UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

TESIS:

Efecto de la adición de harina de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) blanca germinada en las características físicas, químicas y sensoriales del pan chabata

Para optar el título profesional de:
INGENIERA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

PRESENTADO POR:
Bach. Katherine Sharlotte LIZA AVALOS

ASESOR:
Dr. Antonio Jesús MATOS ALEJANDRO

AYACUCHO - PERÚ

2026

DEDICATORIA

A Dios, por darme la salud, la sabiduría y la fortaleza necesarias para superar cada obstáculo en este camino y permitirme culminar con éxito esta etapa tan importante de mi vida. A mis padres, por su esfuerzo constante, su amor infinito y su apoyo incondicional en cada decisión que he tomado; ellos son y serán siempre los pilares fundamentales de mi vida y de mi formación profesional. A mis hermanos y familiares, por su complicidad, sus palabras de apoyo y por recordarme siempre el valor de la perseverancia y la unión familiar. A mis docentes y asesor, por los conocimientos compartidos, su rigurosidad académica y la orientación brindada a lo largo de estos años, guiándome con paciencia para convertirme en un profesional de bien.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por darme la fuerza espiritual para superar los retos del camino, mantener claras mis metas y culminar con éxito esta etapa profesional.

A mi familia, en especial a mis padres por su amor incondicional, su paciencia y por ser el motor que me impulsó a seguir adelante en los momentos de incertidumbre.

A mi querida UNSCH, en especial a los ingenieros y docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería en Industrias Alimentarias, por las valiosas lecciones y el criterio técnico brindado durante mis años de estudio.

A mi asesor, el Dr. Antonio Jesús Matos Alejandro, por su valioso tiempo, sus conocimientos y el respaldo constante otorgado a esta investigación.

A la Subvención de Trabajos de Investigación - Tesis de Pregrado y Posgrado, financiadas con Recursos del Fondo de Desarrollo Socioeconómico de Camisea (FOCAM) de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, por el financiamiento y soporte económico otorgado, los cuales fueron fundamentales para la viabilidad y ejecución de este proyecto.

A todos aquellos que, de una u otra manera, aportaron con su granito de arena para hacer posible la culminación de este trabajo.

RESUMEN

La presente investigación evaluó seis tratamientos de pan chabata (Tratamientos T1 a T6) mediante un enfoque analítico que integró su caracterización física, química y sensorial. En la dimensión física, se determinó el porcentaje de humedad del producto, junto con la medición del volumen mediante el método de desplazamiento y el cálculo de la densidad. Posteriormente, en el componente químico, se determinó el contenido de proteína mediante el método de digestión Kjeldahl (AOAC 920.152), registrando valores estándar para panificación de entre el 7% y el 12% en base húmeda, además de cuantificarse los niveles de fibra y el contenido de hierro para verificar el impacto del enriquecimiento de las masas. Finalmente, se ejecutó la evaluación sensorial de las muestras empleando un panel estandarizado de 15 jueces bajo un Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA), donde los panelistas actuaron estadísticamente como bloques para calificar de forma hedónica los atributos de color, olor, sabor y textura, procesando los datos en el software SPSS mediante el Análisis de Varianza (ANOVA) y la prueba de rangos múltiples de Duncan ($\alpha = 0,05$).Los análisis de varianza demostraron la existencia de diferencias estadísticas significativas ($p < 0,001$) entre las formulaciones para todas las variables estudiadas, confirmando que las variaciones tecnológicas modificaron drásticamente las propiedades físicas de las masas, su composición proximal y la percepción organoléptica. La prueba de Duncan coronó al tratamiento 4 con las máximas calificaciones sensoriales en color (6,13) y textura (5,20), lo cual se correlacionó directamente con volumen y una densidad. Paralelamente, el perfil aromático en olor fue liderado en solitario por el tratamiento 3 (6,07), mientras que el balance saporífero en sabor destacó de forma independiente en el tratamiento 2 (6,07). Los modelos lineales demostraron una excelente robustez predictiva, reflejada en coeficientes de determinación (R^2) sumamente altos que oscilaron entre 0,770 y 0,848, logrando explicar entre el 77% y el 85% de la variabilidad total de las respuestas. Por último, el factor de bloqueo (Panelista) obtuvo significancias holgadamente mayores al límite crítico ($p > 0,05$), alcanzando valores analíticos de hasta $p = 0.999$ en las variables de sabor y textura, lo que, valida científicamente el riguroso entrenamiento y la homogeneidad de criterio del panel, otorgando una sólida confiabilidad, repetibilidad y validez científica a los resultados obtenidos.

Palabras clave: Germinación, pan chabata, sustitución parcial, características sensoriales, valor nutricional.

ABSTRACT

The present study evaluated six formulations of ciabatta bread (Treatments T1 to T6) through an analytical approach integrating their physical, chemical, and sensory characterization. In the physical dimension, the moisture content of the product was determined, together with volume measurement using the displacement method and density calculation. Subsequently, in the chemical component, the protein content was determined using the Kjeldahl digestion method (AOAC 920.152), recording standard values for breadmaking ranging from 7% to 12% on a wet basis. In addition, fiber and iron contents were quantified to verify the impact of dough enrichment. Finally, a sensory evaluation of the samples was conducted using a standardized panel of 15 judges under a Randomized Complete Block Design, in which the panelists statistically acted as blocks to evaluate the hedonic attributes of color, odor, flavor, and texture. The data were processed using SPSS software through Analysis of Variance (ANOVA) and Duncan's multiple range test ($\alpha = 0,05$). The analysis of variance demonstrated the existence of highly significant statistical differences ($p < 0,001$) among the formulations for all the variables studied, confirming that the technological variations substantially modified the physical properties of the dough, its proximate composition, and its organoleptic perception. Duncan's test identified Treatment 4 as the overall optimal formulation, obtaining the highest sensory scores for color (6,13) and texture (5,20), which were directly correlated with its adequate specific volume and ideal crumb density. Meanwhile, the aromatic profile for odor was independently led by Treatment 3 (6,07), whereas the flavor attribute independently stood out in Treatment 2 (6,07). The linear models demonstrated excellent predictive robustness, reflected in very high coefficients of determination (R^2), ranging from 0,770 to 0,848, explaining between 77% and 85% of the total variability in the responses. Finally, the blocking factor (Panelist) showed significance values well above the critical threshold ($p > 0,05$), reaching analytical values as high as $p = 0,999$ for the flavor and texture variables. This validates the consistent criteria of the panel and supports the reliability, repeatability, and scientific validity of the results obtained.

Keywords: Germination, ciabatta bread, partial substitution, sensory characteristics, nutritional value.

ÍNDICE

RESUMEN iv
ABSTRACT v
ÍNDICE vi
INTRODUCCIÓN 1
CAPÍTULO I 3
MARCO TEÓRICO 3
1.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN 3
1.1.1. Antecedentes internacionales 3
1.1.2. Antecedentes nacionales 5
1.1.3. Antecedentes locales 7
1.2. QUINUA 8
1.2.1. Taxonomía de la quinua 10
1.2.2. Composición química y valor nutricional de la quinua blanca 10
1.2.3. Estructura morfológica de la quinua 12
1.2.4. Variedades de la quinua 13
1.2.5. Factores anti nutricionales 15
1.2.6. Producción de la quinua 15
1.3. GERMINADO 17
1.3.1. La germinación 17
1.3.2. Proceso de germinación 18
1.3.2.1. Contenido de humedad mínimo para que ocurra la germinación 19
1.3.2.2. Efecto de la temperatura 20
1.3.3. Cambios durante la germinación 22
1.3.4. Ventajas de los germinados 23
1.3.5. Propiedades de los germinados 23
1.3.6. Proceso para la germinación de granos de quinua 24
1.4. HARINA 24
1.4.2. Harina de quinua germinada 25
1.5. PRODUCTOS DE PANIFICACIÓN 26
1.5.1. El pan 26
1.6. CONTROL DE CALIDAD PARA EL PAN 29
1.7. SUSTITUCIÓN 30
1.8. PAN CHABATA 37
1.8.1. Presentación del pan chabata comercial 39
1.8.2. Ingredientes del pan chabata comercial 40
1.8.3. Datos nutricionales del pan chabata comercial 42

1.9. CONTROL DE CALIDAD DEL PAN CHABATA 43
1.10. DISEÑO ESTADISTICO 47
1.11. EVALUACIÓN SENSORIAL 51
1.11.1. Prueba afectiva 52
1.11.2. Prueba Hedónica 52
CAPÍTULO II 53
MATERIALES Y MÉTODOS 53
2.1. LUGAR DE EJECUCIÓN 53
2.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN 54
2.4. MATERIALES Y EQUIPOS 54
2.4.8. Proceso de obtención de harina de quinua germinada 56
2.4.9. Proceso de obtención del pan chabata 59
2.5. DISEÑO EXPERIMENTAL 61
2.6. POBLACIÓN Y MUESTRA 63
2.7. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS 64
2.8. ANÁLISIS ESTADÍSTICO 67
CAPÍTULO III 69
RESULTADOS Y DISCUSIÓN 69
3.1. EVALUACIÓN FÍSICA 69
3.2. EVALUACIÓN QUÍMICA 76
3.3. EVALUACIÓN SENSORIAL 84
CONCLUSIONES 96
RECOMENDACIONES 96
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 99
ANEXOS 106

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Valor nutricional de la quinua (contenido en 100g de quinua) 10
Tabla 2 Valor nutricional de la quinua 11
Tabla 3 Composición nutricional de la quinua 12
Tabla 4 Análisis proximal harina de quinua normal) y germinada 18
Tabla 5 Requerimientos de humedad crítica para la germinación 20
Tabla 6 Temperaturas cardinales de algunas semillas 21
Tabla 7 Valor nutricional por porción 100 g 43
Tabla 8 Representación simbólica de las respuestas 49
Tabla 9 Cuadro de análisis de varianza (ANVA) 49
Tabla 10 Porcentajes de harinas en las formulaciones del pan chabata 62
Tabla 11 Formulaciones para la elaboración del pan chabata de los 6 tratamientos .. 60
Tabla 12 Escala hedónica de 7 puntos 67
Tabla 13 Análisis de varianza para la humedad del pan chabata 69
Tabla 14 Prueba de Duncan para la humedad del pan chabata 70
Tabla 15 Análisis de varianza para volumen del pan chabata 72
Tabla 16 Prueba de Duncan para el volumen del pan chabata 72
Tabla 17 Análisis de varianza para la densidad en el pan chabata 74
Tabla 18 Prueba de Duncan para el volumen del pan chabata 75
Tabla 19 Análisis de varianza para proteína del pan chabata 78
Tabla 20 Prueba de Duncan para proteína del pan chabata 78
Tabla 21 Análisis de varianza para fibra del pan chabata 80
Tabla 22 Análisis de Duncan para fibra del pan chabata 80
Tabla 23 Análisis de varianza para hierro en el pan chabata 82
Tabla 24 Prueba de Duncan para hierro del pan chabata 83
Tabla 25 Análisis de varianza para atributo color del pan chabata 84
Tabla 26 Prueba de Duncan para atributo color del pan chabata 85
Tabla 27 Análisis de varianza de atributo olor del pan chabata 87
Tabla 28 Prueba de Duncan para atributo olor del pan chabata 88
Tabla 29 Análisis de varianza de atributo sabor del pan chabata 90
Tabla 30 Prueba de Duncan para atributo olor en el pan chabata 91
Tabla 31 Análisis de varianza de atributo para la textura del pan chabata 92
Tabla 32 Duncan para el atributo de textura del pan chabata 94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Grano de quinua 9
Figura 2 Morfología del grano de quinua 13
Figura 3 Fases del proceso de germinación 19
Figura 4 Diagrama de flujo para la obtención de quinua germinada 58
Figura 6 Diagrama de flujo para la producción de pan chapata 61
Figura 5 Diagrama de diseño experimental para las 6 formulaciones 63
Figura 7 Medias marginales para la comparación de humedad en los tratamientos. ... 71
Figura 8 Medias marginales para la comparación de volumen en los tratamientos 73
Figura 9 Medias marginales para la comparación de densidad en los tratamientos ... 75
Figura 10 Cantidad de proteína (%) entre los tratamientos 79
Figura 11 Cantidad de fibra entre los tratamientos 81
Figura 12 Cantidad de hierro entre los tratamientos 83
Figura 13 Comparación para el atributo de color 86
Figura 14 Comparación para el atributo de olor 89
Figura 15 Comparación para el atributo de olor 92
Figura 16 Comparación para el atributo de textura 94

INTRODUCCIÓN

La presente investigación se fundamenta en la necesidad de intervenir sobre una problemática latente en la salud pública y la industria alimentaria: el consumo masivo de productos de panificación elaborados con harinas altamente refinadas. El pan chabata convencional, a pesar de su gran aceptación comercial y alta palatabilidad, presenta una densidad nutricional crítica, caracterizada por un exceso de carbohidratos simples y una deficiencia severa de micronutrientes, fibra y proteínas de alta biodisponibilidad. Esta carencia en alimentos de consumo diario agudiza problemas de salud pública crónicos en la población, tales como la anemia ferropénica, la obesidad y la malnutrición crónica.

Por otro lado, aunque la quinua es reconocida como un recurso estratégico para la seguridad alimentaria debido a su excelente perfil de aminoácidos, su incorporación directa en la industria de la panificación tradicional se ve limitada por las propiedades tecnofuncionales del grano en estado crudo, las cuales suelen afectar negativamente el volumen y la textura del pan.

Este problema se justifica abordar porque la germinación surge como una alternativa biológica y económica viable para modificar la estructura del pseudocereal. El proceso biológico rompe el almidón y las proteínas complejas, incrementando de forma natural las vitaminas del complejo B, el hierro libre y la digestibilidad, permitiendo transformar un producto tradicionalmente deficitario en un alimento funcional que mitigue las deficiencias nutricionales de la sociedad.

El estudio sistemático de los macronutrientes como las proteínas, la fibra, sumado a la cuantificación del hierro como micronutriente clave, permite validar científicamente el potencial del producto como un alimento enriquecido o funcional. Esta optimización química debe guardar un estricto equilibrio con la respuesta sensorial del consumidor, ya que la adición de harinas nativas suele modificar la cinética de las reacciones de Maillard y caramelización durante el horneado, impactando en el color, el perfil volátil del olor, el balance de sabor y la reología de la textura.

Bajo este escenario, se hipotetiza que la sustitución parcial de harina de trigo por harina de quinua germinada incrementará los niveles de proteína, fibra, grasa y hierro en el pan chabata, modificando sus propiedades físicas (volumen, densidad y humedad) de manera dosis-dependiente, y requiriendo la identificación de un nivel óptimo de adición para mantener una alta aceptabilidad sensorial.

Bajo este escenario, la presente investigación plantea como objetivo general evaluar el efecto de la adición de harina de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) germinada en las características físicas, químicas y sensoriales del pan chabata. Para alcanzar este propósito, se establecieron como objetivos específicos:

- Analizar el efecto de la harina de quinua germinada en el volumen, densidad y humedad del pan chabata
- Analizar su impacto en el contenido de proteína, fibra, y hierro del producto terminado.
- Analizar el efecto de dicha incorporación en los atributos sensoriales de color, olor, sabor y textura evaluados mediante un panel de jueces.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

1.1.1. Antecedentes internacionales

Martínez et al. (2021), en su estudio sobre la formulación de productos de panificación con harina de quinua tostada (*Chenopodium quinoa*) y trigo (*Triticum aestivum*), señalan que, aunque la panificación ha sido un pilar alimentario histórico, los procesos modernos de urbanización y globalización han transformado los patrones de consumo. Actualmente, la sociedad demuestra una mayor consciencia sobre la necesidad de adoptar dietas equilibradas, priorizando alimentos de alta densidad nutricional que simultáneamente cumplan con estándares óptimos de palatabilidad y presentación visual. Ante esta tendencia, las matrices de panadería y pastelería, debido a su versatilidad de formatos y perfiles sensoriales, se consolidan como vehículos tecnológicos idóneos para la incorporación de harinas sucedáneas, permitiendo el desarrollo de formulaciones innovadoras alineadas con las demandas de salud del consumidor contemporáneo.

Astiz et al. (2015), en su investigación sobre el proceso de panificación empleando mezclas de trigo y quinua, evaluaron los efectos de sustituciones parciales a niveles del 10% y 20%. Los autores determinaron que es factible reemplazar la harina de trigo hasta en un 20% sin generar pérdidas drásticas en el volumen específico ni variaciones desfavorables en la apariencia externa de las piezas de pan. En cuanto al perfil bromatológico, el análisis químico proximal de los panes formulados evidenció un incremento lineal en las concentraciones de proteínas, lípidos, cenizas y densidad calórica, acompañado de una reducción proporcional en la fracción de carbohidratos. El

estudio concluyó que la inclusión de este pseudocereal optimiza de forma significativa el valor nutricional del producto terminado.

La quinua destaca entre los granos andinos por su notable concentración proteica, la cual ronda el 15%, y por poseer un perfil de aminoácidos esenciales más completo y equilibrado que el de la mayoría de cereales y legumbres. Esta singularidad composicional le confiere un alto valor biológico, permitiéndole actuar como un complemento proteico ideal en matrices alimentarias basadas en otros cultivos (Abugoch *et al.*, 2008). Por otra parte, la germinación constituye una técnica biotecnológica viable, de bajo costo y fácil implementación para el desarrollo de nuevos productos procesados. La demanda actual de alimentos germinados muestra una tendencia al alza, impulsada por sólidas evidencias científicas que respaldan sus propiedades funcionales y sus múltiples beneficios para la salud pública (Moongngarm y Saetung, 2010; Murugkar, 2015).

Vásquez et al. (2016), en su estudio sobre el impacto de la sustitución de harina de trigo por harina de quinua en las propiedades reológicas de la masa y texturales del pan, observaron que el contenido proteico final se eleva de manera proporcional al incremento del porcentaje de sustitución. Respecto a los parámetros texturales, las formulaciones sustituidas al 5% y 7.5% produjeron panes con una miga significativamente más blanda en comparación con el control. Los autores concluyeron que, si bien la incorporación del pseudocereal atenúa la fuerza mecánica de la masa, esta optimiza la capacidad fermentativa del sistema y disminuye la dureza del producto horneado; por consiguiente, convalidaron el uso de la harina de quinua como un insumo viable para el desarrollo de productos de panificación con un perfil nutricional más completo.

Tovar-Hernández et al. (2017), al evaluar el impacto del proceso de extrusión en harinas de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en estado nativo y germinado, reportaron variaciones significativas en los perfiles de viscosidad de las curvas de empastamiento. La harina proveniente de granos germinados evidenció valores viscoelásticos inferiores en comparación con la quinua convencional. Los autores señalaron que esta disminución en la consistencia reológica limita la aptitud tecnológica de los derivados del grano malteado para formulaciones alimentarias que requieran de una capacidad gélida rigurosa o de una retención estructural basada en geles estables. Chaparro et al. (2010) investigaron en Colombia el impacto del proceso de germinación sobre las concentraciones de hierro y calcio en matrices de quinua, amaranto, guandul y soya. Tras estandarizar las condiciones operacionales, definiendo el tipo de sustrato,

la aplicación de agentes desinfectantes y los parámetros óptimos de tiempo y temperatura, los autores determinaron que la brotación modifica de forma diferenciada la disponibilidad mineral de cada semilla.

En el caso específico de la quinua, el amaranto y la soya, se registró una disminución en los niveles de hierro bajo los parámetros evaluados, comportamiento que no se replicó en el guandul. Por el contrario, la fracción de calcio disponible experimentó un incremento estadísticamente significativo tanto en la quinua como en el amaranto, a diferencia del guandul y la soya, donde este mineral tendió a disminuir.

1.1.2. Antecedentes nacionales

En su investigación sobre el perfil químico y nutricional de granos andinos germinados, Bravo et al. (2013) evaluaron la composición proximal de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) y la kiwicha (*Amaranthus caudatus*) tras el proceso de brotación. Los análisis químicos determinaron para la quinua un contenido de 13,09% de proteína, 6,10% de grasa, 1,50% de cenizas y 2,68% de fibra total, mientras que la kiwicha exhibió valores de 16,45%, 8,29%, 3,18% y 9,50% para los mismos componentes, respectivamente. El estudio concluyó que la activación biológica por germinación optimiza las propiedades nutricionales en comparación con los granos enteros en estado latente, debido a una síntesis y acumulación significativa de vitaminas, minerales, aminoácidos esenciales, clorofila, oligoelementos y complejos enzimáticos.

Paucar-Menacho et al. (2018), en su estudio sobre la optimización de las condiciones de germinación en quinua, evaluaron el efecto de este proceso biológico sobre el perfil fitoquímico y la capacidad antioxidante del grano. Mediante la metodología de superficie de respuesta y la función de deseabilidad, determinaron que los parámetros óptimos de operación son una temperatura de 20 °C durante un periodo de 42 horas. Bajo estas condiciones, los granos germinados evidenciaron incrementos del 80% en los compuestos fenólicos totales (TPC) y del 30% en la actividad antioxidante en comparación con las semillas en estado latente; asimismo, se observó una notable acumulación de ácido aminobutírico (GABA). Los modelos matemáticos predictivos para TPC y actividad antioxidante mostraron un ajuste estadístico robusto, a diferencia del modelo para GABA. Finalmente, la brotación optimizada estimuló la síntesis de compuestos flavonoides y no flavonoides, con una mayor prevalencia de los primeros, destacando el aumento significativo de los glucósidos Kaempferol O-diramnosil-

galactopiranósido y Quercetina-O-glucurónido, lo que demuestra la viabilidad de la germinación controlada para desarrollar insumos funcionales.

El uso de la harina de quinua en la industria de la panificación y repostería, que incluye la manufactura de panes, galletas, productos de pastelería y bocadillos, destaca por su versatilidad tecnofuncional y su valor nutricional. A diferencia de los cereales convencionales como el trigo, el arroz y la cebada, este pseudocereal aporta una densidad mineral significativamente superior, caracterizada por concentraciones elevadas de fósforo (P), magnesio (Mg), potasio (K), hierro (Fe), zinc (Zn), calcio (Ca) y manganeso (Mn). Asimismo, su perfil se complementa con un aporte vitamínico diverso que abarca las vitaminas A, C, D y E, además de micronutrientes del complejo B como tiamina, riboflavina, niacina y ácido fólico.

Diversas investigaciones científicas respaldan el uso del proceso de germinación como una estrategia biotecnológica eficaz para optimizar la calidad nutricional y organoléptica de cereales y pseudocereales. Autores como Suárez-Estrella *et al.* (2020) y Ujiroghene *et al.* (2019) señalan que esta activación metabólica promueve la síntesis de compuestos bioactivos y eleva significativamente la biodisponibilidad de micronutrientes esenciales, tales como vitaminas y minerales. Simultáneamente, el proceso induce la degradación enzimática de los factores antinutricionales presentes en el grano latente, lo que potencia el valor funcional del insumo.

Cauvain y Young (2009) sostienen que añadir ingredientes alternativos en sustitución parcial de la harina de trigo altera significativamente el comportamiento reológico de las masas panificables, lo que repercute directamente en sus propiedades dinámicas, la cinética de fermentación y los atributos de calidad del producto final. Este fenómeno está supeditado al nivel de sustitución empleado, puesto que la incorporación de harinas como las de pseudocereales induce una dilución de las proteínas viscoelásticas que constituyen la red de gluten, además de generar nuevas interacciones moleculares con los componentes de la matriz.

