valores de potencia de ultrasonido obtenidos se calcularon los parámetros de intensidad y densidad energética a través de las Ecuaciones 2 y 3, respectivamente.

Tabla 4: Resultados de la determinación de la intensidad de ultrasonido y densidad energética

N°	Potencia de ultrasonido (W)	Diámetro de sonda (mm)	Volumen (cm ³)	Intensidad del ultrasonido (W/cm ²)	Densidad Energética (W/cm ³)
1	17,99	12,5	200	14,66	0,09
2	15,98	12,5	200	13,02	0,08
3	16,33	12,5	200	13,30	0,08
Promedio				13,66	0,08
D.S.				0,88	0,01

**ANEXO 5: COEFICIENTES OBTENIDOS DEL MODELAMIENTO
MATEMÁTICO DE LAS CURVAS DE VISCOSIDAD**

Tabla 1: Coeficientes de la Ecuación de Gompertz obtenidos del modelamiento de la segunda y tercera parte de la curva de viscosidad

	Coeficientes		
	A	B	C
Segunda parte de la curva			
Control	1781,79 ± 55,44	1,44 ± 0,02	6,22 ± 0,09
OK3	1469,70 ± 94,10	1,43 ± 0,12	6,40 ± 0,02
OK5	1679,85 ± 40,50	1,35 ± 0,00	6,21 ± 0,00
OXS3	1676,03 ± 17,70	1,41 ± 0,03	6,29 ± 0,03
OXS5	1602,08 ± 80,45	1,34 ± 0,08	6,27 ± 0,01
Tercer parte de la curva			
Control	1443,61 ± 11,15	0,99 ± 0,01	10,22 ± 0,03
OK3	1324,97 ± 50,33	1,07 ± 0,05	10,36 ± 0,03
OK5	1331,10 ± 9,90	1,09 ± 0,03	10,24 ± 0,02
OXS3	1484,93 ± 29,89	1,02 ± 0,07	10,32 ± 0,05
OXS5	1366,07 ± 50,56	1,06 ± 0,01	10,33 ± 0,02

**ANEXO 6: GRÁFICOS DE LOS PANES OBTENIDOS CORRESPONDIENTES
A LOS TRATAMIENTOS EVALUADOS**



Figura 1: Pan control con goma xantana



Figura 2: Pan con okara de tarwi control al 3 % (OK3)



Figura 3: Pan con okara de tarwi control al 5 % (OK5)



Figura 4: Pan con okara de tarwi sonicad al 3 % (OKS3)



Figura 5: Pan con okara de tarwi sonica al 5 % (OKS5)

ANEXO 7: PÓSTER DE PARTICIPACIÓN EN CONGRESO INTERNACIONAL (ICBC 2024) CON EL PRESENTE TEMA DE INVESTIGACIÓN

Evaluation of okara of Andean lupin (*Lupinus mutabilis*) modified with high-intensity ultrasound as gluten-free bread improver

Repo-Carrasco-Valencia R^{1*}, Huamani-Perales C¹, Correa MJ², Vidaurre-Ruiz J¹, Cabezas DM³, Rodriguez JC⁴

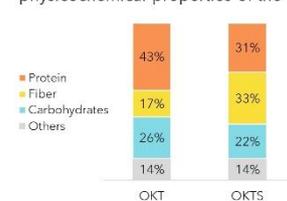
1. Centro de Investigación e Innovación en Productos Derivados de Cultivos Andinos CINCA, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú
 2. Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (CIDCA) - FCE - UNLP - CCT La Plata (CONICET), La Plata, Argentina
 3. Laboratorio de Investigación en Funcionalidad y Tecnología de Alimentos (LIFTA), Departamento de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de Quilmes, Argentina
 4. Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú
 *Email: riva@lamolina.edu.pe

INTRODUCTION

Tarwi (*L. mutabilis*) is an important source of protein and fat that has recently attracted increasing interest [1]. The extraction of fats and proteins from tarwi generates a residue called "okara" due to its analogy with the residue obtained from the processing of soybeans [2]. Modifying plant by-products through green technologies such as ultrasound is aligned with efforts to add added value to these products and reduce the environmental impact of their disposal.