En consecuencia, los autores destacan que la caracterización reológica previa de las mezclas, sumada a un control estricto del tiempo y la temperatura de leudado, el método de procesamiento y la fuerza panadera del trigo, resulta fundamental para mitigar estas variaciones técnicas.

Jiménez et al., (2019), en su estudio "Quino -Grain (*Chenopodium quinoa*) y Amaranthus (*Amaranthus*) efectos de germinación de la nutrición y las propiedades tecnológicas funcionales en su harina", decidió que la tecnología de agarre afecta el

contenido de proteínas de la digestión en las fracciones. Las acciones, así como el eje, así como los ejes, que son acciones, así como las acciones, así como el eje, que es una promoción, que es una promoción, que es un peso excesivamente equivalente al peso de peso de 4 -66 kDa. En consecuencia, la entalpia de la harina se redujo significativamente con la germinación. Del mismo modo, señalan que el proceso germinado mejora la contribución dietética de la quinua y Amaranth, incluso declaró que el contenido de almidón y gel cayó y se volvió más inestable, lo cual es una característica importante a considerar en la formulación de alimentos.

Chaparro et al., (2010), en su investigación sobre el impacto del malteado de quinua (*Chenopodium quinoa*), kañiwa (*Chenopodium pallidicaule)* y kiwicha (*Amaranthus caudatus*) destinados a la elaboración de galletas, reportó que el proceso de germinación indujo una leve disminución en los contenidos de proteínas y fibra en comparación con los granos sin procesar. Específicamente, en la quinua germinada durante 20 horas se observaron reducciones de 2,99% en proteínas y 0,85% en fibra; mientras que para la kiwicha sometida a tres días de germinación, las reducciones fueron de 0,47% y 0,45%, respectivamente. No obstante, respecto a la calidad proteica, el autor determinó que la quinua germinada por 20 horas exhibió un incremento notable en su digestibilidad en comparación con la muestra control. Asimismo, la kiwicha y la kañiwa malteadas durante tres días alcanzaron valores de digestibilidad in vitro del 67,97% y 80,77%, respectivamente, superando los registros de sus correspondientes muestras patrón.

Parcialmente, los reemplazos de 20%, 30% y 40% mostraron una mejora en la composición física y química durante la elaboración de galletas, siendo el 40% el que presentó las mejores características, registrando 12 de 76, así como 7,78% y 78,47%, respectivamente. En relación con la evaluación sensorial, se incluyeron quooa, kañi, y en parte, se observó que los reemplazos de 20%, 30% y 40%, junto con 4 kiwox no relacionados con los anteriores, representaron el 20% y 4 kiway, en términos de apariencia, textura y características sensoriales. Se llegó a la conclusión de que el reemplazo parcial óptimo de harina de malta es del 40%, dado que proporciona atributos sensoriales superiores y una composición físico-química mejorada en galletas elaboradas con harina de malta de granos de pato.

1.1.3. Antecedentes locales

En la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial de la UNSCH, se realizó un estudio comparativo de las propiedades físicoquímicas y tecnofuncionales entre la

harina de quinua (*Chenopodium quinoa*) en estado natural y germinado. Los resultados revelaron diferencias estadísticas significativas ($p<0,05$); la harina germinada presentó mayores niveles de cenizas (2,91%) y fibra cruda (7,61%) en comparación con la harina sin germinar (2,38% y 6,74%, respectivamente). En el aspecto tecnofuncional, el proceso biológico elevó la capacidad de retención de agua (de 3,10 a 3,34 g agua/g harina), la capacidad espumante (de 24,55% a 29,29%) y el índice de hinchamiento (de 2,67 a 3,26 mL/g). El estudio concluyó que la germinación incrementa el valor mineral y estructural, optimizando la aptitud de la harina para matrices alimentarias complejas.

1.2. QUINUA

La quinua un pseudocereal clasificado taxonómicamente dentro de la familia Chenopodiaceae. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2011), la región andina, que abarca los territorios actuales de Perú, Bolivia, Ecuador, Colombia, Chile y Argentina, se consolida como el centro de origen y diversificación de numerosas variedades de este grano. Asimismo, este cultivo representó un pilar fundamental en la seguridad alimentaria y el desarrollo nutricional de las civilizaciones prehispánicas que habitaron dicha zona geográfica durante milenios.

La quinua se caracteriza por ser una especie herbácea de ciclo anual nativa de la región andina sudamericana, cuyo cultivo ha sido desarrollado históricamente por civilizaciones prehispánicas en territorios de Perú, Bolivia, Ecuador y Colombia. Desde el punto de vista morfológico, presenta un crecimiento acelerado, hojas de geometría lanceolada e inflorescencias con flores diminutas de coloración variable. Las estructuras comúnmente denominadas "granos" corresponden botánicamente a las semillas de la planta, las cuales poseen un alto valor biológico debido a su notable concentración de proteínas, fibra dietética, complejos vitamínicos y oligoelementos esenciales (Smith, 2020).

El notable potencial agronómico y nutricional de la quinua ha despertado un gran interés global en los últimos años, motivando a la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación a instaurar el año 2013 como el Año Internacional de la Quinua. Esta declaración oficial buscó expandir la difusión y el consumo masivo de este grano andino a escala mundial (FAO, 2011).

Desde la perspectiva institucional de la FAO, este pseudocereal se consolida como un pilar estratégico para robustecer la seguridad alimentaria, mitigar la pobreza y

contrarrestar los índices de malnutrición crónica, actuando simultáneamente como un factor dinámico para la conservación de la biodiversidad agrícola (FAO, 2011).

La quinua, un pseudocereal nativo de la región andina, está catalogada internacionalmente como un alimento estratégico debido a su excepcional valor nutricional y propiedades saludables (Paucar-Menacho et al., 2018). El grano presenta una fracción de carbohidratos que oscila entre el 62.3% y el 74.0%, un rango cuantitativamente equiparable al de cereales comerciales como el arroz y la cebada (Paucar-Menacho et al., 2018). No obstante, su principal ventaja radica en una concentración de proteínas de alta calidad que se sitúa entre el 16.5% y el 23.9%; este atributo responde a un perfil de aminoácidos sumamente equilibrado, el cual emula la composición de la leche y se aproxima rigurosamente al patrón biológico ideal recomendado por la FAO (Paucar-Menacho et al., 2018).

La quinua se define como una especie botánica de ciclo anual, cuyo periodo vegetativo comprende un rango cronológico de 150 a 240 días. De acuerdo con Edel y Rosell (2007), esta planta exhibe una notable plasticidad fenotípica y resiliencia ecológica, lo que le permite adaptarse a regímenes climáticos heterogéneos; por consiguiente, su distribución geográfica y viabilidad de cultivo se extienden con éxito desde las zonas costeras a nivel del mar hasta ecosistemas altoandinos ubicados a 4000 metros de altitud.

Figura 1

Grano de quinua



Nota. Granos comerciales pulidos y seleccionados, caracterizados por la remoción física de las capas externas que contienen saponinas amargas. Fotografía adaptada de Agritrade Perú, (2020).

1.2.1. Taxonomía de la quinua

Según Rodríguez (2018), la clasificación taxonómica indica la presencia de una única especie, a pesar de mostrar amplias diferencias en cuanto a su forma, como sucede con su tipo de flores y el tono de su fruto.

- Nombre Científico : *Chenopodium quinoa* Willd.
- Reino : Plantae
- Clase : Magnoliopsida
- Subclase : Rosidae
- Orden : Caryophyllales
- Familia : Amaranthaceae
- Género : Chenopodium

1.2.2. Composición química y valor nutricional de la quinua blanca

Los principales componentes del grano de quinua (agua, proteínas, grasas, carbohidratos, cenizas y celulosa) constituyen su perfil nutricional promedio, el cual se sintetiza en la Tabla 1 a partir de las estimaciones reportadas por Gorbitz y Luna (2016). Esta composición, que incluye fracciones de humedad y estructura celular, representa la caracterización bromatológica central de este cultivo andino. Puede consultar el desglose detallado de los parámetros nutricionales en el documento citado de Gorbitz y Luna (2016).

Tabla 1

Valor nutricional de la quinua (contenido en 100g de quinua)

Elemento	Unidad	Valor
Agua	%	12,00
Proteínas	%	10,70
Grasas	%	5,70
Carbohidratos	%	69,29
Cenizas	%	3,20
Celulosas	%	4,30

Nota. Composición química proximal expresada en base húmeda para el grano entero. Los valores de carbohidratos se determinaron por diferencia (% Carbohidratos = 100 - [% Agua + % Proteínas + % Grasas + % Cenizas]). Adaptado de Tablas Peruanas de Composición de Alimentos del Centro Nacional de Alimentación y Nutrición (CENAN) - Instituto Nacional de Salud (INS). Citado por Gorbitz y Luna (2016).

Tabla 2

Valor nutricional de la quinua

Componentes	Unidad	Cantidad
Energía	Kcal	399
Proteína	g	15,7
Grasa	g	6,3
Carbohidratos	g	69,0
Isoleucina	g	3,0
Leucina	g	6,1
Lisina	g	7,9
Metionina	g	2,3
Fenilalanina	g	4,1
Treonina	g	2,5
Triptófano	g	0.6
Valina	g	4,0
Calcio	mg	148,7
Hierro	mg	13,2
Magnesio	mg	249,6
Fosforo	mg	383,7
Potasio	mg	926,7
Zinc	mg	4,4

Nota. Perfil integral de macronutrientes, balance de aminoácidos y micronutrientes inorgánicos contenidos en el grano. Resalta la elevada concentración de lisina (7,9 g), aminoácido limitante en los cereales convencionales como el trigo, lo que fundamenta científicamente la complementación proteica al incorporar este pseudocereal en la formulación del pan chabata. Asimismo, el alto aporte de hierro (13,2 mg) justifica el planteamiento del problema orientado a mitigar la anemia mediante la biofortificación natural por germinación, proceso que reducirá los factores antinutricionales (fitatos) y elevará la biodisponibilidad de estos minerales. Adaptado de los compendios bromatológicos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2011) y las tablas de caracterización de granos andinos.

En la Tabla 3 se recopilan los parámetros bromatológicos de la quinua descritos en la literatura científica. Los contenidos correspondientes a cenizas, proteínas, lípidos y carbohidratos se expresan en gramos por cada 100 gramos de materia seca (g/100 g m. s.), en tanto que la fracción de humedad se detalla en gramos por cada 100 gramos

de materia húmeda (g/100 g m. h.). Es importante destacar que el notable valor biológico y nutricional de este pseudocereal está determinado, de manera fundamental, por la alta concentración y la excelente calidad de su matriz proteica.

Tabla 3

Composición nutricional de la quinua

Componente	Referencia			
	Li et al., (2021)	**Ponce de León et al., (2021)**	**Pereira et al., (2019)**	**Nowak et al., (2016)**
Humedad (% b.h.)	10,86	9,79	9,53	10,10
Cenizas (% b.s.)	2,44	3,07	2,70	3,30
Proteínas (% b.s.)	13,51	17,27	14,87	13,10
Grasas (% b.s.)	6,48	6,76	6,40	5,70
Carbohidratos (%b.s.)	57,19	70,81	76,13	59,90

Nota. La variabilidad observada en los componentes proximales, especialmente en los rangos de proteína (13,10% a 17,27%) y cenizas (2,44% a 3,30%), se atribuye directamente a factores como el genotipo del pseudocereal, las condiciones edafoclimáticas del cultivo y las zonas geográficas de origen analizadas por cada investigador. Esta recopilación de datos internacionales sirve como línea base para contrastar el comportamiento químico de la quinua local antes de someterla al proceso biológico de germinación en la presente investigación. Elaboración propia a partir de las fuentes citadas.

La quinua es conocida a nivel mundial por su alto valor nutritivo y, además, la mayoría de sus tipos no contienen gluten, lo que la convierte en una excelente opción para quienes son intolerantes a este componente. Posee una combinación singular de proteínas, grasas, aceites y almidón. La cantidad promedio de proteína en los granos es del 16%, aunque puede alcanzar hasta el 23%, lo que representa más del doble que en otros granos. Asimismo, la proteína presentaba casi el porcentaje de la FAO establecido para la nutrición humana, por lo cual la NASA considera que la quinua se desarrolla como un posible candidato para sistemas orgánicos cerrados y viajes espaciales prolongados (Foods, 2021).

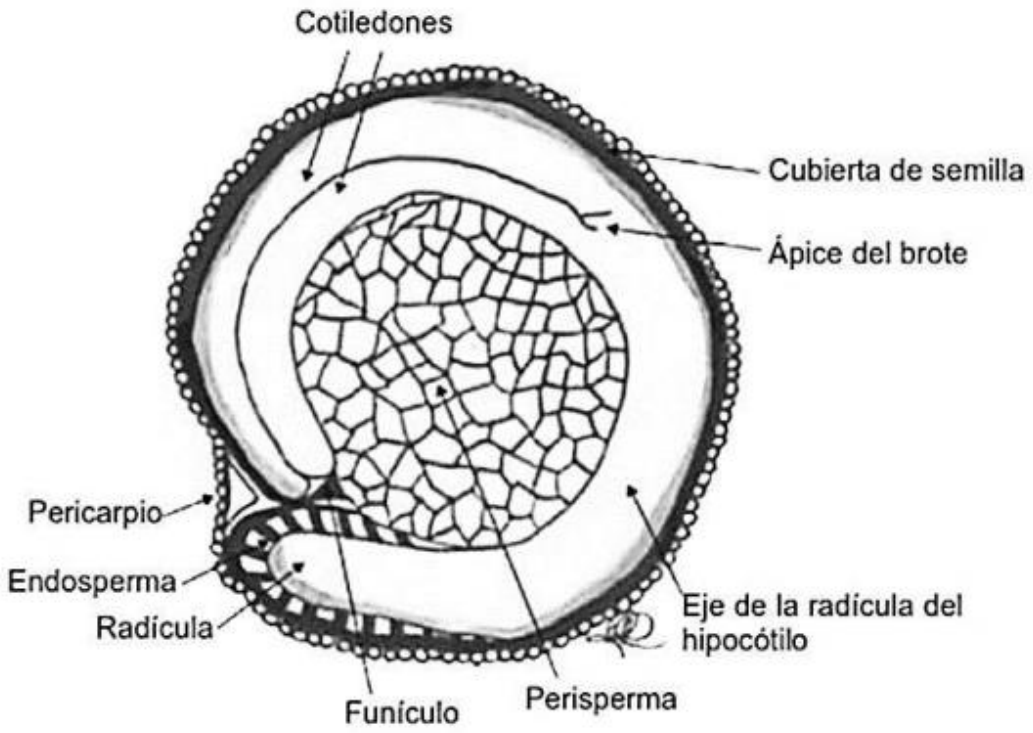
1.2.3. Estructura morfológica de la quinua

La estructura morfológica de la semilla de quinua se encuentra delimitada externamente por el pericarpio. En su interior, alberga un embrión constituido por el eje

hipocótilo-radícula y dos cotiledones, los cuales representan cerca del 30% del volumen total del grano. Asimismo, el endospermo está conformado por una o dos capas celulares que rodean al perispermo; esta última región actúa como el principal tejido de reserva de almidón, posee paredes celulares delgadas y constituye aproximadamente el 40% de la arquitectura del grano (Pardo y Holopainen-Mantila, 2020).

Figura 2

Morfología del grano de quinua



Nota. Anatómica estructural y secciones principales del grano de quinua variedad blanca. Adaptada de Caracterización Fenotípica de 402 accesiones de Quinua, por W. Rojas, 2021, Proyecto Granos Andinos.

1.2.4. Variedades de la quinua

La región andina alberga la mayor diversidad genética de quinua, abarcando tanto poblaciones silvestres como cultivares domesticados, lo que dificulta precisar el número total de variedades existentes. No obstante, Perú y Bolivia concentran los bancos de germoplasma más importantes, custodiando un aproximado de 2000 ecotipos (Repo-Carrasco, 1998). Mientras que en Bolivia predomina el cultivo de la variedad Sajama, en el territorio peruano sobresalen las variedades Kanccolla y Blanca Junín (Repo-Carrasco, 1998). En concordancia con ello, la presente investigación se ejecutó utilizando la variedad Blanca Junín, un cultivar originario y producido predominantemente en la región central del Perú. Este ecotipo se caracteriza por

presentar un ciclo fenológico tardío que oscila entre los 180 y 200 días; morfológicamente, posee semillas de tonalidad blanca y tamaño intermedio, además de un bajo contenido de saponinas que la define técnicamente como una variedad semidulce.

Según datos ofrecidos por el Instituto Nacional de Innovación Agraria, se han presentado a los agricultores a nivel nacional siete variedades mejoradas de quinua, que satisfacen las necesidades tecnológicas de las regiones productoras del país. Estas variedades son sobresalientes debido a su producción, calidad del grano, resistencia a enfermedades y plagas, y por sus atributos agroindustriales. Entre estas se encuentran la quinua salcedo INIA, quinua INIA 415 Pasankalla, quinua IIIpa INIA, quinua INIA 420 Negra Collana, quinua INIA 427 Amarilla Sacaca, quinua INIA Quillahuamán y quinua INIA Altiplano (Fundeagro, 1990).

1.2.4.1. Quinua blanca

Se ubican en la zona del altiplano a alturas que varían entre 3800 y 3950 metros, así como en los valles interandinos y la costa en altitudes que oscilan entre 640 y 1314 metros. El ciclo de crecimiento de las plantas dura 150 días en el altiplano, 135 días en los valles interandinos y 120 días en la costa. La altura de la planta oscila entre 1,48 m y 1,70 m, sin presentar ángulos en la disposición del tallo. Durante la fase de floración, las hojas y la panoja muestran un color verde, mientras que la episperma presenta un color blanco (Apaza et al., 2013).

1.2.4.2. Quinua negra

Se desarrolla a altitudes que varían entre 3800 y 3900 metros en la región del altiplano, y también es capaz de adaptarse a los valles interandinos y a la costa de Perú, en un ambiente caracterizado por un clima fresco y seco. Esta especie comprende 13 accesiones y muestra un ciclo vegetativo de 138 días en el altiplano, mientras que en los valles interandinos dicho ciclo se reduce a 115 días. La altura de la vegetación varía entre 1,20 y 1,30 metros, presentando un tallo sin ángulos. Durante el periodo de floración, tanto las hojas como la panoja exhiben un color verde, mientras que la episperma presenta un brillo negro (Apaza et al., 2013).

1.2.4.3. Quinua roja

Apaza et al. (2013) señalan que el desarrollo fenológico de la quinua varía sustancialmente según el piso ecológico donde se cultive: en la región del altiplano se

produce a altitudes de 3800 a 3900 metros con un ciclo biológico de 144 días; en los valles interandinos se establece entre los 2750 y 3750 metros requiriendo 120 días; mientras que en la franja costera se adapta desde los 640 hasta los 1314 metros, completando su crecimiento en apenas 105 días. En términos morfológicos, el espécimen alcanza una altura promedio de 1,30 a 1,40 metros y desarrolla un tallo de geometría angulosa. Durante la etapa de floración, tanto el follaje como la panoja exhiben una coloración verde, en contraste con la episperma de la semilla que manifiesta una tonalidad característica de color vino oscuro.

1.2.5. Factores anti nutricionales

Los factores antinutricionales se definen como metabolitos secundarios de naturaleza no fibrosa sintetizados por las especies vegetales como mecanismo de defensa biológica contra fitopatógenos, insectos y depredadores. De acuerdo con Morón (2001), estas sustancias reducen el valor biológico de los alimentos, principalmente de las semillas, debido a que interfieren, quedan o impiden la absorción de nutrientes esenciales. Desde una perspectiva bioquímica, poseen estructuras altamente heterogéneas y son capaces de desencadenar respuestas fisiológicas adversas en el organismo, tales como distensión abdominal, flatulencias, disfunciones pancreáticas, aglutinación de eritrocitos y una disminución crítica en la digestibilidad y aprovechamiento metabólico de la dieta, especialmente bajo escenarios donde la planta ha sufrido estrés abiótico o ambiental. En la quínua, el compuesto antinutricional que se encuentra es la saponina.

1.2.6. Producción de la quinua

Desde 1998, Perú se convirtió en el principal productor mundial, a excepción de los años 2001, 2012 y 2013, cuando la producción de Bolivia fue superior a la de Perú. En el año 2016, Perú aportó el 53,3% del volumen total producido.

La producción de quinua en el país en 2016 fue de 79,3 mil toneladas, lo que muestra una reducción del 25% respecto a la producción de 2015, que fue de 105,7 mil toneladas. Esta disminución se debe a los efectos del cambio climático, a la caída de precios, tanto en el ámbito nacional como internacional, y a una cosecha inferior en Arequipa y Lambayeque. Sin embargo, la producción se sostuvo por encima de los niveles alcanzados en 2013, el año del AIQ.

En 2016, la región que más quinua produjo fue Puno, con una cantidad de 35,166 toneladas, lo que representó el 44,4% de la producción total del país. Después de esta

región, se encuentran los departamentos de Ayacucho (21%), Apurímac (8,1%), Cusco (5%) y Junín (4,8%) (Montero y Armando, 2017).

1.2.7. Productos derivados y potencial industrial de la quinua

El potencial industrial de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) ha experimentado un crecimiento exponencial en la última década, transitando de un consumo tradicional en grano hacia su transformación en ingredientes funcionales e insumos de valor agregado para la industria alimentaria moderna. Esta versatilidad se fundamenta en sus excepcionales propiedades tecnofuncionales, como la capacidad de gelatinización de sus almidones de gránulo pequeño, la solubilidad de sus proteínas y su aptitud para sistemas viscoelásticos, las cuales permiten su adaptabilidad a procesos hidrotérmicos y mecánicos de alta exigencia.

Dentro de las principales líneas de transformación y derivados industriales desarrollados a partir de este pseudocereal se destacan:

a) **Harinas refinadas, integrales y modificadas**: Constituyen la base para la sustitución de gluten en la industria de la panificación, galletería y pastas. La optimización técnica de estas harinas incluye tratamientos térmicos o biológicos (como la extrusión previa o la germinación) para modificar la viscosidad de las masas y mejorar la retención de gases.

b) **Alimentos expandidos (Snacks extruidos):** La quinua posee una excelente aptitud para los procesos de extrusión de alta temperatura y corto tiempo (HTST). Al ser combinada con fuentes ricas en almidón (como el maíz amarillo duro), genera matrices porosas con índices de expansión óptimos, texturas crujientes y una densidad nutricional superior a los bocadillos comerciales convencionales (Mendoza, 2024).

c) **Aislados y concentrados proteicos:** Mediante procesos de extracción alcalina y precipitación isoeléctrica, la industria aísla las globulinas y albúminas de la quinua. Estos aislados se emplean como agentes emulsionantes, espumantes y aglutinantes en la formulación de análogos cárnicos (*plant-based*) y bebidas funcionales hiperproteicas.

d) **Líneas de panificación funcional:** La incorporación de derivados de quinua en la panadería tecnificada (como el pan chabata o panes de molde) representa un eje comercial de gran interés. Estos productos buscan equilibrar la pérdida de volumen específica de las harinas sin gluten mediante el aprovechamiento de las proteínas

modificadas y azúcares simples derivados del grano germinado, logrando optimizar la reacción de Maillard y la palatabilidad.

La revalorización industrial de la quinua, especialmente a través del desarrollo de derivados basados en granos locales de la región de Ayacucho, no solo diversifica la oferta agroalimentaria global, sino que impulsa la economía de los pequeños productores andinos, consolidando la seguridad alimentaria mediante la innovación tecnológica gestada desde la academia.

1.3. GERMINADO

La germinación constituye una estrategia biotecnológica accesible y de bajo costo para el desarrollo de nuevos alimentos procesados con valor funcional. La demanda y el consumo de brotes e insumos germinados registran una tendencia al alza a nivel global, impulsados por investigaciones que corroboran sus múltiples propiedades saludables y preventivas (Moongngarm y Saetung, 2010). Desde una perspectiva bioquímica, este fenómeno fisiológico desencadena la activación y síntesis de novo de complejos enzimáticos de naturaleza hidrolítica. Estas enzimas promueven la movilización y degradación controlada de los sustratos de reserva almacenados en la semilla con el fin de proporcionar energía y componentes estructurales indispensables para las primeras etapas del desarrollo vegetal (Bedon *et al.*, 2013).

La germinación induce modificaciones sustanciales en la concentración y arquitectura molecular de macromoléculas como proteínas, carbohidratos y lípidos. Específicamente, las fracciones proteicas experimentan una hidrólisis enzimática que eleva de forma paralela su índice de digestibilidad, lo que confiere a las harinas de quinua germinada un alto valor científico en el sector agroalimentario. No obstante, sus propiedades termodinámicas y valores calóricos asociados aún demandan una caracterización exhaustiva. De acuerdo con Radman (2006), el conocimiento preciso de estas propiedades térmicas es indispensable para el diseño de parámetros de procesamiento que aseguren la preservación de los estándares de calidad del alimento. En consecuencia, el análisis térmico provee información crítica sobre la estabilidad de la matriz durante el almacenamiento, la estimación de la vida útil y los cambios físico-químicos que ocurren en operaciones posteriores bajo altas temperaturas.

1.3.1. La germinación

Destaca como un método biotecnológico accesible y de bajo costo que optimiza las propiedades organolépticas, la digestibilidad y la biodisponibilidad de micronutrientes en cereales y pseudocereales (López-Martínez et al., 2017). Investigaciones enfocadas

en la optimización de este proceso en matrices de quinua y kiwicha evidencian transformaciones composicionales significativas, caracterizadas por incrementos en las fracciones de proteínas, fibra dietética total, fenoles libres y ligados, así como en la capacidad de inhibición de radicales libres (López-Martínez et al., 2017).

Paralelamente, se ha documentado que la brotación controlada estimula la acumulación de ácido gamma-aminobutírico (GABA) (Bravo et al., 2013; Morita et al., 2013; Zhang et al., 2014), un compuesto con efectos fisiológicos benéficos in vivo implicado en la regulación de la presión arterial y el ritmo cardíaco. En este contexto de procesamiento, la Asociación Americana de Químicos de Cereales (AACC) establece que los granos germinados conservan la categoría de grano entero debido a que retienen la totalidad de sus estructuras basales (salvado, germen y endospermo), bajo la condición técnica de que el desarrollo del brote no sobrepase la longitud de la semilla ni comprometa su densidad nutricional.

Tabla 4

Análisis proximal harina de quinua normal y germinada

Análisis	**HQN Contenido (g/100g muestra seca)**	**HQG Contenido (g/100g muestra seca)**
Proteína	18,5819	19,6801
Grasa	4,3398	4,5264
Cenizas	1,5892	1,7835
Fibra cruda	2,4694	2,2878
Carbohidratos	79,86	82,6814

Nota. En la tabla se muestra los carbohidratos se reportan según el valor directo del ensayo analítico; la suma total de los componentes presenta un excedente metodológico respecto al balance de masa teórico (100 g) por Tovar – Hernández (2017).

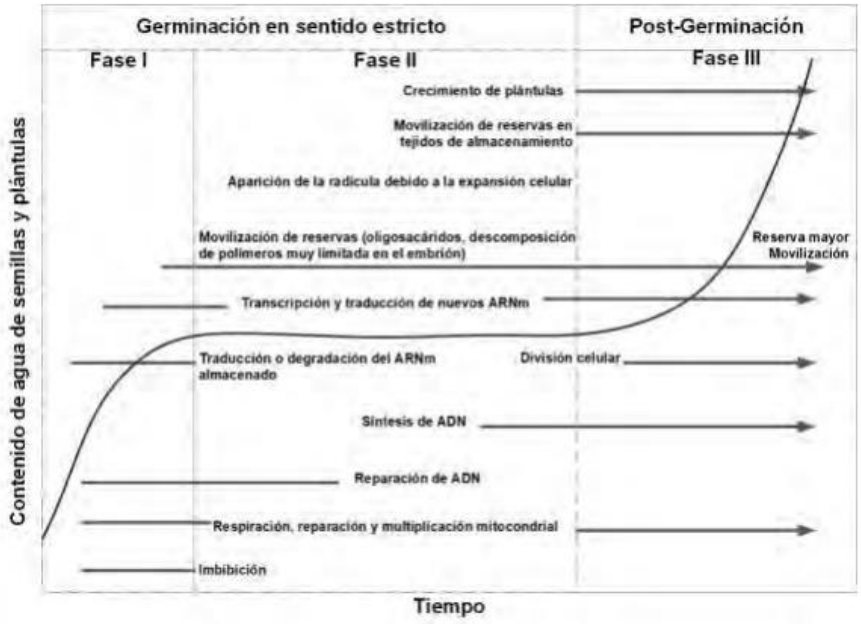
1.3.2. Proceso de germinación

La germinación de las semillas representa la transición fenológica más crítica en el ciclo ontogénico de un espécimen vegetal, un fenómeno que se activa mediante la imbibición hídrica y culmina formalmente con la emergencia de la radícula. De acuerdo con Biswas et al. (2019) y Lemmens et al. (2019), las múltiples transformaciones físicas y bioquímicas que se suscitan a lo largo de este evento fisiológico se categorizan

estructuralmente en tres etapas secuenciales, las cuales se encuentran determinadas de forma directa por la cinética de absorción de agua que experimenta la semilla.

Figura 3

Fases del proceso de germinación



Nota. El gráfico describe las curvas cinéticas de absorción de agua divididas en tres fases analíticas por Lemmens et al., (2019).

Durante la etapa inicial (fase I), la semilla experimenta un choque hidrodinámico por imbibición que restablece el volumen celular interno. En la fase II, la tasa de absorción de agua disminuye drásticamente, abriendo paso a una intensa actividad metabólica interna enfocada en la biosíntesis de macromoléculas y la movilización de reservas energéticas; este periodo concluye estrictamente con la ruptura de las cubiertas por parte de la radícula. La transición a la fase III implica un consumo hídrico secundario y ascendente, el cual suministra la presión de turgencia requerida para la elongación del eje embrionario (Wolny et al., 2018).

1.3.2.1. Contenido de humedad mínimo para que ocurra la germinación

Cada categoría de planta necesita absorber un nivel mínimo de humedad para que se lleve a cabo el proceso de germinación. Se ha identificado que las semillas que poseen un elevado contenido proteico demandan un porcentaje de humedad superior en relación a aquellas que contienen cantidades reducidas de proteína. A continuación, se presentan ejemplos que evidencian esta afirmación (Azcón, 2017).

Tabla 5

Requerimientos de humedad crítica para la germinación

Cultivo	Contenido de humedad
Maíz (*Zea mays*)	30,5 %
Soya (*Glycine max*)	50,0 %
Remolacha (*Beta* spp.)	31,0 %
Algodón (*Gossypium* spp.)	50–55 %
Higuerilla (*Ricinus communis*)	32–36 %
Arroz (*Oryza sativa*)	32–35 %
Avena (*Avena sativa*)	32–36 %
Maní (*Arachis hypogaea*)	50–55 %

Nota. Los porcentajes definen el umbral hídrico crítico necesario en el embrión para transitar de la imbibición pasiva (Fase I) al metabolismo activo (Fase II). Las especies con alto contenido lipídico (como la soya y el maní) exhiben los requerimientos de humedad más elevados. Adaptado de Azcón (2017).

1.3.2.2. Efecto de la temperatura

La temperatura es considerada el factor ambiental de mayor criticidad en la regulación de la germinación, ya que actúa como el modulador cinético de las reacciones bioquímicas y enzimáticas que ocurren en el interior de la semilla (Weitbrecht et al., 2011).

Este parámetro físico ejerce un control directo sobre dos variables fundamentales del proceso: el porcentaje final de semillas germinadas y la velocidad de emergencia de la radícula. Desde la perspectiva fisiológica, el impacto de la temperatura se analiza a través de tres niveles críticos denominados temperaturas cardinales (Bewley et al., 2013).

En el contexto de la panificación y el desarrollo de harinas germinadas funcionales (como la harina germinada de granos o pseudocereales), el control de la temperatura durante la incubación es crucial. Una temperatura óptima no solo acelera el proceso físico, sino que maximiza la síntesis de novo de aminoácidos libres, reduce el contenido de factores antinutricionales (como los fitatos) y optimiza la hidrólisis controlada del almidón, mejorando las propiedades tecnofuncionales de la masa final (Lemmens et al., 2019).

1.3.2.3. Rango de temperaturas de germinación

La temperatura es el factor ambiental crítico más determinante en la cinética de la germinación de la quinua, ya que regula directamente la tasa de absorción de agua,

la respiración celular y la velocidad de las reacciones enzimáticas dentro del grano. Para este pseudocereal, el rango térmico óptimo para inducir una germinación biológicamente eficiente y nutricionalmente favorable se sitúa entre los 15 °C y 25 °C. Dentro de este espectro, el metabolismo de la semilla se activa de manera equilibrada, optimizando la biosíntesis de enzimas endógenas como amilasas y proteasas sin comprometer la integridad celular.

a) Temperatura mínima: Bajo este límite de temperatura, no se pueden ver los procesos de germinación de manera visual en un periodo de tiempo aceptable. Las temperaturas que son bajas, pero que están por encima del punto de congelación, no resultan fatales para las semillas (Soleil, 2003).

b) Temperatura máxima: Es la temperatura que excede la cual los procesos de germinación no funcionan y, por ende, no ocurre el crecimiento del embrión. A diferencia de la temperatura mínima, la temperatura máxima se puede establecer fácilmente, ya que las temperaturas que superan este límite dañan de forma irreversible las semillas. La única excepción son las semillas que entran en estado de latencia a altas temperaturas (Soleil, 2003).

c) Temperatura óptima: Es el valor o rango térmico específico en el cual la semilla alcanza la máxima eficiencia biológica. En este punto, la fluidez de las membranas lipídicas es ideal y la velocidad de las reacciones metabólicas es máxima, logrando una brotación uniforme y vigorosa en el menor periodo de tiempo disponible.

Esto puede definirse como la temperatura en la que se consigue el porcentaje máximo de germinación en el menor tiempo. Si representamos el rango de temperaturas donde ocurre la germinación como una línea (Soleil, 2003).

Tabla 6

Temperaturas cardinales de algunas semillas

Cultivo	Temperatura mínima (°C)	Temperatura óptima (°C)	Temperatura máxima (°C)
Arroz	10–12	30–37	40–42
Maíz	8–10	32–35	40–44
Trigo	3–5	15–31	30–43
Tomate	20	20–35	35–40
Soya	8	32	40

Nota. La temperatura es uno de los principales factores que condicionan la germinación y el crecimiento de las semillas, existiendo temperaturas mínimas, óptimas y máximas características para cada cultivo (FAO, 2011).

1.3.3. Cambios durante la germinación

El proceso germinativo constituye un fenómeno biológico complejo que demanda condiciones óptimas de humedad, temperatura y disponibilidad de oxígeno; variables que inducen una reconfiguración favorable en el perfil bromatológico del grano. Durante esta etapa, la activación de la enzima amilasa cataliza la hidrólisis del almidón hacia azúcares simples de alta digestibilidad. No obstante, la acumulación de estos carbohidratos solubles, sumada al incremento de la actividad de agua, eleva la susceptibilidad del grano al deterioro microbiológico por la acción de mohos, bacterias y levaduras. En paralelo, se registra una optimización en el valor biológico de las proteínas mediante la fragmentación de macromoléculas complejas en péptidos y aminoácidos libres, incrementando simultáneamente la concentración de aminoácidos esenciales. Respecto a la fracción lipídica, los triglicéridos se desdoblan en ácidos grasos libres. Adicionalmente, el metabolismo celular estimula la síntesis de novo de vitaminas (complejos A, B y E) y la biodisponibilidad de minerales esenciales como calcio, potasio, magnesio, hierro, selenio y zinc (Gómez, 2008).

Desde la perspectiva de las transformaciones de las macromoléculas de reserva, los cambios se sintetizan en los siguientes eventos moleculares:

- Despolimerización del almidón nativo en fracciones menores como dextrinas y maltosa, facilitando su posterior conversión en glucosa.
- Proteólisis controlada que segmenta las estructuras proteicas en oligopéptidos y aminoácidos individuales.
- Lipólisis que libera los ácidos grasos constituyentes de la matriz lipídica.
- Biosíntesis de compuestos antioxidantes antes ausentes en la semilla latente, tales como el ácido ascórbico o vitamina C (Gómez, 2008).

Por otra parte, la germinación ejerce un rol crítico en la inactivación y remoción de factores antinutricionales perjudiciales para la salud, como las hemaglutininas, el ácido fítico y los inhibidores de proteasas, los cuales comúnmente restringen la digestibilidad en las semillas y leguminosas. Mientras que los métodos culinarios convencionales requieren de tratamientos térmicos prolongados para su desnaturalización, la activación enzimática endógena durante el brotado logra mitigar eficientemente la presencia de estos compuestos.

Finalmente, es imperativo señalar que la preservación de la calidad biológica de las semillas postcosecha decrece de forma paulatina según el tiempo y el ambiente de conservación. Este atributo integral se compone de variables primarias, vinculadas de

forma directa con el vigor biológico, la viabilidad y el porcentaje de germinación; y variables secundarias, asociadas a las propiedades físicas macroscópicas como el peso específico, la humedad basal, la granulometría y la morfología del grano (Salinas et al., 2001).

1.3.4. Ventajas de los germinados

Los granos de cereales mantienen su viabilidad biológica en estado natural, lo que permite que sus brotes concentren compuestos bioactivos de alto valor para la salud humana, tales como complejos enzimáticos y vitaminas (Pamplona, 1995).

Por esta razón, el consumo de brotes ha cobrado gran relevancia en los últimos años como una alternativa nutricional emergente; de hecho, se catalogan como hortalizas de calidad superior o alimentos funcionales gracias a su densa matriz de aminoácidos, fibra dietética, oligoelementos, vitaminas y metabolitos secundarios como flavonoides y ácidos fenólicos (Paśko et al., 2009).

Desde una perspectiva fisiológica, las enzimas sintetizadas durante el proceso germinativo inician la degradación controlada de los almidones, lípidos y proteínas de reserva de la semilla. Este fenómeno bioquímico emula las fases iniciales del sistema digestivo humano, otorgándole a los brotes propiedades de alta digestibilidad y una asimilación metabólica eficiente (Russo et al., 2010).

Adicionalmente, su elevado valor nutricional en combinación con un bajo aporte calórico neto los convierte en ingredientes altamente recomendados para el diseño de regímenes dietéticos orientados al control y prevención de la obesidad (Russo et al., 2010).

1.3.5. Propiedades de los germinados

- Ayudan en el proceso de desintoxicación, purificación y eliminación de toxinas acumuladas en los tejidos o en la circulación sanguínea.
- Contribuyen a robustecer el sistema inmunológico.
- Funcionan como antioxidantes: neutralizan los efectos de los radicales libres.
- Proporcionan un impulso a la producción del páncreas.
- Fomentan la digestión, estimulan los procesos de regeneración, disminuyen la inflamación en el sistema digestivo y fortalecen los mecanismos internos del metabolismo.
- Potencian el funcionamiento del intestino, reducen el estreñimiento, revitalizan tanto el intestino como el microbiota intestinal, y facilitan la expulsión de gases y desechos.
- Se reducen los niveles de colesterol.

- Fortalecen el sistema nervioso.
- Ayudan a preservar la flexibilidad de las arterias y el bienestar del sistema glandular.
- Retrasan el avance del envejecimiento.
- Estimulan el metabolismo a través de una acción revitalizante.
- Se recomienda consumirlo en situaciones de anemia por su elevado contenido de clorofila (Díaz et al, 2009).

1.3.6. Proceso para la germinación de granos de quinua

Se da a conocer el diagrama para obtener harina de quinua germinada, siguiendo los parámetros establecidos (Paucar, 2015).

1.4. HARINA

Desde una perspectiva puramente tecnológica, la harina se define como el polvo fino que se obtiene de la molienda gradual y sistemática del endospermo de granos de cereales limpios y sanos, principalmente del trigo (Triticum aestivum L.), tras la separación física del salvado y el germen (Cauvain & Young, 2016).

A nivel normativo e internacional, la Comisión del Codex Alimentarius (1985) en su norma mundial para la harina de trigo (Codex Stan 152-1985) expande este concepto dictaminando que es el producto elaborado con granos de trigo que ha sido sometido a procesos de limpieza y molienda hasta alcanzar un grado de finura específico. Asimismo, la legislación establece que, para ser considerada como tal, la harina comercializada para consumo humano directo debe mantener límites estrictos en su composición, tales como una humedad máxima del 15% m/m y un contenido de cenizas que refleje fielmente el grado de extracción del endospermo.

Si bien el término "harina" se asocia tradicionalmente al trigo debido a su rol histórico en la panificación, la evolución de la ciencia de alimentos y la demanda de productos funcionales han ampliado el espectro conceptual hacia las harinas no convencionales. Estas incluyen polvos finos procedentes de la molienda de:

- **Pseudocereales:** Como la quinua, el amaranto o el trigo sarraceno.
- **Leguminosas:** Como el tarwi, la soya o el garbanzo.
- **Raíces y tubérculos:** Como la yuca o la papa.

De acuerdo con Mesias et al. (2021), la diferenciación crítica entre la harina de trigo y las harinas no convencionales radica en su composición macroestructural. Mientras que la harina de trigo posee las proteínas formadoras de gluten (gliadinas y gluteninas) que confieren propiedades viscoelásticas únicas a la masa, las harinas

alternativas suelen carecer de esta red, pero son incorporadas en la industria debido a su densidad de micronutrientes, polifenoles y compuestos bioactivos ausentes en los cereales refinados.

El comportamiento de una harina dentro de una línea de producción (como la de pan de molde) está determinado por sus características proximales, las cuales se evalúan en base seca para garantizar la reproducibilidad de los ensayos. Los componentes principales que definen la funcionalidad de la harina son:

- **Almidón:** Representa entre el 70% y el 75% de la harina y actúa como la principal fuente de energía para las levaduras tras su hidrólisis parcial.
- **Proteínas:** Divididas en solubles (albúminas y globulinas) e insolubles (formadoras de gluten). Su porcentaje define la "fuerza" de la harina y su capacidad de retención de gas.
- **Cenizas:** Compuestas por el residuo mineral del grano. Un mayor contenido de cenizas usualmente denota una harina menos refinada, con mayor presencia de las capas externas del grano (salvado), lo cual incrementa el valor nutricional, pero altera los atributos reológicos de las masas (Badui, 2019).

1.4.1. Harinas compuestas

La sustitución parcial o total de la harina de trigo en la panificación es una de las áreas de mayor investigación en la ciencia de los alimentos. Esto se debe principalmente a la búsqueda de mejoras nutricionales (incrementar fibra, proteínas o antioxidantes) y a la creciente demanda de productos libres de gluten. Sin embargo, el principal desafío radica en las propiedades de la masa. La harina de trigo contiene gluten, la red proteica responsable de la elasticidad, extensibilidad y retención de gases durante la fermentación. Al diluir o eliminar esta proteína, se altera el comportamiento reológico de las masas y la textura final del pan.

El término "harinas compuestas" fue creado en 1964 por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Surgió bajo la necesidad global de buscar alternativas viables para los países en vías de desarrollo que no producían trigo de forma nativa, permitiéndoles reducir su dependencia de las importaciones mediante el uso de cultivos locales.

1.4.2. Harina de quinua germinada

La aplicación de tratamientos térmicos optimiza las propiedades tecno-biofuncionales de la quinua (*Chenopodium quinoa*), facilitando su integración en

procesos industriales estándar para la elaboración de productos alimenticios tradicionales y formulaciones especializadas. Paralelamente, el proceso biológico de germinación destaca como una estrategia idónea para potenciar el valor nutricional y maximizar la asimilación biológica de los componentes de este cultivo andino. De este modo, la incorporación de harinas provenientes de granos germinados y procesados térmicamente abre nuevas oportunidades en el sector de alimentos funcionales, dirigidos especialmente a nichos de mercado con necesidades dietéticas específicas, tales como consumidores vegetarianos o celíacos (Repo-Carrasco-Valencia & Vidaurre-Ruiz, 2019).

1.5. PRODUCTOS DE PANIFICACIÓN

La incorporación de granos germinados en la industria de la panificación optimiza significativamente el perfil nutricional de los productos terminados, otorgándoles una elevada actividad biológica y garantizando una mayor estabilidad en las matrices de los granos (Singh & Sharma, 2017). Tanto los granos modificados biológicamente como sus harinas derivadas constituyen materias primas idóneas para el diseño de alimentos especializados con un alto valor añadido. Este comportamiento se atribuye a que el proceso de germinación estimula la síntesis de novo de diversos compuestos bioactivos promotores de la salud, consolidándose además como una alternativa viable para la sustitución parcial de las proteínas convencionales del trigo (Afify et al., 2012; Singh & Sharma, 2017).

En este contexto, Paucar-Menacho (2017) sostiene que la tecnología de germinación abre un abanico de oportunidades orientadas a elevar la calidad nutricional y fomentar el bienestar del consumidor final mediante el aprovechamiento de las propiedades endógenas del grano. De manera particular, investigaciones previas han respaldado el excepcional valor biológico y nutricional de cultivos andinos como la quinua (Chenopodium quinoa) y la kiwicha (Amaranthus caudatus) (Repo-Carrasco-Valencia et al., 2010). La inclusión de estos pseudocereales contribuye a mitigar las deficiencias dietéticas asociadas a la baja ingesta de proteínas de origen animal y minerales críticos como el calcio y el hierro (Berganza et al., 2003; Bressani, 1994; Repo-Carrasco et al., 2003).

1.5.1. El pan

Desde una perspectiva fisicoquímica, el pan se define como un sistema coloidal complejo y poroso, obtenido a partir de la cocción de una masa fermentada que se

compone fundamentalmente de harina de trigo, agua, cloruro de sodio y levadura (Saccharomyces cerevisiae) (Cauvain, 2015).

Durante el proceso de horneado, esta matriz sufre una transición de fase irreversible donde la masa fluida y viscoelástica se transforma en un sólido elástico con estructura de esponja, caracterizado por una miga alveolar y una corteza exterior deshidratada. A nivel normativo, la Comisión del Codex Alimentarius y las legislaciones alimentarias internacionales tipifican al pan como el producto perecedero resultante de la cocción de la masa de harina de cereales, adicionada o no de otros ingredientes o aditivos alimentarios permitidos. Para el caso específico del pan común, la regulación exige que mantenga un balance de humedad controlado (usualmente inferior al 40%) para preservar su estabilidad estructural a corto plazo.