RESULTS

The composition (Figure 1) and technological functional properties (Table 1) of tarwi okaras were determined. These results reflect that ultrasound treatment caused changes in the physicochemical properties of the matrix.



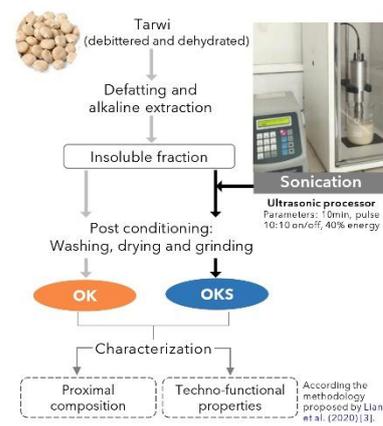
	OKT	OKTS
Water absorption capacity (g/g)	3.32 ± 0.03 ^a	4.30 ± 0.04 ^b
Oil absorption capacity (g/g)	1.15 ± 0.02 ^a	1.31 ± 0.05 ^b
Emulsión activity index (m2/g)	13.44 ± 0.44 ^a	16.89 ± 0.52 ^b
Emulsión stability index (min)	25.12 ± 0.51 ^a	26.22 ± 0.29 ^b
Swelling capacity (mL/g)	5.37 ± 0.21 ^a	7.14 ± 0.85 ^b

OBJETIVE

This research aimed to i) describe the changes of high-intensity ultrasound on tarwi okara in terms of composition and techno-functional properties and then ii) evaluate the effect of adding control (OK) and sonicated (SOK) tarwi okara at levels of 3% and 5% in bread formulation on the physicochemical characteristics of final products.

METODOLOGY

The process to recover and apply the high-intensity ultrasound is described below.



RESULTS

The specific bread volume was not affected in the OK5 and OKS3 treatments (Figure 2). Regarding the crumb texture, the hardness increased with the levels of okara addition (Table 2); however, chewiness improved in all treatments (except OKS5) (Figure 3). In the alveolar structure of the crumb, the average size of the air cells and the void fraction showed significant differences compared to the control bread (Figure 4), with less impact in the treatments with greater specific volume.

CONCLUSION

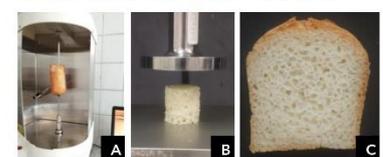
The composition and techno-functional properties of tarwi okara were affected by high-intensity ultrasound technology, improving its hydration and emulsification properties, which are essential in baking. Gluten-free bread treatments with 5% control okara and 3% sonicated okara showed satisfactory results comparable to the control. This fact supports the hypothesis that sonication improves the efficiency of tarwi okara performance as an improver of technological quality in gluten-free bread.

ACKNOWLEDGMENTS:

The authors acknowledge the financial support of CONCYTEC (Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica) through PROCIENCIA Program, within the framework of Contest E041-2023-01 [Contract N° PE501082513-2023-PROCIENCIA].

References

- Vidaurre-Ruiz J, Bender D, Schonlechner R. (2023). Exploiting pseudocereals as novel high protein grains. *J Cereal Sci.* 114:103795. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2023.103795>
- Mosacco Cipriani YA, Lianello ME, Girolato L, Burbano JJ, Cabezas DM, Correa MJ. (2023). Effect of ultrasonic treatment on soybean okara to be used as a gluten free bread improver. *Int J Food Sci Technol.* 58: 3827-3837. <https://doi.org/10.1111/ijfs.19484>
- Lian H, Luo K, Gong Y, Zhang S, Sarventi L. (2020). Okara flours from chickpea and soy are thickeners: increased dough viscosity and moisture content in gluten-free bread. *Int J Food Sci.* 55(2): 805-812. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14332>



Note: A control bread with xanthan gum (GX) at 0.5% was made for comparison purposes.

Figura 1: Póster del tema de investigación presentado en el congreso ICBC 2024