1.5.2. Variedades de pan

La tipificación y caracterización de la amplia variedad de productos panificados se estructuran formalmente a partir de tres variables fundamentales: la naturaleza y origen del grano empleado, la tecnología de procesamiento aplicada y el gramaje o masa del producto terminado (Quintana, 2020).

1.5.2.1. Materia prima para elaborar pan

- **Harina de trigo**

La harina de trigo es el insumo derivado de la molienda del grano de este cereal. Al combinarse con agua, sus proteínas insolubles interactúan para constituir el gluten, una red viscoelástica que confiere a la masa la capacidad estructural de retener los gases de la fermentación, optimizando así el volumen y la esponjosidad del producto horneado. Por consiguiente, la concentración proteica de la harina es un factor crítico que determina su aptitud industrial: las harinas duras, con un rango de proteína del 10% al 13%, son idóneas para la panificación debido a su fuerza estructural, mientras que aquellas con valores entre 7.5% y 10% se catalogan como harinas blandas, empleadas específicamente en la manufactura de galletas y repostería fina (Edel & Rosell, 2007)

Aporta las proteínas insolubles (gliadinas y gluteninas) que, al hidratarse y someterse a trabajo mecánico (amasado), forman la red viscoelástica conocida como gluten. Esta red es la responsable de la retención del dióxido de carbono (CO_2) generado durante la fermentación, determinando el volumen final y la esponjosidad del producto (Badui, 2019).

- **Agua**

Actúa como un componente crítico en las etapas de unificación, fermentación, palatabilidad y conservación del producto terminado. Su presencia disuelve de forma homogénea los insumos secos e hidrata los gránulos de almidón, un proceso que al integrarse con el gluten dota a la matriz viscoelástica de propiedades de plasticidad y elasticidad indispensables (Edel & Rosell, 2007).

- **Sal (Cloruro de Sodio)**

Más allá de potenciar el perfil sensorial, interviene como un agente regulador de la cinética fermentativa, optimiza la plasticidad de la masa e incrementa la retención hídrica de la harina (Callejo, 2002). Asimismo, influye en la coloración y finura de la corteza debido al aumento de la higroscopicidad superficial, al mismo tiempo que restringe el desarrollo de bacterias acidificantes y modera el consumo de azúcares por parte de las levaduras (Callejo, 2002).

- **Levadura**

Este agente biológico genera compuestos metabólicos que modifican las estructuras de las proteínas del gluten, consolidando las paredes alveolares que confinan el dióxido de carbono generado (Varela et al., 1991). Un decremento en la fermentación interrumpe este balance y provoca una pérdida de elasticidad; no obstante, la plasticidad se adquiere mediante la ruptura controlada de enlaces intermoleculares sin alterar la continuidad longitudinal del gluten. Adicionalmente, sintetiza alcoholes que definen el aroma y sabor del pan (Varela et al., 1991).

- **Mejoradores**

Constituyen aditivos formulados para optimizar las propiedades organolépticas y reológicas de la harina, incidiendo positivamente en atributos como la pigmentación, la actividad enzimática endógena y las características plásticas de la masa (Varela et al., 1991).

- **Materia grasa**

Funciona como un agente emulsionante y lubricante de la masa, promoviendo una textura crujiente y una miga suave (Varela et al., 1991). Su adición favorece la extensibilidad del sistema, lo que se traduce directamente en un incremento del volumen específico del pan durante el horneado (Varela et al., 1991).

- **Azúcares**

Es el carbohidrato de mayor uso industrial, cuya función principal es servir como sustrato energético para el metabolismo de las levaduras (Callejo, 2002). Paralelamente, acelera el pardeamiento de la corteza y otorga propiedades higroscópicas que favorecen la retención de humedad en la miga (Callejo, 2002).

1.6. CONTROL DE CALIDAD PARA EL PAN

El control de calidad en la industria de la panificación peruana abarca la evaluación de parámetros sensoriales, fisicoquímicos y microbiológicos esenciales para garantizar tanto la aceptabilidad comercial como la inocuidad alimentaria. Este sistema está regido por normativas de carácter obligatorio (normas sanitarias) y directrices de calidad recomendadas por el Instituto Nacional de Calidad (INACAL).

a) Calidad Organoléptica y Atributos Físicos

De acuerdo con las directrices del INACAL, plasmadas en normativas específicas como la NTP 106.004 (para pan francés y variedades) y la NTP 206.004 (específica para pan de molde blanco e integral), los productos terminados aptos para la comercialización deben cumplir rigurosamente con los siguientes atributos:

- **Miga:** Debe exhibir una textura blanda, elástica y un patrón alveolar uniforme. Las migas excesivamente compactas o con oquedades irregulares denotan fallas críticas en los tiempos de fermentación o en el desarrollo mecánico de la red de gluten.
- **Corteza:** Debe presentarse uniformemente cocida, con tonalidades homogéneas que oscilan entre el beige y el marrón claro. Se prohíbe la comercialización de piezas que muestren excesiva palidez, superficies quemadas o agrietamientos severos debidos a un desbalance higroscópico.
- **Defectos Críticos:** El pan no debe expenderse si presenta una consistencia endurecida, quebradiza, deformaciones macroscópicas o contaminación física visible.

b) Parámetros Fisicoquímicos y Formulación Operativa

Los controles analíticos de laboratorio determinan la conformidad técnica de la harina modificada o funcional:

- **Control del cloruro de sodio:** La legislación y las buenas prácticas nacionales (NTP 106.004) dictaminan que el uso de sal en la formulación de la masa no debe exceder el 2% en base a la harina. Este control es crucial debido al impacto directo de la fuerza iónica de la sal en la tenacidad de las proteínas y en la regulación metabólica de la levadura.
- **Humedad y sólidos totales:** El pan terminado debe conservar un balance hídrico controlado (generalmente menor al 40% de humedad según el tipo de producto),

asegurando una estabilidad reológica óptima y mitigando la velocidad de endurecimiento de la miga por retrogradación del almidón.

c) Inocuidad y requisitos sanitarios obligatorios

A diferencia de las guías de calidad físicas del INACAL que son técnicas recomendables, los criterios de inocuidad y sanidad en el Perú son fiscalizables y de carácter obligatorio bajo la Norma Técnica de Salud Nº 088-MINSA/DIGESA-V.01 ("Norma sanitaria para la fabricación, elaboración y expendio de productos de panificación, galletería y pastelería"):

- **Criterios Microbiológicos:** Esta norma establece límites estrictos para la presencia de agentes patógenos e indicadores de deterioro microbiológico. Se evalúan recuentos máximos permitidos de *Mhoos y Levaduras* (factores de riesgo incrementados en panes adicionados con harinas germinadas debido al aumento de azúcares libres), así como la ausencia estricta de *Salmonella sp.*, *Staphylococcus aureus* y *Bacillus cereus*.
- **Aseguramiento de la Calidad (BPM y HACCP):** Toda planta procesadora o panadería industrial en el territorio nacional debe fundamentar sus operaciones bajo un manual de Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) y la implementación de un Plan de Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control (HACCP). Esto asegura el monitoreo constante de los peligros físicos, químicos (como micotoxinas en cereales) y biológicos desde la recepción de la materia prima (harinas) hasta el almacenamiento del pan de molde.

1.7. SUSTITUCIÓN

La sustitución de ingredientes en alimentos es una de las estrategias técnico-científicas más importantes de la industria alimentaria moderna. Consiste en reemplazar, de forma parcial o total, una materia prima tradicional por otra alternativa.

Esta práctica se fundamenta en tres pilares: la reformulación nutricional (reducir grasas, azúcares o alérgenos), la sostenibilidad económica (aprovechar materias primas locales o subproductos) y la innovación funcional (mejorar la textura, vida útil o digestibilidad).

1.7.1. Clasificación de la sustitución en alimentos según su propósito

La investigación científica clasifica la sustitución en la matriz alimentaria en cuatro grandes categorías:

a) Sustitución estructural (sustitución de harinas / tecnología de harinas compuestas)

La sustitución estructural de la harina de trigo por harinas de leguminosas, pseudocereales (como la quinua y el amaranto), raíces o tubérculos representa uno de los campos de innovación de mayor impacto dentro de la tecnología de harinas compuestas y la ciencia de los alimentos contemporánea. No obstante, este proceso conlleva desafíos reológicos y soluciones tecnológicas de alta complejidad (Benites & Martínez, 2021).

El principal desafío técnico de esta reformulación radica en que, al retirar parcial o totalmente el cereal base, se diluyen las proteínas formadoras de gluten (gliadinas y gluteninas), rompiendo la continuidad y la densidad de la red viscoelástica. Esta alteración degrada significativamente el comportamiento mecánico de la masa, lo que reduce su elasticidad y disminuye la capacidad de retención del gas (CO_2) generado durante las etapas de fermentación. Como consecuencia directa de esta deficiencia estructural, los productos horneados resultantes tienden a sufrir una pérdida crítica de volumen específico, dando lugar a migas densas, compactas y propensas a un endurecimiento acelerado.

(Ziobro et al., 2021) Para mitigar este detrimento y viabilizar el uso de harinas sucedáneas, la solución tecnológica común consiste en el codiseño de la matriz mediante la incorporación de aditivos funcionales como los hidrocoloides (destacando la goma xantana y la hidroxipropilmetilcelulosa - HPMC) o el uso de complejos enzimáticos específicos (como xilanasas y lipasas). Estos compuestos macromoleculares actúan de forma sinérgica dentro de la fase acuosa de la masa para mimetizar la red viscoelástica del gluten, regulando la disponibilidad de agua libre, estabilizando físicamente las celdas gaseosas frente al esfuerzo mecánico y restituyendo las propiedades alveolares indispensables para alcanzar el volumen y la suavidad del pan tradicional.

b) Sustitución de grasas

La sustitución de la fracción grasa en matrices alimentarias, orientada hacia la reducción del contenido calórico total y de ácidos grasos saturados, constituye una de las estrategias de reformulación más demandadas en el diseño de alimentos saludables. Este mecanismo se ejecuta mediante la incorporación de miméticos moleculares, entre los que destacan ingredientes basados en carbohidratos (tales como gomas, almidones modificados e inulina) o proteínas microparticuladas de suero lácteo o soya.

Tal como sostienen Sánchez y Torres (2023), la eliminación de los lípidos introduce un severo desafío técnico debido al rol multifuncional que cumple la grasa en el sistema. Los lípidos no solo aportan palatabilidad, lubricación y textura, sino que actúan como solventes y transportadores de compuestos aromáticos lipofílicos, modulando su liberación temporal durante la masticación. Consecuentemente, su remoción suele provocar una pérdida drástica de la sensación cremosa en boca (mouthfeel) y acelera una liberación descontrolada y volátil de los aromas, mermando el perfil sensorial global del producto y su aceptabilidad.

Para resolver esta deficiencia, la solución tecnológica común se basa en el desarrollo y adición de sistemas coloidales complejos que atrapan agua libre y simulan con precisión la viscosidad y los coeficientes de fricción cinemática de los glóbulos grasos nativos. Estos sistemas, frecuentemente estructurados como hidrogeles complejos o emulsiones Pickering estables, actúan confinando mecánicamente las moléculas de agua dentro de una red polimérica híbrida. Al ser sometidos al esfuerzo de cizalla e hidratación en la cavidad oral, emulan el comportamiento tribológico y de deslizamiento de las gotas de aceite microscópicas, restituyendo la cremosidad, la reología y prolongando la retención de los aromas volátiles en el alimento reformulado (Zheng & Brennan, 2025).

c) Sustitución de azúcares (edulcorantes y agentes de carga)

La sustitución de la sacarosa en matrices alimentarias, orientada al desarrollo de productos con bajo índice glucémico y reducidos en calorías, constituye uno de los ejes más complejos de la reformulación industrial. Este mecanismo se ejecuta habitualmente mediante el reemplazo de la sacarosa por edulcorantes intensos (como los glucósidos de esteviol de la estevia o la sucralosa) o por polioles de bajo valor calórico (como el eritritol y el xilitol).

No obstante, esta transición introduce un severo desafío técnico, dado que el azúcar cumple roles fisicoquímicos que trascienden el mero aporte del estímulo dulce. En primer lugar, la sacarosa actúa como un agente de carga fundamental que influye directamente en la termodinámica del sistema; al competir por el agua libre, ejerce un efecto protector sobre los gránulos de almidón, lo que eleva su temperatura de gelatinización y modula la flexibilidad de la miga durante el horneado. Asimismo, posee una elevada higroscopicidad que le permite retener humedad, previniendo la sinéresis y controlando la actividad de agua (a_w) para extender la vida útil del producto. Finalmente, la estructura química de los azúcares reductores (o los productos de la hidrólisis de la sacarosa) contribuye de forma crítica al desarrollo del color, aroma y

palatabilidad mediante las reacciones de Maillard y la caramelización inducidas por el calor. Su ausencia, por ende, produce estructuras colapsadas, texturas excesivamente duras o gomosas, y superficies pálidas carentes de los compuestos volátiles característicos (Gao & Brennan, 2024).

Para mitigar estas deficiencias macroestructurales, la solución tecnológica común consiste en el codiseño tridimensional de la matriz, combinando edulcorantes de alta intensidad con agentes de carga no calóricos de elevado peso molecular, tales como la polidextrosa, la inulina u otras fibras solubles. Estas macromoléculas sustituyen las funciones físicas de la sacarosa al recuperar el volumen aparente perdido, reconfigurar la viscosidad de la masa y restituir la retención de agua. Al estabilizar la viscosidad de empaste y regular la temperatura de transición de fases térmica, estos agentes de carga híbridos simulan la resistencia mecánica y la plasticidad de la matriz original, logrando que el producto horneado reformulado mantenga la porosidad de la miga, la cinética de cocción y la aceptación sensorial requeridas.

d) Sustitución de proteínas

La sustitución de proteínas de origen animal (como las derivadas de la carne, la leche o el huevo) por fuentes alternativas responde a la creciente demanda global de sostenibilidad alimentaria y a la consolidación de la transición proteica (McClements, 2020). Este mecanismo se fundamenta en la incorporación de proteínas de origen vegetal (tales como la soya, la arveja y el tarwi), micoproteínas o harinas de insectos, las cuales reducen drásticamente la huella hídrica y de carbono en comparación con los sistemas ganaderos tradicionales.

No obstante, esta transición enfrenta un riguroso desafío técnico de naturaleza molecular y nutricional. Las proteínas de origen animal son macromoléculas altamente adaptadas que poseen propiedades gelificantes, emulsionantes y espumantes sumamente eficientes bajo tratamientos térmicos, debido a su flexibilidad estructural y balance hidrofóbico/hidrofílico nativo. Estas propiedades son fundamentales para la retención de agua, la estabilización de grasas y la formación de redes tridimensionales elásticas en el alimento. Adicionalmente, las fuentes animales ostentan un perfil de aminoácidos completo y una elevada digestibilidad proteica (puntuación DIAAS), mientras que las proteínas vegetales individuales suelen carecer de aminoácidos esenciales específicos y presentan estructuras globulares rígidas difíciles de desplegar (Osen & Schweiggert-Weisz, 2024).

Para superar estas limitaciones cinéticas y estructurales, la solución tecnológica común se despliega en dos frentes complementarios. En primer lugar, se aplican

procesos de extrusión de alta humedad (HME, por sus siglas en inglés), una tecnología de procesamiento térmico y mecánico que somete a las proteínas vegetales a fuerzas de cizalla intensas; esto desnaturaliza sus estructuras globulares nativas y las alinea en un dado de enfriamiento, logrando texturas fibrosas y masticables microestructuralmente análogas a las de la carne animal. En segundo lugar, el diseño de la formulación contempla la combinación estratégica de legumbres y cereales (por ejemplo, arveja o tarwi con trigo o arroz) (Torres-Gallo & Miranda, 2026). Esta mezcla binaria aprovecha la complementariedad de aminoácidos, donde los cereales aportan los aminoácidos azufrados (metionina y cisteína) deficientes en las leguminosas, y estas últimas suministran la lisina ausente en los cereales, logrando un perfil nutricional óptimo y restituyendo las interacciones iónicas e hidrofóbicas necesarias para la estabilidad coloidal del alimento.

1.7.2. Dinámica de las fracciones de almidón y proteínas

Cuando se introduce una harina sucedánea en una matriz de trigo, no solo se diluye el gluten, sino que se altera el balance entre las dos fracciones mayoritarias del grano: la amilosa y la amilopectina. Esta alteración redefine las propiedades de empaste y la vida útil del producto horneado:

- Las harinas de leguminosas o pseudocereales poseen un contenido de fibra dietética total (particularmente polisacáridos no amiláceos como pentosanos, celulosa y hemicelulosa) significativamente superior al de la harina de trigo refinada. Debido a su alta cantidad de grupos hidroxilo libres, estas estructuras moleculares compiten fuertemente por el agua disponible en la masa. Esto limita la hidratación completa de las pocas proteínas de gluteninas y gliadinas presentes, restringiendo el desarrollo óptimo de su elasticidad durante el amasado (Anggraeni & Grassi de Alcántara, 2024).
- Las harinas compuestas modifican la velocidad con la que el pan pierde su frescura. Almidones alternativos (como el de yuca o papa) ricos en amilopectina tienden a retrogradar más lentamente que el almidón de trigo. Esto ayuda a mantener la suavidad de la miga por más tiempo, contrarrestando el endurecimiento prematuro provocado por la falta de una red elástica de gluten.
- Al evaluar la masa compuesta en un viscosímetro como el *RVA (Rapid Visco Analyser)*, se observa que la adición de harinas sin gluten disminuye la viscosidad máxima de gelificación. Esto ocurre porque las proteínas ajenas al trigo actúan como barreras físicas que impiden que los gránulos de almidón se hinchen y rompan de manera uniforme durante la cocción.

La introducción de harinas sucedáneas altera profundamente la arquitectura tridimensional del gluten. No se trata de una simple mezcla pasiva; la sustitución provoca fenómenos físico-químicos e interacciones moleculares directas que reconfiguran las proteínas del trigo.

1.7.3. Alteración molecular e interferencia en la red de gluten

La formación del gluten es un proceso dinámico de polimerización loop-y-cadena que ocurre cuando las proteínas monoméricas de gliadina (responsables de la viscosidad y extensibilidad) y las poliméricas de glutenina (responsables de la elasticidad y fuerza) se hidratan y se someten a cizalla mecánica durante el amasado. Al incorporar harinas no convencionales, este sistema viscoelástico se ve afectado principalmente por tres mecanismos concurrentes:

- La adición de harinas libres de gluten reduce la concentración relativa de cisteína disponible por unidad de masa. Al haber menos moléculas de trigo, disminuye drásticamente la probabilidad de que los grupos sulfhidrilo (-SH) libres de las gluteninas interactúen entre sí para formar los puentes disulfuro covalentes intermoleculares. Esto trunca la polimerización de las macropolímeros de glutenina (GMP), dando como resultado una red discontinua, con hebras proteicas delgadas y estructuralmente frágiles que se rompen con facilidad bajo el torque mecánico del amasado (Ziobro et al., 2021).
- Las harinas sucedáneas, especialmente aquellas con alto contenido de fibra dietética insoluble o partículas de endospermo de mayor tamaño, actúan como filamentos rígidos extraños dentro de la masa. Estas partículas generan un impedimento estérico que interrumpe físicamente el flujo continuo de las láminas proteicas durante el estiramiento de la masa. Al interponerse mecánicamente, impiden que las gliadinas y gluteninas se alineen y cohecionen adecuadamente, limitando la viscoelasticidad global del sistema y fragmentando los poros que encapsulan el gas.
- Las globulinas y albúminas nativas de las harinas de leguminosas o pseudocereales, sumadas a sus polisacáridos no amiláceos, poseen una afinidad termodinámica por el agua muy superior a la de las proteínas del trigo. Al capturar y retener ávidamente el agua añadida a la formulación, estas macromoléculas alternativas privan al trigo de la humedad crítica requerida para iniciar el proceso de despliegue molecular. Sin suficiente agua libre, las cadenas hidrofóbicas del gluten permanecen compactas, lo que incrementa artificialmente el tiempo de desarrollo

de la masa (DT) medido en el farinógrafo pero reduce drásticamente su resistencia a la deformación a largo plazo.

1.7.4. Modificaciones en la textura y atributos físicos del pan

La inclusión de harinas sucedáneas altera las propiedades macroestructurales del pan a través de tres manifestaciones físicas críticas:

1.7.4.1. Pérdida de volumen y densidad de la miga

Al disminuir la capacidad de retención de gas (CO_2) de la masa por la dilución del gluten, las celdas de aire colapsan o se fusionan antes de que el almidón y las proteínas se fijen térmicamente durante el horneado. Esto reduce notablemente el volumen del pan (cm^3/g). La miga resultante pierde su esponjosidad característica, volviéndose significativamente más densa, compacta y con una distribución de alvéolos gruesa e irregular.

1.7.4.2. Incremento de la dureza y alteración del perfil de textura mechanical (tpa)

Mediante ensayos instrumentales de Análisis de Perfil de Textura (TPA), se constata que la sustitución eleva de forma lineal el parámetro de firmeza o dureza (fuerza máxima requerida para comprimir la miga). Simultáneamente, se registra una caída en la elasticidad (capacidad de la miga de recuperar su forma original) y en la cohesividad (grado de deformación que soporta la estructura antes de romperse). Esto genera una textura desmenuzable y seca al paladar.

1.7.4.3. Aceleración de la retrogradación y envejecimiento (*staling*)

La vida útil del pan se ve comprometida debido a que las harinas alternativas alteran la velocidad de reorganización molecular de la amilosa y amilopectina. Las harinas ricas en fibra insoluble aceleran la migración de agua desde la miga hacia la corteza, lo que provoca una rigidez prematura de la estructura polimérica y acorta el tiempo en que el pan permanece comercialmente fresco.

1.7.4.4. Impacto Sensorial: Color, Aroma y Palatabilidad

La corteza tiende a presentar tonalidades más oscuras debido a la mayor disponibilidad de azúcares reductores y aminoácidos libres (especialmente si se emplean harinas de leguminosas o pseudocereales germinados), lo que intensifica las reacciones de Maillard. La miga adopta colores característicos de la materia prima

adicionada (tonos grisáceos, verdosos o amarillentos), alejándose del blanco cremoso tradicional.

Las harinas compuestas introducen notas aromáticas ajenas al trigo. Las leguminosas pueden aportar un sabor ligeramente herbáceo o "a frijol" debido a la actividad de la enzima lipoxigenasa, mientras que los pseudocereales como la quinua transmiten notas terrosas o a nuez, requiriendo un control estricto del porcentaje de sustitución para no disminuir la aceptabilidad general del consumidor.

1.8. PAN CHABATA

El pan chabata (originalmente conocido en italiano como ciabatta) es una de las innovaciones más significativas de la panificación contemporánea. A diferencia de otros panes rústicos europeos cuyas recetas datan de varios siglos, la chabata fue desarrollada específicamente en 1982 en la provincia de Rovigo (región del Véneto, Italia) por el panadero y ciclista Arnaldo Cavallari, junto con el maestro panadero Francesco Favaron (Fierro, 2016).

(Cauvain y Young, 2016) El surgimiento de este pan respondió a una necesidad estrictamente comercial y de mercado: la industria panadera italiana observaba con preocupación cómo la baguette francesa monopolizaba el mercado de la elaboración de sándwiches y bocadillos debido a su idoneidad física.

Cavallari (1989) experimentó con harinas locales de alta fuerza y porcentajes extremos de agua hasta consolidar un pan plano y alargado cuya morfología recordaba a una zapatilla vieja (traducido al dialecto italiano como ciabatta). El producto fue registrado formalmente ese mismo año bajo la marca "Ciabatta Italia", expandiéndose rápidamente a nivel global como la matriz predilecta para la elaboración de sándwiches rústicos de estilo mediterráneo (panini).

La chabata se clasifica científicamente dentro de la categoría de masas de alta hidratación (masas blandas o fluidas). Sus propiedades estructurales e identitarias se dividen en los siguientes parámetros:

- **Tasa de hidratación extrema:** Mientras que un pan convencional utiliza entre un 55% y un 60% de agua respecto al peso total de la harina, la masa de la chabata incorpora desde un 70% hasta un 85% o incluso 90% de agua. Esta fluidez líquida redefine por completo la reología del sistema coloidal.
- **Miga altamente alveolada y húmeda:** Debido al exceso de agua libre y a los prolongados tiempos de reposo, el dióxido de carbono (CO_2) expande las celdas de

gas de manera masiva, generando alvéolos de gran tamaño, formas irregulares y una textura interna traslúcida y gelatinizada.

- **Ausencia de lípidos basales y uso de aceite de oliva:** Tradicionalmente, la fórmula carece de grasas sólidas (como manteca). La adición opcional de un 3% a 5% de aceite de oliva actúa como un agente emulsionante que aporta suavidad a la miga, extiende la vida útil del producto e incrementa su palatabilidad y perfil aromático.

- **Corteza fina y crujiente:** El choque térmico en el horno, combinado con la inyección de vapor de agua durante los primeros minutos de cocción, detiene la expansión y carameliza de forma óptima los azúcares residuales de la superficie, creando una corteza delgada, crujiente y de coloración bronceada.

Desde una perspectiva puramente biotecnológica, la manipulación de una masa tan líquida requiere de dos pilares metodológicos:

e) La fuerza de la harina (factor w):

Para soportar y retener un 80% de agua sin que la estructura de la masa colapse, es de carácter obligatorio el empleo de harinas de fuerza o harinas duras, las cuales poseen concentraciones de proteína de calidad panadera que oscilan entre el 12% y 14%. Una harina blanda o con un gluten débil sería incapaz de tejer la red viscoelástica necesaria, provocando la fuga del gas y un pan completamente aplanado y denso (Favaron, 2015).

f) El uso de la biga italiana

La verdadera chabata artesanal se fundamenta en un proceso de doble fermentación guiado por un prefermento de tipo biga. La biga es un prefermento firme y seco (comúnmente hidratado a solo un 45% o 50% con un 1% de levadura) que se deja madurar a temperaturas frescas (16 °C - 18 °C) durante un lapso de 16 a 24 horas.

g) Mecanismo de acción

Durante este tiempo de reposo prolongado, las levaduras y bacterias lácticas endógenas desarrollan una acidez controlada (reducción del pH), sintetizan ácidos orgánicos que refuerzan la tolerancia y la tenacidad del gluten, y liberan enzimas que potencian los aromas, el sabor característico del pan y retrasan la retrogradación del almidón (endurecimiento post-horneado).

h) Dinámica del Formado y Amasado

Debido a que la masa final posee una consistencia pegajosa y semilíquida, el desarrollo del gluten no se logra únicamente en la amasadora mecánica; se requiere la técnica de fermentación en bloque acompañada de pliegues (folds) sucesivos cada 20 o 30 minutos durante el reposo primario. Estos dobleces manuales estiran las cadenas de proteínas de forma pasiva, organizando mecánicamente la red estructural para atrapar el agua y el gas. Asimismo, la chabata pertenece a la familia de panes "sin formado" o panes cortados: una vez que la masa ha completado su fermentación en bloque, se vuelca suavemente sobre mesas saturadas de harina de trigo o sémola de trigo duro. La masa no se bolea ni se amasa nuevamente para evitar la desgasificación de los macroalvéolos; simplemente se corta mediante espátulas en porciones rectangulares y se transfiere de forma directa al horno bajo altas temperaturas (220 °C - 240 °C).

1.8.1. Presentación del pan chabata comercial

La presentación comercial del pan chabata (o ciabatta) en el mercado alimentario actual está determinada por sus características morfológicas externas, sus formatos de empaque y las especificaciones físicas requeridas para su distribución masiva o sectorizada. A diferencia de otros productos panificados, la chabata comercial debe conservar una identidad visual y táctil que el consumidor asocie de inmediato con la panificación artesanal mediterránea, incluso dentro de canales de distribución industrializada (Cauvain & Young, 2016).

Las principales modalidades de presentación y sus especificaciones técnicas comprenden los siguientes aspectos, el pan chabata se estandariza en dos dimensiones principales:

a) Chabata estándar

Piezas rectangulares o elongadas que oscilan entre los 150 g y 250 g, destinadas principalmente para el consumo familiar o el rebanado institucional.

b) Mini chabata o "ciabattina

Unidades individuales con un rango de peso de 60 g a 100 g, orientadas específicamente al sector de restauración, hotelería y la elaboración individual de sándwiches rústicos de consumo inmediato (panini).

Visualmente, el pan chabata comercializado debe presentarse con una superficie espolvoreada de manera homogénea con harina refinada o sémola de trigo duro. Este

acabado no solo cumple una función estética rústica, sino que previene el resecamiento prematuro de la corteza y evita que las piezas se adhieran entre sí durante el envasado o la exhibición en perchas (Favaron, 2015). La coloración externa debe mantener un tono dorado uniforme, con la ausencia estricta de quemaduras o zonas excesivamente pálidas que denoten fallas en la inyección de vapor de agua durante el horneado.

La industria panadera distribuye el pan chabata bajo tres esquemas tecnológicos definidos:

- **Fresco del día:** Producto horneado por completo y comercializado a granel en panaderías locales o áreas de autoservicio en supermercados dentro de las primeras 24 horas.
- **Precocido y congelado:** Es la presentación de mayor crecimiento comercial en las cadenas logísticas modernas. El pan se hornea de forma parcial (hasta fijar la estructura del gluten sin desarrollar color en la corteza), se ultracongela a -18 °C y se empaca. Esto permite que el punto de venta final realice un horneado de reactivación corto (5 a 8 minutos) para ofrecer un producto "recién horneado" con la frescura organoléptica intacta.
- **Empacado en atmósfera modificada (EAM):** Piezas completamente cocidas envasadas en películas plásticas con barreras de oxígeno elevadas, donde el aire interno es sustituido por mezclas de dióxido de carbono (CO_2) y nitrógeno (N_2). Esta presentación extiende la vida útil comercial en anaquel sin necesidad de aditivos químicos severos.

1.8.2. Ingredientes del pan chabata comercial

La receta es la siguiente: Harina de trigo, levadura, sal, agua y aceite (Heredia, 2023).

La formulación del pan chabata comercial se fundamenta en un sistema de ingredientes limpios (*clean label*) donde la calidad fisicoquímica de las materias primas sustituye la necesidad de aditivos químicos complejos. Sin embargo, para adaptar la receta artesanal a los requerimientos de la producción industrial y garantizar la estabilidad en anaquel, la panificación comercial estandariza los porcentajes de los ingredientes esenciales e incorpora aditivos tecnofuncionales específicos (Cauvain, 2015).

A continuación, se detallan los componentes e ingredientes autorizados en la elaboración de la chabata comercial basados en el porcentaje panadero (donde la harina representa el 100%):

- **Harina de trigo de alta fuerza (100%):** Es el ingrediente estructural primario. La chabata comercial exige de forma obligatoria harinas duras con un contenido de proteína que oscile entre el 12,5% y el 14,5% (o un índice de fuerza alveolar W superior a 300).

  Esta alta concentración de gliadinas y gluteninas es indispensable para tejer una red viscoelástica lo suficientemente tenaz para retener los volúmenes extremos de gas y agua sin que la masa colapse (Favaron, 2015).
- **Agua (75% - 85%):** Actúa como el agente plastificante del sistema coloidal. En la chabata comercial se utiliza agua potable fría (o controlada entre 4 °C y 8 °C mediante hielo en escamas) para contrarrestar el calentamiento por fricción durante los prolongados tiempos de amasado mecánico, manteniendo la temperatura final de la masa entre los 23 °C y 25 °C para no sobreactivar las levaduras de forma prematura.
- **Levadura comercial (*Saccharomyces cerevisiae*):** Se emplea principalmente en formato de levadura fresca prensada o levadura seca instantánea. Su dosificación se calcula rigurosamente para balancear la producción de dióxido de carbono (CO_2) entre la etapa de maduración de la biga (prefermento) y la fermentación final en bloque.
- **Sal refinada / Cloruro de sodio:** De acuerdo con las buenas prácticas y las normativas técnicas peruanas (como la NTP 106.004), la adición de sal está estrictamente topada al 2% como máximo respecto a la harina. Cumple un rol reológico crítico al neutralizar las repulsiones electrostáticas de las proteínas del gluten, incrementando la tenacidad de la masa líquida y controlando la tasa de consumo de azúcares por la levadura (Callejo, 2002).
- **Aceite de oliva virgen o extra virgen:** Es el único componente lipídico admitido en la chabata de calidad comercial. Actúa como un emulsionante natural que lubrica la red de gluten, otorgando una mayor extensibilidad a la masa fluidificada, suavizando la miga post-horneado y retrasando la retrogradación del almidón para prolongar la vida útil del pan envasado.
- **Extracto de malta o harina de malta diastásica:** Se añade de forma regular en las líneas comerciales para suministrar azúcares fermentables adicionales (maltosa y glucosa) y enzimas amilolíticas exógenas. Este ingrediente acelera la fermentación en matrices de alta hidratación y asegura el correcto pardeamiento no enzimático (Reacción de Maillard) en el horno para lograr una corteza delgada y crujiente de color bronceado.
- **Mejoradores e ingredientes tecnofuncionales comerciales:** En procesos automatizados a gran escala, se incorporan mezclas técnicas compuestas por:
  - *Ácido ascórbico (Vitamina C):* Actúa como agente oxidante para fortalecer los enlaces disulfuro del gluten, mejorando la retención de gas.

- *Alfa-amilasas y xilanasas fúngicas:* Enzimas que optimizan la flexibilidad de la masa y mejoran el volumen específico del pan.

1.8.3. Datos nutricionales del pan chabata comercial

El perfil nutricional del pan chabata comercial está determinado directamente por su formulación base (alta tasa de hidratación y empleo de harinas de fuerza) y por la ausencia de grasas saturadas de origen animal o azúcares añadidos en altas concentraciones. Desde la perspectiva bromatológica, al ser un producto elaborado con harina de trigo refinada de alto contenido proteico y aceite de oliva, exhibe una densidad calórica moderada y un aporte destacado de macronutrientes en comparación con otros panes industriales blandos (como el pan de molde convencional) (Zhou et al., 2014).

A continuación, se detalla la composición nutricional promedio del pan chabata comercializada por cada 100 gramos de producto terminado (base húmeda), de acuerdo con las bases de datos de composición de alimentos y tablas de etiquetado industrial:

- **Aporte Energético Total:** Una porción de 100 g de chabata aporta aproximadamente entre 260 kcal y 280 kcal (1088 - 1171 kJ). Este valor energético proviene principalmente de la fracción de carbohidratos complejos contenidos en el endospermo del trigo.
- **Carbohidratos:** Representan el componente mayoritario, oscilando entre 50 g y 55 g por cada 100 g de pan. El almidón es el carbohidrato predominante. Debido al proceso de horneado a altas temperaturas, una fracción de este almidón sufre gelatinización, lo que facilita su posterior hidrólisis enzimática en el tracto digestivo. Los azúcares simples residuales son mínimos (< 1,5 g), ya que la mayor parte es consumida por las levaduras durante las prolongadas etapas de fermentación (Biga).
- **Proteínas:** Debido al requisito obligatorio de utilizar harinas duras o de gran fuerza para soportar la alta hidratación, la chabata comercial posee un contenido proteico elevado para un cereal, situándose entre 8,5 g y 11 g por cada 100 g en base húmeda. No obstante, al ser proteínas de trigo (gliadinas y gluteninas), su valor biológico es limitado debido a la deficiencia del aminoácido esencial lisina.
- **Lípidos (Grasas totales):** El contenido de grasa es bajo y saludable, variando entre 2,5 g y 4,5 g por cada 100 g. Al emplearse exclusivamente aceite de oliva en la receta comercial genuina, el perfil lipídico está constituido mayoritariamente por ácidos grasos monoinsaturados (principalmente ácido oleico) y presenta niveles casi nulos de grasas saturadas o ácidos grasos *trans*.

- **Fibra Dietética:** Al ser elaborado con harina refinada (grano descascarillado), el contenido de fibra cruda o dietética es bajo, rondando los 1,5 g a 2,2 g por cada 100 g. Esto clasifica a la chabata tradicional como un alimento de bajo aporte de fibra, lo que genera un índice glucémico de moderado a alto.
- **Minerales y Cenizas (Sodio):** El contenido de cenizas totales varía entre 1.5% y 2.0%. El mineral predominante es el sodio, aportado por el cloruro de sodio de la receta, con valores que oscilan entre 400 mg y 550 mg por cada 100 g. Bajo el marco regulatorio peruano (Ley Nº 30021 de Promoción de la Alimentación Saludable), los niveles de sodio en el pan comercial deben ser monitoreados para evitar sobrepasar los límites que obligarían a la inclusión de advertencias publicitarias (octógonos nutricionales).

a) Pan chabata comercial MX

Línea de pan rústico precocido ultracongelado conteniendo: Harina de trigo fortificada, agua, aceite vegetal, levadura, sal, mejorador de masas (Ésteres mixtos acéticos y tartáricos de mono y diglicéridos de ácidos grasos, sulfato de calcio, goma guar, carbonato de calcio, ácido ascórbico y enzimas). Contiene gluten (trigo) (Pagnifique, 2022).

Tabla 7

Valor nutricional por porción 100 g

Componentes	Unidad	Cantidad
Energía	Kcal	260,3
Energía	KJ	1 101,66
Grasas totales	g	3,68
Grasas saturadas	g	0,50
Grasas trans.	g	0,26
Sodio	mg	532,38
Fibra dietaría	g	1,81
Azúcares totales	g	2,86
Proteinas	g	8,48
Hidratos de carbono disponible	g	48,31

Nota. Los valores analíticos corresponden a una porción de 100 gramos de muestra de pan chabata comercial en base húmeda por Pagnifique (2022).

1.9. CONTROL DE CALIDAD DEL PAN CHABATA

La caracterización integral y el aseguramiento de la calidad en matrices de panificación funcional exigen el monitoreo sistemático de sus propiedades

macroestructurales, perfiles nutricionales y atributos organolépticos. La interacción entre las harinas nativas y los insumos alternativos redefine las propiedades coloidales de la masa, impactando de forma directa en los parámetros fisicoquímicos, el rendimiento reológico y la aceptabilidad comercial del producto horneado (Cauvain & Young, 2016).

1.9.1. Parámetros físicos

El peso de pan se evalúa gravimétricamente antes y después del tratamiento térmico. Este parámetro permite determinar analíticamente el rendimiento de la masa y el porcentaje de pérdida de peso por horneado (rendimiento de panificación), el cual corresponde a la evaporación controlada de agua y compuestos volátiles en el horno (Callejo, 2002).

- **Contenido de humedad (Método de la Estufa AOAC 2005)**

La determinación de humedad se basa en la medición gravimétrica de la pérdida de masa por evaporación del agua libre, sometiendo la muestra a desecación en una estufa con circulación de aire a temperaturas controladas 105 ± 2 °C hasta alcanzar peso constante (AOAC, 2005). La humedad en el pan terminado (base húmeda) es un factor limitante que define la velocidad de endurecimiento de la miga debido al fenómeno de retrogradación del almidón. Asimismo, condiciona la actividad de agua a_w, parámetro que rige la estabilidad microbiológica frente a mohos y levaduras en anaquel.

- **Volumen (Método 10-05 de la AACC 2000)**

El volumen del pan es el indicador físico más importante de la capacidad de la masa para retener gases y expandir su estructura coloidal. El método oficial AACC 10-05 cuantifica el volumen mediante el principio hidrodinámico de desplazamiento volumétrico de semillas de colza o semilla de nabo (AACC International, 2000). Al dividir el volumen total cm^3 entre la masa del pan (g), se obtiene el volumen específico (cm^3/g). Un volumen específico elevado se asocia con una miga esponjosa y alveolada, mientras que valores bajos denotan el colapso de la red de gluten o una excesiva dilución proteica provocada por insumos alternativos.

- **Densidad del pan**

La densidad aparente de un producto de panificación es una propiedad física estructural macroscópica que define la relación entre la masa total de la pieza horneada y el volumen exterior ocupado por esta, incluyendo en el cálculo tanto la fase sólida continua (paredes celulares de la miga) como la fase gaseosa discontinua (alvéolos o

poros) (Scanlon & Zghal, 2001). A diferencia de la densidad real del sólido constituyente, la densidad aparente es el indicador directo del grado de aireación y expansión que experimentó la masa durante las etapas de fermentación y salto de horno.

1.9.2. Caracterización química

- **Determinación de proteína total (Método Kjeldahl AOAC 920.152)**

El contenido proteico es un indicador fundamental de la calidad estructural y nutricional en panificación. El método Kjeldahl (AOAC 920.152) constituye el estándar analítico para la cuantificación del nitrógeno orgánico total. El fundamento químico del ensayo comprende tres etapas secuenciales: una digestión ácida con H_2SO_4 concentrado y catalizadores para transformar el nitrógeno en sulfato de amonio; una destilación en medio alcalino para liberar amoníaco NH_3; y una titulación ácido-base para cuantificar el destilado (AOAC, 2005). En matrices de panes enriquecidos, este análisis permite evaluar el grado de enriquecimiento proteico y la dilución o fortalecimiento de la red viscoelástica del gluten.

- **Cuantificación de fibra cruda (Método Oficial AOAC 2005)**

La fibra cruda representa el residuo orgánico combustible e insoluble que permanece tras someter la muestra desgrasada a una digestión ácida H_2SO_4 seguida de una digestión alcalina NaOH bajo condiciones estandarizadas (AOAC, 2005). Este parámetro estima la fracción de celulosa, hemicelulosa y lignina no digeribles. Desde la perspectiva tecnológica, el contenido de fibra es crítico en el pan de molde o chabata, ya que su hidrofilia compite directamente por el agua libre de la masa, modificando la consistencia reológica, disminuyendo el volumen específico y alterando la elasticidad de la miga.

- **Determinación de hierro (Método Munsey con 1,10–Fenantrolina)**

La fortificación o enriquecimiento con minerales en panes funcionales se verifica analíticamente mediante métodos espectrofotométricos. El método de Munsey emplea el reactivo 1,10-fenantrolina tras un proceso previos de calcinación o digestión húmeda de la muestra. El fundamento químico radica en la reducción del hierro presente a su estado ferroso (Fe^{2+}), el cual reacciona de forma estequiométrica con tres moléculas de 1,10-fenantrolina para formar un complejo quelato de coloración rojo-anaranjada altamente estable, cuya intensidad es directamente proporcional a la concentración del mineral y se cuantifica mediante absorbancia óptica en la región visible.

1.9.3. Análisis sensorial mediante escala hedónica de 7 puntos

El análisis sensorial es una disciplina científica de alta precisión utilizada para evocar, medir, analizar e interpretar las reacciones humanas ante los estímulos percibidos por los sentidos de la vista, el olfato, el gusto y el tacto en una matriz alimentaria (Stone et al., 2020). Dentro de las pruebas afectivas, las escalas hedónicas constituyen la herramienta psicométrica más empleada a nivel industrial y de investigación para cuantificar el grado de aceptación, agrado o desagrado que un producto genera en un grupo de consumidores potenciales (Lawless & Heymann, 2010).

La escala hedónica de 7 puntos es un sistema de medición categórico discreto que transforma variables cualitativas psicológicas en datos cuantitativos continuos o semicontinuos, aptos para el análisis estadístico inferencial (como el Análisis de Varianza o ANOVA y pruebas de comparación de medias como Tukey) (Meilgaard et al., 2016). Estructuralmente, esta escala se compone de un número impar de categorías dispuestas simétricamente alrededor de un punto de neutralidad afectiva, distribuidas de la siguiente manera:

- **7:** Me gusta muchísimo (Aceptación máxima).
- **6:** Me gusta bastante.
- **5:** Me gusta ligeramente.
- **4:** Ni me gusta ni me disgusta (Punto neutro o de indiferencia).
- **3:** Me disgusta ligeramente.
- **2:** Me disgusta bastante.
- **1:** Me disgusta muchísimo (Rechazo máximo).

A diferencia de la escala tradicional de 9 puntos descrita originalmente por Peryam y Pilgrim en 1957, la variante de 7 puntos es altamente valorada en la evaluación de alimentos funcionales y panificación debido a su eficiencia psicométrica. Al reducir el espectro de opciones, disminuye significativamente la fatiga cognitiva del evaluador no entrenado (juez consumidor), evitando el sesgo de tendencia central y forzando una discriminación más clara y directa entre los atributos del producto (Villanueva & Da Silva, 2009).

En la formulación de líneas de panificación funcional basadas en harinas alternativas (como pseudocereales germinados o sustitutos parciales de trigo), la escala hedónica de 7 puntos resulta crítica para el control de calidad. Permite determinar el impacto real en la aceptabilidad de los atributos individuales (color de la corteza y miga, olor de fermentación, textura o firmeza en boca y sabor) e identificar el límite tecnológico

de sustitución antes de que el consumidor penalice sensorialmente el producto por alteraciones reológicas o notas de sabor amargas y astringentes (Lawless & Heymann, 2010; Stone et al., 2020).

1.10. DISEÑO ESTADISTICO

Para evaluar el efecto de la incorporación de las harinas funcionales sobre la matriz del pan chabata, los datos experimentales se procesarán de manera cuantitativa mediante un enfoque estadístico inferencial. El modelo matemático empleado corresponde a un Diseño Completamente al Azar (DCA) de efecto fijo. Las unidades experimentales (lotes de panificación) se asignarán de forma aleatoria a cada uno de los tratamientos bajo condiciones de laboratorio homogéneas y controladas, minimizando la interferencia de variables extrañas.

Es la estructura experimental más simple y fundamental en la investigación científica. Se define como aquel diseño donde la asignación de las unidades experimentales (por ejemplo, los lotes de masa o las piezas de pan horneadas) a los diferentes tratamientos se realiza de forma estrictamente aleatoria, sin restricción alguna (Montgomery, 2020). Este diseño es el estándar de elección cuando las condiciones ambientales del laboratorio y las materias primas basales son altamente homogéneas, asegurando que cualquier variación observada en las variables de respuesta se deba única y exclusivamente al efecto de los tratamientos bajo estudio y al error experimental inherente (Kuehl, 2001).

El modelo lineal aditivo que rige el diseño se expresa matemáticamente según la ecuación, y luego se someterán a una prueba de comparación de Duncan:

$$Yij = \mu\, i + Tj + Eij$$

Donde:

Yij = Respuesta observada en el i-ésimo tratamiento, j-ésima repetición.

μ = Efecto de la media general (factor constante). Es un parámetro.

τi = Efecto del i-ésimo tratamiento en la u.e. Es un parámetro único.

εij = Efecto de la j-ésima repetición (u.e.) sujeto al i-ésimo tratamiento. Error experimental (factor aleatorio) y es el efecto no controlado.

El diseño de investigación comprende un total de 6 tratamientos (k = 6) con 3 repeticiones por tratamiento (n = 3), consolidando una matriz experimental de 18 unidades de análisis independientes. Sobre estas unidades se ejecutarán tres bloques de evaluación analítica y el procesamiento analítico e interpretación de las variables

resultantes se ejecutó mediante el software estadístico IBM SPSS Statistics (versión 25.0).

El Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) es uno de los diseños experimentales más utilizados en la investigación agroalimentaria y biotecnológica cuando las unidades experimentales no son completamente homogéneas. Su principio fundamental radica en el control local de la variación, una estrategia metodológica que consiste en agrupar las unidades experimentales en estratos o "bloques" homogéneos. El objetivo primordial de este agrupamiento es aislar una fuente conocida de variabilidad extraña o secundaria que, de no controlarse, se sumaría al error experimental, reduciendo la sensibilidad y la potencia del análisis estadístico para detectar diferencias reales entre los tratamientos.

El término "completo" indica que cada bloque debe contener la totalidad de los tratamientos bajo estudio en una única réplica. Por su parte, la palabra "al azar" estipula que la asignación de los tratamientos a las unidades experimentales dentro de cada bloque específico debe realizarse de manera completamente aleatoria. En la evaluación sensorial de alimentos, el DBCA es el estándar de oro metodológico: debido a que cada ser humano posee umbrales psicofísicos, hábitos y sesgos perceptivos individuales, cada panelista entrenado es tratado estadísticamente como un bloque. Al hacer que cada juez evalúe todas las formulaciones de pan chabata, la variabilidad interpersonal se cuantifica y se remueve matemáticamente de la varianza del error.

1.10.1. Supuestos del modelo estadístico

El modelo estadístico debe cumplir con los siguientes supuestos:

- **Aditividad:** Los efectos del modelo son aditivos.
- **Linealidad:** Las relaciones entre los efectos del modelo son lineales.
- **Normalidad:** Los errores o residuales del modelo deben tener una distribución normal con media cero y variancia σ^2.
- **Independencia:** Los resultados obtenidos en el experimento son independientes entre sí.
- **Homogeneidad de variancias:** Las diferentes poblaciones generadas por la aplicación de los diferentes tratamientos tienen variancias iguales (σ^2) $\longrightarrow$ prueba de Bartlett mediante la prueba chi-cuadrado.

Tabla 8

Representación simbólica de las respuestas

Observaciones o número de repeticiones (j)	Tratamientos (i) 1	2	3 ..... t	Gran total o Total
1	y11	y21	y31 ... yt1	
2	y12	y22	y32 ... yt2	
3	y13	y23	y33 ... yt3	
4	.			
5	.			
.	.			
r	y1r	y2r	y3r ... ytr	
Totales	y1.	y2.	y3. ... yt.	Y..
Promedio o medias	$Y_{1.}$	$Y_{2.}$	Y_3 ... $Y_{t.}$	$Y_{..}$

1.10.2. Análisis de variancia o varianza (ANVA)

Variabilidad total = variabilidad tratamiento + variabilidad error

Las dos fuentes de variación (tratamiento y error) son comparadas mediante el siguiente procedimiento de prueba de hipótesis.

El ANOVA permite descomponer la variabilidad total de los datos en componentes asociados al efecto de los tratamientos y al error experimental. El NIST señala que los diseños completamente aleatorizados se analizan mediante los procedimientos correspondientes al ANOVA de un factor.

Tabla 9

Cuadro de análisis de varianza (ANVA)

Fuente de variación F.V.	Grados de libertad G.L.	Suma de cuadrados S.C.	Cuadrado medio C.M.	Fcalculado Fc	Signif.
Entre tratamientos (Tratamientos)	(t-1)	$\sum_i \frac{y^2}{r} - \frac{(\sum\sum y_{ij})^2}{rt}$	$SC_{Trat..}/(t-1)$	CM_{trat} / CM_{error}	
Dentro de tratamientos (Error Exper.)	t(r-1)	$SCT_{total} - SC_{tratam.}$	SCerror/t(r-1).		
Total	tr-1	$\sum_{i=1}^{t}\sum_{j=1}^{r} y_{ij}^2 - \frac{(\sum\sum y_{ij})^2}{rt}$			

Si el ANOVA indica: $p<0.05$, significa que existe diferencia significativa entre los tratamientos, pero el ANOVA por sí solo no indica exactamente entre cuáles tratamientos existe la diferencia.

- **Criterio de prueba F.-** El valor de Fc se compara con el valor de F tabulado (Ft); buscado con los grados de libertad (G.L.) del tratamiento y con los G.L. del error experimental; para $\alpha = 0,05$ ó $\alpha = 0,01$; es decir 5 % o 1 %.

  - Si: Fc > Ft, rechazamos la hipótesis nula (Ho); es decir que hay efecto diferencial entre las medias de los tratamientos en estudio.

  - Si Fc ≤ Ft, aceptamos la hipótesis nula (Ho); es decir que no hay diferencia entre las medias de los tratamientos en estudio.

Se acostumbra marcar N.S. (no significativo) a la varianza de tratamientos, cuando se acepta la Ho, y con un asterisco cuando la Fc supera a la F0,05, queriendo decir que sí hay diferencia significativa entre los tratamientos bajo estudio, en su efecto sobre la variable medida. Además, si la Fc no sólo supera a la F0,05, sino que también supera a la F0,01 (que es mayor), entonces se acostumbra poner dos asteriscos, y se dice que la diferencia es " significativa"

Si hay diferencia entre los tratamientos en estudios (Fc > Ft) o el valor de Fc es cercano al valor de Ft, necesitamos realizar otras pruebas para seleccionar él o los tratamientos mejor(es), para ello se debe realizar :

Pruebas de comparación múltiple:

- Prueba t
- Prueba D.L.S. (Diferencia limite significativa)
- Prueba de Duncan
- Prueba de Tukey
- Prueba de S.N.K (Studente – Newman – Keul)
- Prueba de Dunnett
- Prueba de contrastes ortogonales

En todo ANVA se debe calcular el coeficiente de variabilidad (C.V.) que evalúa el grado de homogeneidad de los resultados de un experimento.

1.10.3. Ventajas y limitaciones

- **Ventajas:**

- Permite utilizar cualquier número de tratamientos (variantes de harinas funcionales) y un número variable de repeticiones por tratamiento, aunque se recomienda que sea balanceado (mismo número de réplicas) para maximizar la potencia estadística.
- Simplicidad analítica: El Análisis de Varianza es directo y fácil de interpretar. Incluso si se pierden unidades experimentales durante el horneado o el análisis destructivo, el análisis estadístico no pierde su estructura analítica.
- Máximos grados de libertad para el error: Al no requerir bloques ni restricciones de aleatorización, se asigna la mayor cantidad posible de grados de libertad al residuo, lo que incrementa la sensibilidad de la prueba para detectar diferencias significativas entre tratamientos (Kuehl, 2001).

- **Limitaciones:**

- Su principal desventaja radica en que requiere una homogeneidad casi perfecta en el entorno de laboratorio. Si existen gradientes térmicos en el horno de panificación, variaciones en el tiempo de amasado entre lotes o diferencias en la calibración de los equipos, el error experimental aumentará artificialmente, reduciendo la capacidad del diseño para identificar diferencias reales entre las harinas evaluadas.

1.10.4. Pruebas de Comparación Múltiple

Ante la existencia de diferencias significativas en el ANOVA (valor de $p < 0.05$), se ejecutaron una prueba de comparaciones múltiples de rangos mediante la prueba de Duncan. Este procedimiento *post hoc* baso su sensibilidad en rangos decrecientes para discriminar de forma óptima los subconjuntos homogéneos entre las 6 formulaciones de chabata. Esto permitió identificar de manera unívoca qué tratamientos difieren significativamente entre sí y determinar estadísticamente qué línea funcional (HQN o HQG) provee el rendimiento físico, químico y organoléptico idóneo en el producto final (Montgomery, 2019). Los resultados finales se presentaron consolidados en tablas y gráficos de barras, expresando los valores como la media aritmética acompañada de su respectiva desviación estándar ($\bar{X} \pm DE$).

1.11. EVALUACIÓN SENSORIAL

Las pruebas de preferencia y aceptación son las más conocidas (Lawless y Heymann, 2010), se usan indistintamente, pero son dos métodos distintos (Drake, 2007). En las pruebas de preferencia, a los consumidores se les solicita que indiquen cuál es la muestra de su preferencia. Mientras que en las pruebas de aceptación a los

consumidores se presentan los productos y se les pidió que indiquen su nivel de agrado en una escala.

1.11.1. Prueba afectiva

Refieren a aquellas en las cuales el juez expresa su reacción subjetiva del producto, indicando si le gusta o si prefiere otro. Por lo general se realizan con paneles inexpertos o con solamente consumidores. Entre las pruebas afectivas están las de medición del grado de satisfacción y las de aceptación (Norma et al. 2018).

1.11.2. Prueba Hedónica

La escala más utilizada es la escala hedónica de 9 puntos (Drake, 2007), aunque también existen variantes de ésta, como son la de 7, 5 y 3 puntos o la escala gráfica de cara sonriente que se utiliza generalmente con niños (Stone y Sidel, 2004). La escala de 9 puntos es una escala bipolar. Desde su invención en la década de 1940 (Jones et al., 1955; Peryam y Haynes, 1957) se ha utilizado extensamente en una amplia variedad de productos y con un éxito considerable (Clark et al., 2009; Schutz y Cardello, 2001; Stone y Sidel, 2004). Es la prueba recomendada para la mayoría de estudios, o en proyectos de investigación estándar, donde el objetivo es simplemente determinar si existen diferencias entre los productos en la aceptación del consumidor**.**

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. LUGAR DE EJECUCIÓN

La fase de acondicionamiento, germinación, secado y molienda para la obtención de la harina de quinua germinada, así como los análisis fisicoquímicos proximales subsiguientes (proteína, fibra, humedad, hierro, volumen, peso y densidad), se ejecutaron de manera íntegra en los Laboratorios de Análisis de Alimentos de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga (UNSCH), ubicados en el distrito de Ayacucho, provincia de Huamanga, departamento de Ayacucho.

Destacar que el molino de martillos utilizado para la pulverización y reducción granométrica de los granos de quinua germinada hasta la obtención de un tamaño de partícula homogéneo apto para panificación, fue adquirido gracias al financiamiento del Fondo de Camisea (FOCAM). Este fondo concursable institucional viabilizó la transferencia tecnológica y la dotación de equipamiento de vanguardia a la UNSCH, garantizando la repetibilidad mecánica y el estricto control de calidad durante el procesamiento de la materia prima funcional.

La estandarización de la formulación, el amasado industrial, el proceso controlado de fermentación biológica y el horneado final del pan chabata funcional se llevaron a cabo en las instalaciones técnico-productivas de la Panadería MAS PAN S.A.C., ubicada estratégicamente en el Jirón Siete Vueltas N° 105, en el centro histórico de la ciudad de Ayacucho. La utilización de esta planta piloto comercial garantizó que el pan chabata se elaborara bajo condiciones reales de operación industrial, empleando amasadoras de espiral de velocidad variable, cámaras de fermentación con control térmico y de humedad relativa, y hornos de piso (horno rotatorio/convector) con inyección de vapor. Esto aseguró que las propiedades físicas evaluadas (volumen

específico mediante el método AACC 10-05, peso y densidad) reflejen fielmente el comportamiento de la harina de quinua germinada en una línea de producción comercial real.

2.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Se trata de una investigación cuantitativa de carácter experimental que tiene como objetivo mostrar la relación entre causas y efectos, con el propósito de comprobar que las variaciones en las variables independientes afectan a las variables dependientes. El propósito de esta investigación se centra en evaluar el impacto de la incorporación de harina de quinua germinada en la elaboración del pan chabata.

Al ser un experimento en el que se modifican variables, se clasifica como una investigación de laboratorio. En este contexto, se evaluó el efecto de la adición de harina de quinua germinada en las características físicas, químicas y las propiedades de análisis sensoriales del pan chabata elaborado.

2.3. NIVEL DE INVESTIGACIÓN

Alcanza un nivel explicativo debido a que su objetivo va más allá de describir el pan funcional; busca determinar las causas físicas y químicas del comportamiento de la matriz. Por ejemplo, explica cómo la dilución de la red de gluten y la presencia de fibra modifican mecánicamente la densidad, el volumen del pan y la percepción de la textura en boca de los consumidores (Montgomery, 2020).

2.4. MATERIALES Y EQUIPOS

2.4.1. Materia prima

- Quinua blanca entera adquirida por el FOCAM
- Harina de trigo adquirida por el FOCAM

2.4.2. Insumos

- Sal yodada marca EMSAL marina
- Mejorador marca Fleischmann (AB Mauri)
- Levadura seca marca Fermipan (Lesaffre Perú)
- Agua
- Manteca

2.4.3. Materiales de laboratorio

- Jarra de metal
- Contenedores

- Bidón
- Espátula
- Buretas
- Balones (500 mL)
- Fiolas (100 mL y 250 mL)
- Vasos de precipitado (100 mL, 200 mL y 250 mL)
- Matraces Erlenmeyer de 250 mL
- Buretas (25 mL y 50 mL)
- Pipetas (1 mL, 5 mL y 10 mL)
- Crisoles de porcelana
- Placas de Petri
- Probetas (100 mL y 500 mL)
- Embudos de filtración
- Tubos de ensayo
- Mortero con pilón de porcelana
- Pinzas
- Cuchara de acero inoxidable
- Cubeta

2.4.4. Reactivos

- Ácido sulfúrico (H_2S0_4) al 98%
- Hidróxido de sodio
- Ácido bórico
- Ácido clorhídrico al 0.1 N
- Ácido sulfúrico solución estandarizada al 1,25% o 0,255 N (para fibra)
- Alcohol etílico al 95% o absoluto
- Éter de petróleo
- 1,10-fenantrolina monohidrato
- Agua destilada

2.4.5. Equipos

- Balanza gramera (SF- 400, capacidad 5 kg)
- Amasadora industrial (CHELITA, capacidad de 30 kg)
- Horno industrial rotativo (660/D ANLIN S.R.L.)
- Balanza (promarc, capacidad 40 kg)
- Pulverizador (SPICE & HERB GRINDER, 1500 g)

- Sistema extractor de fibra cruda (Kjeldahl)
- Estufa de secado modelo DHG-9053A
- Mufla
- Espectrofotómetro UV-Visible

2.4.6. Otros materiales

- Bandejas metálicas (Acero inoxidable)
- Bolsas de papel
- Papel toalla
- Algodón
- Cuchillo de acero inoxidable
- Colador multiuso
- Sobres de silicona
- Materiales para la prueba sensorial: lapicero, formatos, agua mineral y vasos descartables.

2.4.7. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La metodología experimental de la presente investigación se dividió de forma secuencial y cronológica en dos etapas tecnológicas principales: la obtención de la harina de quinua germinada y la elaboración del pan chabata.

2.4.8. Proceso de obtención de harina de quinua germinada

Esta fase se ejecutó en los laboratorios de análisis de alimentos de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia de la UNSCH. Para la reducción granulométrica de la materia prima, se empleó el molino de martillos. El proceso operativo comprendió los siguientes pasos analíticos:

a) Recepción y selección: Se retiraron de forma manual e instrumental las impurezas residuales, granos partidos o cualquier materia extraña de la quinua entera para asegurar una muestra homogénea y uniforme.

b) Pesado: El pesado de la materia prima se realizó empleando una balanza digital, registrándose un peso inicial de 6 kg de quinua para el desarrollo del experimento.

c) Lavado y desinfectado: Se efectuó un lavado por agitación mecánica para eliminar la suciedad superficial y las saponinas solubles, repitiendo la operación hasta verificar que el agua residual quedé con la menor turbidez y la mayor transparencia. Después, se empleó una solución de hipoclorito de sodio a una concentración de

200 ppm en agua destilada como agente desinfectante. Los granos se sometieron a un tiempo de inmersión de 10 minutos con la finalidad analítica de provocar la destrucción de microorganismos patógenos y asegurar la inocuidad del cultivo.

d) Remojo: Se remojaron en agua potable tratada a una temperatura controlada de 20 °C, estableciendo una relación grano:agua de 1:5 (p/v). El tiempo de maceración se extendió por un lapso de 6 a 8 horas, ejecutando un protocolo de aireación mecánica cada 2 horas; esta operación evitó la acumulación de dióxido de carbono (CO_2) y la síntesis de alcohol dentro del medio acuoso, previniendo así la aparición de microorganismos competitivos dentro de la preparación.

e) Germinado: Los granos hidratados se dispusieron de manera uniforme en una superficie plana y se introdujo en una cámara de germinación con parámetros controlados, regulada a una temperatura de 20 °C y una humedad relativa del 90%. El proceso se prolongó por un tiempo de 24 a 36 horas. Durante este periodo, se realizó un monitoreo constante del crecimiento de las raicillas del grano, para que pueda conservar la humedad y calor se cubrió con fundas plásticas (film), suspendiendo el proceso de germinación en el momento exacto en que esta alcanzó una longitud de entre 2.0 y 2.5 cm, Paucar (2015).

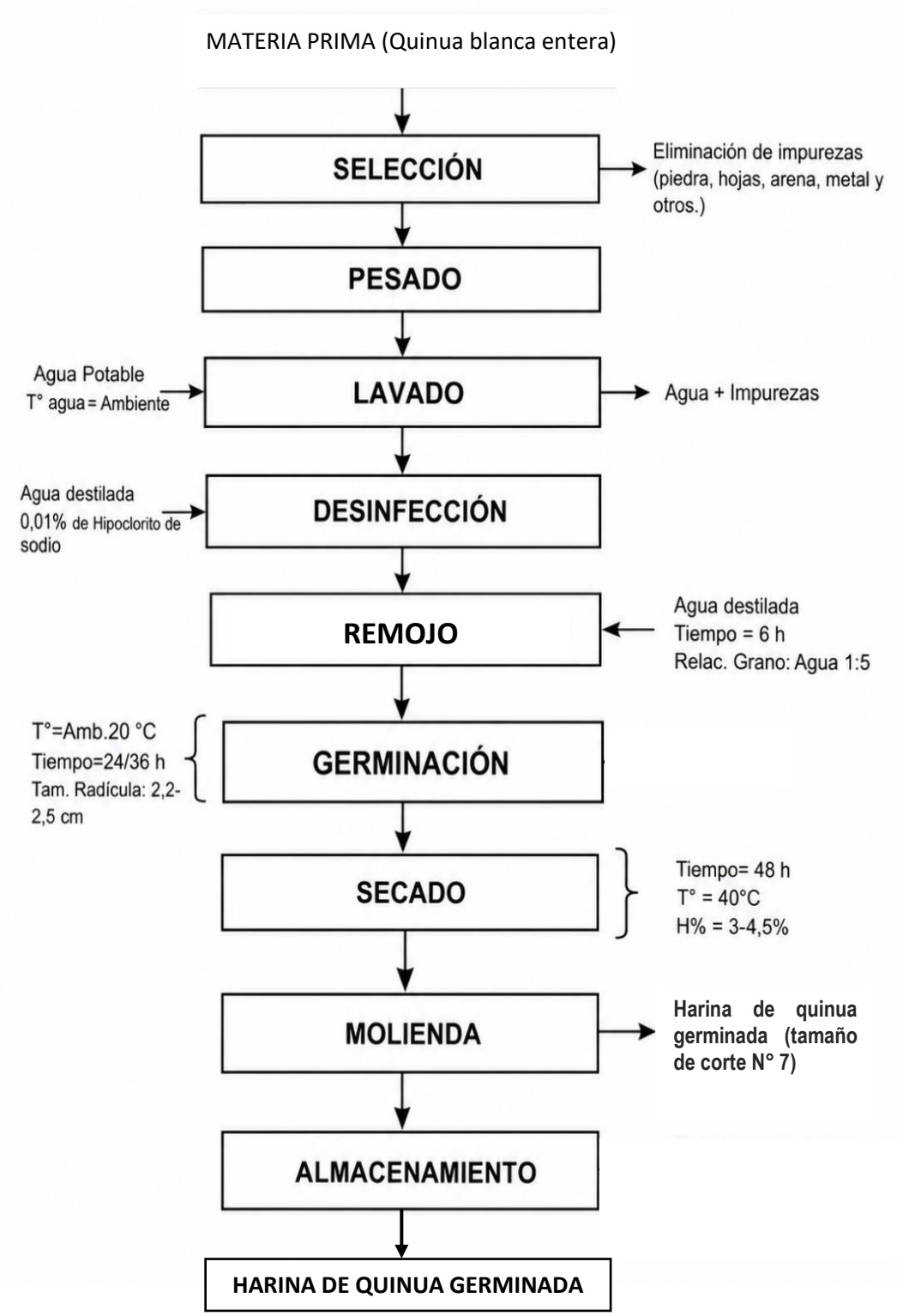
f) Secado: La quinua germinada, una vez alcanzado el tamaño adecuado de las raicillas, se extendieron en capas delgadas sobre bandejas de acero inoxidable para iniciar el proceso de secado. El secado se llevó a cabo en una estufa de convección forzada a una temperatura de 40 °C durante un periodo de 48 horas, con el objetivo de evaporar el agua libre hasta alcanzar la humedad final situadas en el rango óptimo de 3,0% a 4,5%.

g) Molienda: Se proceso mecánicamente a través de un molino de discos configurado con un tamaño de corte N.° 7, logrando la pulverización total del grano y la reducción granulométrica requerida para su posterior interacción reológica en la masa.

h) Almacenamiento: La harina obtenida se envaso inmediatamente en bolsas de polietileno y selladas para evitar la absorción de humedad ambiental, rotulándose y preservándose en un lugar fresco y utilización en la Panadería MAS PAN S.A.C.

Figura 4

Diagrama de flujo para la obtención de quinua germinada



2.4.9. Proceso de elaboración del pan chabata

Se llevó a cabo en las instalaciones de la Panadería MAS PAN S.A.C., utilizando los siguientes equipos: amasadora, horno eléctrico y batidora, el proceso consistió de las siguientes operaciones:

a) Recepción de materia prima: Se recepcionó todos los ingredientes e insumos necesarios para la elaboración del pan chabata. Esto incluyó la harina de trigo refinada, la harina de quinua, levadura seca instantánea, agua potable tratada, aceite vegetal refinado y sal común, etc.

b) Pesado 1: Utilizando una balanza digital, se pesó las masas de cada componente de acuerdo con los requerimientos específicos de los 6 tratamientos. En esta etapa se cuantificó de forma individual las proporciones de harina de trigo, harina de quinua germinada, levadura, agua, aceite y sal previos a su incorporación en el sistema de mezcla.

c) Mezclado y amasado: Los ingredientes pesados se llevaron a la amasadora. Se inició un proceso de mezclado a baja velocidad para la hidratación de las harinas, seguido de un amasado a velocidad rápida para lograr el desarrollo de la red viscoelástica del gluten, indispensable para asegurar la retención gaseosa del CO_2.

d) Fermentación I: Una vez concluido el amasado y lograda la consistencia óptima de la masa, se retiró del equipo y se sometió a un periodo de reposo en bloque durante un tiempo de 20 minutos. Esta operación permitió relajar las tensiones mecánicas de la red proteica y dar inicio a las primeras reacciones metabólicas de la levadura.

e) Pesado 2: Al finalizar el periodo de reposo, la masa se pesó nuevamente para registrar el rendimiento post-mezclado y controlar las variaciones físicas previas al fraccionamiento.

f) Cortado y división: La masa se transfirió a la mesa de trabajo, donde se procedió a realizar los cortes y la división, fragmentando la masa en porciones individuales homogéneas con el peso de 100 g para cada pieza de pan chabata.

g) Boleado y formado: Las piezas de masa se sometieron a una operación manual de pre-boleado suave y posterior formado rústico achatado, manipulando la masa de manera controlada para otorgarle la configuración rectangular característica del pan chabata.

h) Fermentación II: Las piezas de masa se colocaron en bandejas y se dejaron reposar por 1h permitiendo inicio del proceso de fermentación.

i) Horneado: El tratamiento térmico de cocción se ejecutó a una temperatura de 180°C durante un periodo de 10 - 15 minutos. Este choque térmico provocó la gelatinización del almidón y la coagulación de las proteínas para fijar la estructura crujiente de la corteza y la esponjosidad de la miga.

j) Enfriamiento y almacenamiento: Las piezas horneadas se retiraron del horno y se dispusieron sobre rejillas de acero inoxidable a temperatura ambiente por un lapso mínimo de 2 horas. Una vez completado el enfriamiento y la estabilización de la humedad del pan chabata, se procedió a su almacenamiento en bolsas de polietileno debidamente selladas para preservar su frescura previo a la ejecución de las evaluaciones físicas, químicas y sensoriales correspondientes.

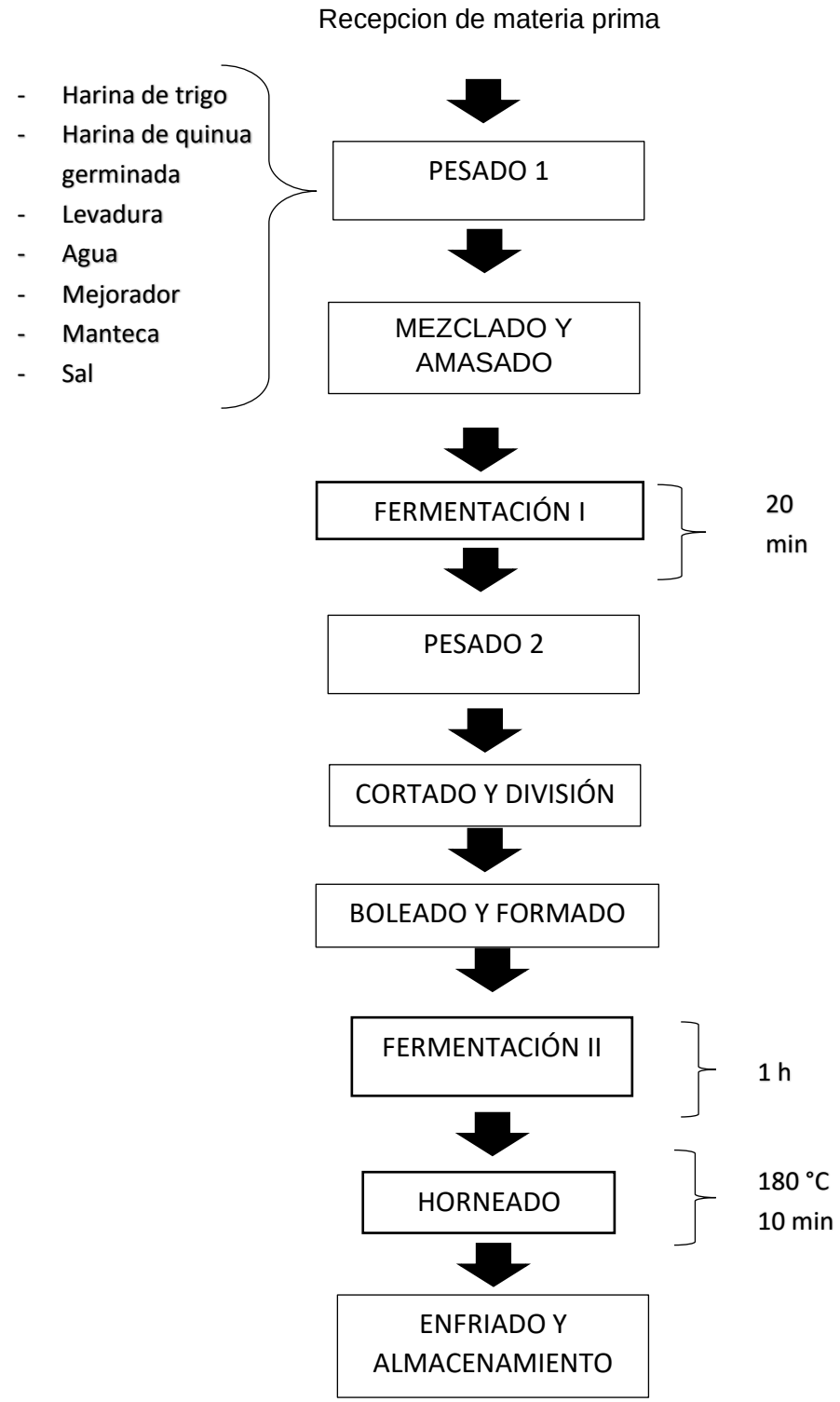
Tabla 10

Formulaciones para la elaboración del pan chabata de los 6 tratamientos

INSUMOS	Patrón T1	T2 95% 5%	T3 90% 10%	T4 85% 15%	T5 80% 20%	T6 75% 25%
Harina de trigo	1000	900	850	800	750	700
Harina de quinua germinada	-	100	150	200	250	300
Levadura	8	8	8	8	8	8
Sal	20	20	20	20	20	20
Mejorador						
Manteca	10	10	10	10	10	10
Mejorador	10	10	10	10	10	10
Agua	700	700	700	700	700	700

Figura 5

Diagrama de flujo para la producción de pan chabata



2.5. DISEÑO EXPERIMENTAL

Se aplicó un Diseño Completamente al Azar (DCA) con un enfoque unifactorial para evaluar el impacto de la sustitución parcial de la harina de trigo por harina de quinua

germinada en la calidad del pan chabata. El factor único en estudio fue el porcentaje de sustitución de harina, el cual se evaluó a través de seis tratamientos (0, 5, 10, 15, 20 y 25%), con tres repeticiones por tratamiento, se realizó de la siguiente manera: (a) Obtención y caracterización inicial de materias primas, (b) Establecimiento de las formulaciones bajo el DCA, (c) Evaluación analítica (física, química y sensorial) de los panes chabata y (d) Análisis estadístico de varianza.

a) Obtención de la harina germinada

La harina de quinua germinada se obtuvo mediante un proceso controlado de remojo, germinación, secado y molienda analítica. Previo a la panificación, se determinó el perfil químico de la harina de quinua germinada (humedad, proteína, fibra y hierro) siguiendo las directrices oficiales de la AOAC.

b) Elaboración de las formulaciones

Para mantener la identidad del pan chabata (caracterizado por su alta hidratación, alveolado abierto y corteza crujiente), se estandarizó la cantidad de agua, masa madre/prefermento, sal y levadura. El reemplazo de la harina de trigo por harina de quinua germinada se ejecutó sobre la base del peso total del porcentaje de mezcla seca de harinas. Los niveles establecidos se basaron en reportes previos que demostraron que la germinación mejora el perfil de aminoácidos y hierro de la quinua, manteniendo un comportamiento panificable en sustituciones de hasta un 25%.

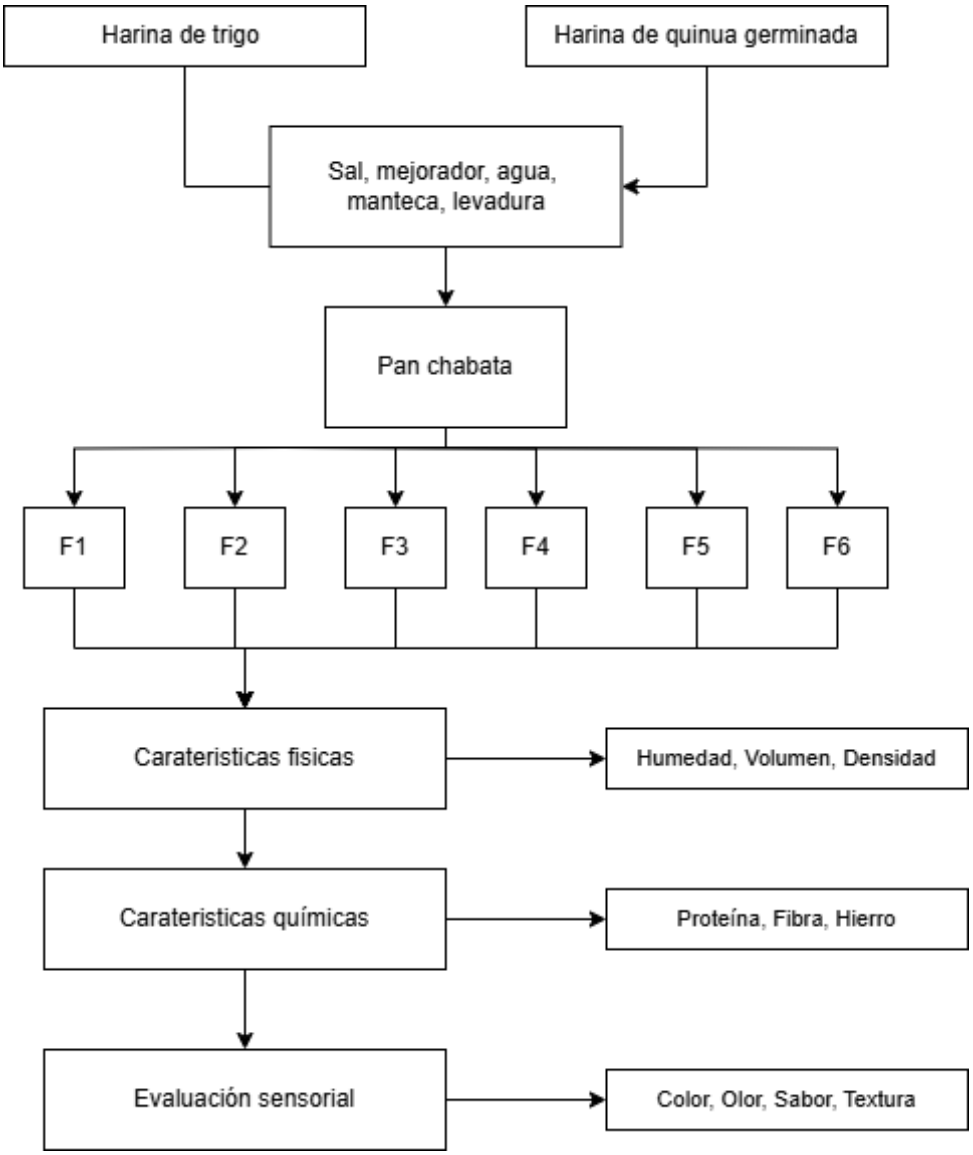
Tabla 11

Porcentajes de harinas en las formulaciones del pan chabata

Formulaciones	Harina de trigo (%)	Harina de quinua germinada (%)
T1	100	0
T2	95	5
T3	90	10
T4	85	15
T5	80	20
T6	75	25

Figura 6

Diagrama de diseño experimental de las 6 formulaciones



2.6. POBLACIÓN Y MUESTRA

2.6.1. Población

Constituida por una cantidad de 300 unidades de pan chabata, distribuidas de manera equitativa en 6 tratamientos experimentales (50 piezas de pan cada tratamiento).

2.6.2. Muestra

La muestra estuvo conformada por 60 panes chabata (extraídos a razón de 10 panes por cada uno de los 6 tratamientos). Se aplicó un muestreo probabilístico

estratificado con selección aleatoria simple dentro de cada tratamiento. Esta estrategia probabilística aseguró que todos los tratamientos estuvieran representados con la misma intensidad muestral en las evaluaciones, eliminando sesgos y garantizando la validez estadística del Análisis de Varianza (ANOVA) (Montgomery, 2020).

2.7. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

Las evaluaciones de las harinas y las piezas de pan chabata horneadas se realizaron por triplicado siguiendo metodologías estandarizadas internacionales y protocolos analíticos específicos.

2.7.1. Para la harina de quinua germinada

a) Determinación de Proteína Total

El contenido de proteína cruda se determinó aplicando el método Kjeldahl siguiendo la norma técnica oficial 920.152 de la A.O.A.C. (2005). Una muestra de 1 g de harina de quinua germinada fue vertida en un matraz Kjeldahl para su digestión química con ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) en presencia de una mezcla catalizadora de sulfato de cobre y sulfato de potasio, calentándose progresivamente en un bloque digestor hasta obtener una solución translúcida libre de partículas carbonosas. Posteriormente, la muestra digerida fue enfriada, diluida con agua destilada y alcalinizada mediante la adición de hidróxido de sodio (NaOH al 40%) en una unidad de destilación. El amoníaco liberado en forma de vapor fue recolectado en una solución receptora de ácido bórico (H_3BO_3) con indicador mixto, procediendo finalmente con la titulación volumétrica empleando ácido clorhídrico (HCl 0.1 N) estandarizado. El porcentaje de nitrógeno elemental se multiplicó por el factor de conversión de 6.25 para establecer la concentración de proteína cruda.

b) Determinación de fibra cruda

La fracción de fibra cruda se cuantificó bajo las especificaciones de la norma A.O.A.C. (2005), empleando un sistema extractor de fibra cruda. Una alícuota de muestra previamente desgrasada fue sometida a una digestión ácida inicial por ebullición con una solución de ácido sulfúrico (H_2SO_4 al 1.25% p/v) durante un periodo estricto de 30

minutos. Tras una filtración y lavado con agua destilada hirviente, el residuo se sometió a una segunda digestión alcalina bajo reflujo utilizando hidróxido de sodio (NaOH al 1.25% p/v) por 30 minutos más. El residuo final insoluble fue filtrado, lavado con agua y acetona, y secado en estufa a 105 °C hasta lograr peso constante. Finalmente, la muestra seca se calcinó dentro de una mufla. El contenido de fibra cruda se obtuvo calculando la pérdida de masa por diferencia gravimétrica antes y después de la destrucción térmica de la materia orgánica.

c) Determinación de hierro (Fe) por el método de Munsey

La concentración de hierro mineral se evaluó por espectrofotometría UV-Visible mediante el Método de Munsey empleando el reactivo cromógeno 1,10–fenantrolina. Inicialmente, la muestra de harina de quinua germinada fue sometida a una calcinación. El residuo mineral fue digerido y solubilizado empleando ácido clorhídrico (HCl) concentrado en caliente. Para la determinación analítica, una alícuota del filtrado ácido fue tratada con clorhidrato de hidroxilamina como agente reductor para asegurar la conversión cuantitativa del ion férrico (Fe^{3+}) a ion ferroso (Fe^{2+}). Seguidamente, se adicionó una solución amortiguadora de acetato de sodio para regular el pH del medio a un rango óptimo de 3.5 a 4.5, y se dosificó la solución de 1,10–fenantrolina, induciendo la formación de un complejo de coordinación tris-quelato de color naranja-rojizo. Tras un periodo de reposo para el desarrollo completo del color, se midió la absorbancia en un espectrofotómetro UV-Visible a una longitud de onda de 510 nm.

2.7.2. Para el pan chabata

2.7.2.1. Análisis físicos

- **Volumen:** se realizó aplicando el método oficial 10-05.01 de la AACC International (2000), denominado técnicamente método de desplazamiento con semillas de quinua. Este procedimiento consistió en introducir la muestra de pan horneada dentro de un contenedor volumétrico de capacidad conocida, para luego liberar de forma controlada las semillas. Mediante este desplazamiento físico, se midió de forma proporcional el espacio ocupado por la pieza a través de la lectura directa en una columna graduada.

- **Densidad:** Se calculó matemáticamente mediante la relación entre la masa y el volumen de cada pieza horneada, expresando el resultado en gramos por centímetro cúbico (g/cm^3)**.**
- **Humedad:** Se determinó mediante el método gravimétrico por secado en estufa de acuerdo con los lineamientos de la A.O.A.C. (2005). Se pesaron 5 g de muestra homogeneizada y se sometieron a deshidratación en una estufa de secado a una temperatura constante de 105°C hasta alcanzar un peso constante. El porcentaje de humedad se calculó por la pérdida de peso de la muestra.

2.7.2.2. Análisis químicos

- **Proteína Total:** Se cuantificó mediante el método Kjeldahl 920.152 de la A.O.A.C. (2005). El proceso se dividió en tres etapas consecutivas: digestión húmeda de la muestra con ácido sulfúrico concentrado en presencia de un catalizador a alta temperatura; destilación del amoníaco liberado mediante la adición de hidróxido de sodio y su recepción en una solución de ácido bórico; y finalmente, titulación volumétrica con una solución estandarizada de ácido clorhídrico. El contenido de nitrógeno total obtenido se multiplicó por el factor de conversión correspondiente para reportar el porcentaje de proteína.
- **Fibra Cruda:** Se evaluó mediante el método oficial de la A.O.A.C. (2005). Las muestras previamente desgrasadas se sometieron a una digestión ácida consecutiva con ácido sulfúrico y una digestión alcalina con hidróxido de sodio en condiciones de ebullición controlada. El residuo insoluble obtenido fue filtrado, secado, pesado y posteriormente calcinado en una mufla. El contenido de fibra cruda se determinó por la pérdida de masa tras la calcinación.
- **Determinación de Hierro (Fe):** Se ejecutó empleando el método de Munsey, fundamentado en la reducción del hierro presente en la muestra digerida a su estado ferroso utilizando clorhidrato de hidroxilamina. Posteriormente, se adicionó 1,10–fenantrolina para formar un complejo quelato de color rojo-anaranjado intensamente coloreado (ferroína). La intensidad del color desarrollado se midió mediante lectura en un espectrofotómetro UV-Visible a una longitud de onda de 510 nm, interpolando los valores de absorbancia en una curva de calibración estándar de hierro.

2.7.2.3. Análisis sensorial

La evaluación de la calidad sensorial del pan chabata se realizó mediante pruebas afectivas con un panel de 15 jueces (consumidores). Se evaluaron de forma independiente los atributos de color, olor, textura y sabor. Cada panelista recibió las

muestras de los seis tratamientos codificadas de forma aleatoria con números de tres dígitos en bandejas individuales. Para la calificación, se empleó una escala hedónica de 7 puntos como se puede observar en la siguiente tabla 12:

Tabla 12

Escala hedónica de 7 puntos

Nivel de grado	Ponderación
Excelente	7
Muy bueno	6
Bueno	5
Aceptable	4
Menos que aceptable	3
Desagradable	2
Pésimo	1

Nota. Descripción de los descriptores cualitativos y la ponderación numérica de la escala hedónica de 7 puntos utilizada en el análisis sensorial del producto horneado por Liria y María (2007).

2.8. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los resultados obtenidos de las evaluaciones físicas (peso, volumen, densidad y humedad), químicas (proteína, fibra cruda y hierro) y sensoriales (color, olor, textura y sabor) fueron tabulados y ordenados en hojas de cálculo. Posteriormente, se procesaron mediante el programa estadístico IBM SPSS Statistics Versión 25, bajo el modelo matemático de un Diseño Completamente al Azar (DCA) con estructura unifactorial.

Previo al análisis inferencial, se verificaron los supuestos estadísticos de normalidad de los residuos (mediante la prueba de Shapiro-Wilk) y de homogeneidad de varianzas (mediante la prueba de Levene) para asegurar la validez del modelo.

Las variables que cumplieron con los supuestos paramétricos fueron sometidas a un Análisis de Varianza (ANOVA) de una sola vía para determinar la existencia de diferencias estadísticas significativas entre los seis tratamientos evaluados (0%, 5%, 10%, 15%, 20% y 25% de sustitución). El nivel de significancia se fijó en un $\alpha = 0.05$ (nivel de confianza del 95%), estableciendo la existencia de diferencias cuando el valor de probabilidad fue menor al umbral crítico establecido ($p < 0.05$).

En aquellos casos donde el ANOVA reveló diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos, se aplicó la prueba de comparación de rangos múltiples de Duncan para realizar el agrupamiento homogéneo y discriminar estadísticamente las medias correspondientes. Para el caso específico de los datos del análisis sensorial,

derivados de la escala hedónica de 7 puntos, estos se analizaron bajo los mismos criterios paramétricos fundamentados en el teorema del límite central para paneles estadísticos, complementándose con estadísticas descriptivas de tendencia central y dispersión.

Todos los resultados numéricos fueron expresados y reportados en las tablas correspondientes como el valor promedio acompañado de su respectiva desviación estándar (Media ± D.E.).

CAPÍTULO III
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. EVALUACIÓN FÍSICA

En el anexo 1 se presentan los resultados de la evaluación física del pan chabata.

3.1.1. Humedad

Se muestra en la tabla 13, el análisis de varianza de la humedad del pan chabata con un nivel de significancia del 5%,

Tabla 13

Análisis de varianza para la humedad del pan chabata

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	Valor F	Valor P
Tratamiento	0,281	5	0,056	6,302	0,004
Error	0,107	12	0,009		
Total corregido	0,388	17			

Nota: $R^2 = 0,724$

El análisis de varianza reveló que el factor de sustitución parcial con harina de quinua germinada ejerció un efecto estadísticamente significativo sobre el contenido de humedad final del pan chabata, obteniéndose un valor de F= 6,302 con una significancia estadística de (p = 0,004), valor que se encuentra en el umbral crítico establecido (p < 0.05). Asimismo, el modelo demostró una alta bondad de ajuste, donde el coeficiente de determinación ($R^2 = 0,724$) indicó que el 72,4% de la variabilidad total observada en la humedad del producto horneado fue explicada exclusivamente por los cambios en los niveles de sustitución (tratamientos) de la formulación.

Tabla 14

Prueba de Duncan para la humedad

Tratamiento	N	Subconjunto		
		1	2	3
3	3	28,9933[c]		
6	3	29,0367[c]		
4	3	29,0533[c]		
1	3	29,1600[cb]	29,1600[cb]	
5	3		29,2567[ba]	29,2567[ba]
2	3			29,3400[a]
Sig.		0,068	0,234	0,301

Como se observa en la Tabla 15, el contenido de humedad del pan chabata oscilo entre un 28,99% (T3) hasta un máximo de 29,34% (T2), mostrando una variación de 0,35% entre tratamientos.

El análisis de los subconjuntos homogéneos reveló que los tratamientos 3, 6 y 4 se situaron exclusivamente en el subconjunto 1, mostrando los valores más bajos de retención de agua libre, sin diferencias significativas entre sí ($p = 0,068$). El T1 funcionó como una zona de transición, compartiendo similitud estadística tanto con el primer bloque como con el T5 en el subconjunto 2 ($p = 0,234$). Finalmente, el tratamiento 2 lideró el subconjunto 3 junto al T5, consolidando la mayor concentración de humedad residual tras el proceso de horneado ($p = 0,301$).

Los valores promedio de humedad obtenidos en todas las formulaciones se mantuvieron dentro de los rangos tecnológicos reportados por la *AACC International* para panes de alta hidratación inicial y corteza delgada como la chabata, cuyos valores finales oscilan habitualmente entre el 28% y el 35%.

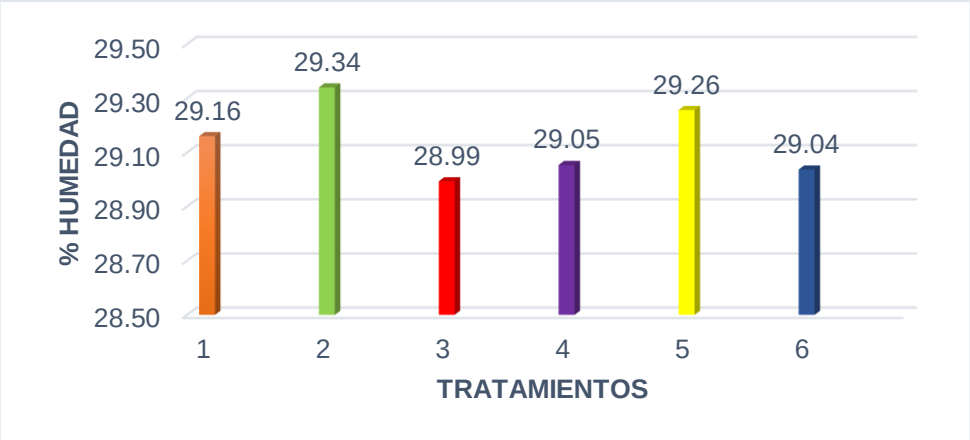
La variación cuantitativa observada para la humedad entre los subconjuntos estadísticos se encuentra directamente asociada a las transformaciones macroestructurales sufridas por el grano de quinua durante el proceso de germinación. De acuerdo con Peña-Abregú (2023), la activación de las enzimas amilolíticas endógenas (alfa y beta-amilasas) durante la etapa de germinación hidroliza parcialmente las cadenas rígidas del almidón nativo, transformándolas en dextrinas y azúcares reductores de menor peso molecular. Estas nuevas estructuras poseen una mayor cantidad de grupos hidroxilo (-OH) libres expuestos, lo que incrementa notablemente la capacidad de retención de agua (CRA) mediante la formación de puentes de hidrógeno estables dentro de la masa, reduciendo la tasa de evaporación en el horno.

Este fenómeno físico-químico coincide con lo formulado por Valverde & Sánchez (2026), quienes observaron que la sustitución de harina comercial por pseudocereales

germinados incrementa proporcionalmente la humedad residual del producto horneado debido a la naturaleza hidrofílica de la fibra soluble modificada y los azúcares libres.

Figura 7

Medias marginales para la comparación de humedad en los tratamientos.



Los valores de humedad obtenidos en todas las formulaciones se mantuvieron dentro de los rangos tecnológicos reportados para panes de alta hidratación y corteza delgada como la del pan chabata, los cuales oscilan habitualmente entre el 28% y el 35% según las normativas estándar de panificación y lo reportado por la AACC. El cambio significativo en la humedad ($p < 0,05$) al incrementar los niveles de harina de quinua germinada se encuentra directamente asociado a las transformaciones macroestructurales sufridas por el grano durante el proceso de germinación.

Este fenómeno físico-químico coincide con lo formulado por Valverde & Sánchez (2026), quienes observaron un incremento lineal en la humedad residual de productos panificados horneados al sustituir harina comercial por pseudocereales germinados, atribuyéndolo a la presencia de fibra soluble modificada y azúcares altamente hidrofílicos que atrapan el agua fuertemente en la matriz de la miga. Por otro lado, el debilitamiento de la red de gluten provocado por la dilución de la harina de trigo disminuye la capacidad de la masa para expandirse uniformemente. Como consecuencia, se genera una estructura interna más compacta y densa que restringe la transferencia de calor y masa hacia el exterior durante la cocción, atrapando la humedad en el núcleo del pan, comportamiento reológico que también ha sido respaldado por reportes en Twist Journal (2024) sobre el horneado de masas compuestas.

3.1.2. Volumen

Se muestra el análisis de varianza respecto al volumen con un nivel de significancia del 5%, en la tabla 15

Tabla 15

Análisis de varianza para volumen del pan chabata

Origen	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	Valor **F**	Valor P
TRATAMIENTOS	37,262	5	7,452	20,485	0,000
Error	4,366	12	0,364		
Total corregido	41,628	17			

Nota: $R^2 = 0,895$

En la tabla 15 el análisis de varianza para la variable volumen del pan demostró que existen diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos evaluados, con un valor de F = 20,485 y una significancia de 0,000. Asimismo, el modelo mostró un alto coeficiente de determinación ($R^2 = 0,895$), indicando que el 89,5% de la variabilidad del volumen se debe al efecto de las formulaciones empleadas. Este comportamiento es consistente con lo reportado por investigadores en panificación con pseudocereales, quienes señalan que la sustitución parcial de la harina de trigo por harina de quinua germinada altera las propiedades viscoelásticas de la masa y la retención de gas, modificando el volumen final del producto.

Tabla 16

Prueba de Duncan para el volumen del pan chabata

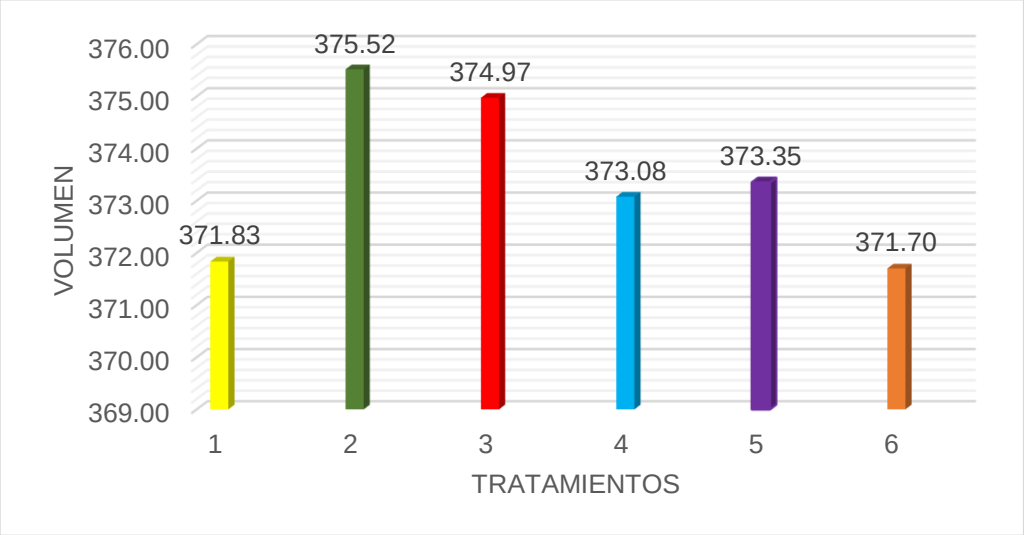
TRATAMIENTOS	N	Subconjunto		
		1	2	3
6	3	371,7000 [c]		
1	3	371,8333 [c]		
4	3		373,0767 [b]	
5	3		373,3500 [b]	
3	3			374,9733 [a]
2	3			375,5200 [a]
Sig.		0,791	0,589	0,289

La tabla 16 evidenció una separación neta y significativa de las medias en tres subconjuntos homogéneos independientes. En el Subconjunto 1, se agruparon los tratamientos 6 y 1, consolidando los valores más bajos de volumen aparente del experimento, sin registrar diferencias estadísticas significativas entre ambos ($p = 0,791$). El Subconjunto 2 integró de manera exclusiva a los tratamientos 4 y 5 ($p = 0,589$), posicionándolos en un rango intermedio de expansión. Finalmente, el Subconjunto 3 agrupó a los tratamientos 3 y 2 ($p = 0,289$), donde el tratamiento 2 alcanzó el límite

superior absoluto con un volumen promedio de 375,520 cm^3, mostrando la mayor capacidad de expansión alveolar del estudio.

Figura 8

Medias marginales para la comparación de volumen en los tratamientos



En la figura 8 el tratamiento 2 (375,52 g/cm^3) y Tratamiento 3 (374,97 g/cm^3) consolidaron los mayores valores de volumen del estudio, superando de forma estadísticamente significativa al grupo base. Habiendo una explicación reológica donde este fenómeno se atribuye a que las proporciones de agua y harinas en T2 y T3 permitieron una mayor hidratación de las proteínas y una óptima gelatinización del almidón. De acuerdo con investigaciones sobre el volumen de (Villacorta & Ramos,2021) niveles controlados de sustitución con pseudocereales pueden estabilizar temporalmente la retención de gas si se mantiene un balance hidrodinámico adecuado en los almidones durante la fermentación, impidiendo el colapso temprano de las celdas de aire.

Al observar este comportamiento con los datos previos de humedad (donde T5 registró el pico más alto con un 68,85%), se evidencia que un exceso de humedad libre debilita la consistencia viscoelástica de la masa. La sobrehidratación ablanda la matriz polimérica del gluten diluido, reduciendo la presión interna necesaria para expandir la hogaza en el horno. Según (Arone, 2015) donde se detalla que la alta afinidad de la fibra de quinua por el agua compite directamente por la hidratación de las proteínas formadoras de gluten, interrumpiendo mecánicamente la red y limitando la retención eficaz de dióxido de carbono.

Las muestras Tratamiento 1 (371,83 g/cm^3) y Tratamiento 6 (371,70 g/cm^3) se posicionaron en el nivel basal más bajo. En el caso de T6 (que previamente arrojó la menor humedad con 65,23%), la falta de agua libre suficiente limitó la elasticidad y

extensibilidad requeridas por la masa para ceder ante la presión de los gases de fermentación, dando como resultado un pan denso y compactado. Conforme a lo expuesto (Torres & Carpio, 2019) la escasez de agua libre restringe la movilidad molecular de las cadenas de proteínas durante el amasado, impidiendo que la red viscoelástica alcance el grado de deformación plástica indispensable para un desarrollo volumétrico exitoso.

3.1.3. Densidad

La tabla 17 muestra el análisis de varianza que se hizo en relación con la densidad, con nivel de significancia del 5%.

Tabla 17

Análisis de varianza para la densidad del pan chabata

Origen	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	Valor **F**	Valor P
TRATAMIENTO	4,628E-05	5	9,256E-06	9,256	0,001
Error	1,200E-05	12	1,000E-06		
Total corregido	5,828E-05	17			

Nota: $R^2 = 0,794$

El análisis de varianza para la variable densidad del pan demostró la existencia de diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos evaluados, registrando un valor de $F = 9,256$ y una significancia de 0,001. Asimismo, el modelo lineal generalizado exhibió un coeficiente de determinación R^2 de 0,794, lo que significa que el 79,4% de las variaciones encontradas en la densidad del producto final son explicadas directamente por el efecto de las formulaciones empleadas. Este comportamiento estadístico corrobora que las modificaciones en los componentes estructurales de la masa alteran la densidad aparente del pan, un fenómeno estrechamente vinculado a la capacidad de expansión volumétrica y a la retención de gases durante la etapa de horneado.

Los tratamientos que alcanzaron mayor volumen (como T2 y T3 en tus análisis anteriores) necesariamente registrarán las densidades más bajas, dando como resultado una miga más alveolada, esponjosa y ligera. Por el contrario, los tratamientos con menor volumen (como T1 y T6) generarán densidades más altas, lo que se traduce técnicamente en un pan más compacto, pesado y con celdas de aire muy pequeñas debido a la dilución del gluten por la harina de quinua o fallas en la retención de gas.

Tabla 18

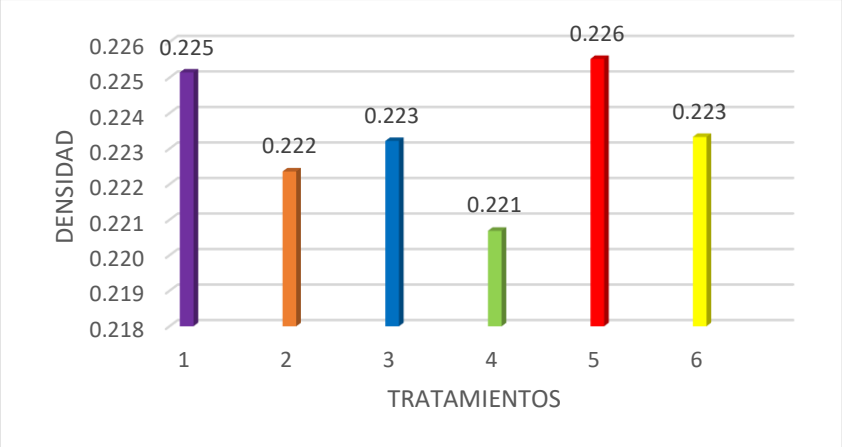
Prueba de Duncan para el volumen del pan chabata

TRATAMIENTO	N	Subconjunto			
		1	2	3	4
4	3	0,22100 [d]			
2	3	0,22200 [cd]	0,22200 [cd]		
3	3		0,22333 [bc]	0,22333 [bc]	
6	3		0,22333 [bc]	0,22333 [bc]	
1	3			0,22500 [ab]	0,22500 [ab]
5	3				0,22567 [a]
Sig.		0,244	0,146	0,075	0,430

La aplicación de la prueba de rangos múltiples de Duncan para la variable densidad (Tabla 18) muestra una estructuración compleja con superposiciones estadísticas, distribuyendo las medias en cuatro subconjuntos homogéneos. En el Subconjunto 1, se ubicó el tratamiento 4 con la menor densidad promedio 0,2210 g/cm^3, compartiendo similitud con el tratamiento 2 (0,22200 g/cm^3). El tratamiento 1 se desplazó hacia los rangos superiores (0,22500 g/cm^3), el tratamiento 5, el cual alcanzó el valor máximo absoluto de densidad con una media de (0,22567 g/cm^3) los que representaron la estructura de miga más compacta en el estudio.

Figura 9

Medias marginales para la comparación de densidad en los tratamientos



En la figura 9 se observa que el T4 (0,221 g/cm^3) y T2 (0,222 g/cm^3) se reportaron una menor densidad aparente. Este comportamiento se correlaciona directamente con el alto rendimiento volumétrico observado en el Tratamiento 2 y tecnológicamente, esto demuestra que en estas proporciones específicas se alcanzó un equilibrio hidrodinámico y viscoelástico mejor.

La matriz de la masa retuvo eficientemente el dióxido de carbono generado en la fermentación, expandiendo las celdas de aire sin romper la red polimérica, lo que derivó en un producto final ligero, poroso y de miga suave. De acuerdo con García y Martínez (2020), en panes formulados con sustituciones parciales de harinas sucedáneas, la reducción de la densidad aparente es un indicador directo de una adecuada interacción entre las proteínas residuales del trigo y los almidones disponibles, permitiendo una deformación plástica uniforme durante el salto de horno sin colapsar las celdas de gas.

El T5 y el T1 registraron los valores más elevados de densidad, agrupando mayor contenido de harina de quinua germinada esta debilita el gluten y la elasticidad de masa. Este fenómeno es respaldado por los hallazgos de Arone (2015), quien señala que cuando el porcentaje de sustitución o el nivel de agua libre superan el punto de saturación reológica, la matriz del gluten se interrumpe mecánicamente, reduciendo la capacidad de retención gaseosa y generando piezas de pan con estructuras internas cerradas, pesadas y densas.

Para el caso de T6, que previamente mostró la menor humedad del estudio, la restricción de agua libre limitó la elasticidad y extensibilidad inicial de la masa durante el amasado. Una masa subhidratada restringe mecánicamente el crecimiento de los alvéolos, lo que impide que el pan alcance una ligereza óptima, posicionándolo en una franja de densidad intermedia. Según Torres y Carpio (2019), la falta de agua disponible limita la movilidad molecular y la gelatinización completa del almidón durante el horneado, restringiendo la expansión volumétrica y manteniendo una densidad aparente relativamente alta debido a la rigidez prematura de la corteza.

3.2. EVALUACIÓN QUÍMICA

En el anexo 1 se presentan los resultados de la evaluación química de la harina de quinua germinada y del pan chabata.

3.2.1. Para la harina de quinua germinada

3.2.1.1. Proteína

El contenido de proteína cruda determinado en la harina de quinua germinada fue de 14,95%. Este resultado se posiciona favorablemente dentro del rango de 13,8% a 16,5% reportado por Valverde-Sánchez y Sánchez (2026) para variedades comerciales del sur del Perú. Este incremento o estabilidad proteica se fundamenta en los fenómenos metabólicos del grano durante el brotado. Durante la germinación

controlada, las enzimas proteasas endógenas se activan, promoviendo la hidrólisis parcial de las proteínas globulares de reserva (globulinas 11S y albúminas 2S) hacia péptidos de menor peso molecular y aminoácidos libres. Científicamente, autores como Jan et al. (2018) demuestran que este proceso biológico no reduce la masa proteica total, sino que altera su solubilidad y mejora sustancialmente su digestibilidad in vitro, lo que confiere un alto valor biológico a la harina compuesta al complementarse con la harina de trigo.

3.2.1.2. Fibra

La fracción de fibra cruda cuantificada se ubicó en 5,16%, mostrando un incremento respecto a los granos de quinua en estado nativo de 3,9%. Este comportamiento coincide con lo descrito por Jan et al. (2018), quienes señalaron que los procesos de brotado estimulan la elongación celular y la síntesis de nuevos polisacáridos estructurales destinados a la conformación de las paredes celulares de la plántula, tales como celulosa, hemicelulosa y pectinas. Asimismo, los valores obtenidos son superiores al 2.68% reportado en harinas compuestas similares, aproximándose a los niveles analizados en matrices complejas por Soto et al. (2011). El aumento porcentual de esta fracción es tecnológicamente crítico para la panificación de la chabata, ya que, tal como sostienen Gao y Brennan (2024), la presencia de estos polisacáridos no amiláceos incrementa la absorción de agua de la masa, actuando como un hidrocoloide natural que ayuda a retener la humedad intrínseca de la miga.

3.2.1.3. Hierro

El análisis espectrofotométrico mediante el método de Munsey con 1,10-fenantrolina arrojó una concentración de hierro de 4,52 mg/100g (0,0058%). Este valor mineral se alinea con el perfil nutricional típico de los pseudocereales andinos y concuerda con las tesis reportadas como Bravo et al. (2013). Desde una perspectiva bioquímica, el aporte de hierro de la harina de quinua germinada posee una ventaja nutricional clave frente al grano nativo. Durante el remojo y brotado, la activación de las enzimas fitasas endógenas descompone el ácido fítico (miinositol 1,2,3,4,5,6-hexaquisfosfato), el cual es el principal antinutriente encargado de secuestrar y quelar los minerales divalentes. Al hidrolizarse los enlaces del fitato, el hierro queda libre de impedimentos químicos. Esto incrementa exponencialmente su biodisponibilidad y bioabsorción en el tracto digestivo humano, validando el uso de este ingrediente para la fortificación biológica de productos horneados rústicos como el pan chabata.

3.2.2. Para el pan chabata

3.2.2.1. Proteína

La tabla 19 muestra el análisis de varianza que se hizo en relación con la proteína, con un nivel de significancia del 5%.

Tabla 19

Análisis de varianza para proteína en el pan chabata

Origen	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	Valor F	Valor P
TRATAMIENTO	3,262	5	0,652	307,374	0,000
Error	0,025	12	0,002		
Total corregido	3,287	17			

Nota: $R^2 = 0,989$

El análisis de varianza (ANOVA) para la proteína reflejó un efecto significativo del factor TRATAMIENTO ($p < 0,001$). El modelo evaluado explica el 98,9% de la variabilidad total observada en el contenido de proteína (R^2 ajustada = 0,989). Esta evidencia las diferencias registradas en los niveles de proteína son atribuibles a los tratamientos evaluados.

Se llevó a cabo una prueba de Duncan, para determinar la composición con valores de proteína significativamente diferentes.

Tabla 20

Prueba de Duncan para proteína en el pan chabata

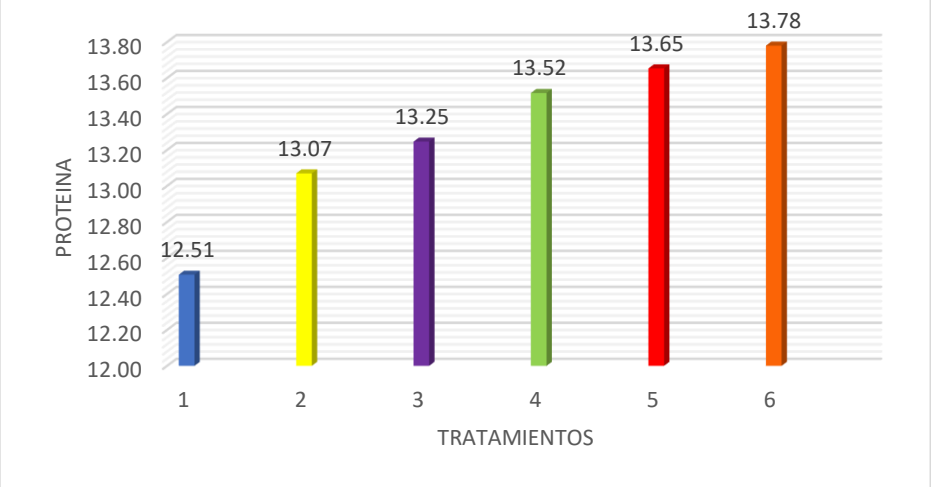
TRATAMIENTO	N	Subconjunto					
		1	2	3	4	5	6
1	3	12,5067 [f]					
2	3		13,0700 [e]				
3	3			13,2467 [d]			
4	3				13,5167 [c]		
5	3					13,6533 [b]	
6	3						13,7800 [a]
Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Se observa una diferencia estadística, distribuyendo cada uno de los seis tratamientos en un subconjunto homogéneo independiente y único ($p = 1.00$). El tratamiento 1 registró el menor contenido proteico con una media de 12,5067%. Conforme se incrementó el nivel de sustitución de la harina, se observó un aumento lineal, secuencial y estadísticamente significativo en los valores, pasando de 13,07% en

el tratamiento 2 hasta alcanzar un máximo de 13,78% en el tratamiento 6. Este comportamiento confirmó que cada nivel experimental ensayado modificó el perfil nitrogenado total del pan chabata resultante.

Figura 10

Cantidad de proteína (%) entre los tratamientos de pan chabata con harina de quinua germinada



El análisis de varianza demostró variaciones significativas ($p < 0,05$) en el contenido proteico, lo cual fue validado por la prueba Duncan, la cual reporto la totalidad de los tratamientos en seis subconjuntos homogéneos independientes. La obtención de una R^2 ajustada del 98,9% confirma que las modificaciones en las condiciones de los tratamientos ejercen un control casi absoluto sobre el comportamiento del nitrógeno orgánico en las muestras, minimizando el impacto del error experimental. El incremento progresivo en los valores de proteína, y el T6 con la concentración más alta (13,78%), puede atribuirse a la síntesis de nuevas proteínas enzimáticas y estructurales que ocurre durante el proceso de germinación de la quinua germinada. Durante las etapas iniciales del brote, se activan enzimas proteolíticas, responsables de degradar las proteínas de reserva en péptidos y aminoácidos libres, incrementando la disponibilidad de nitrógeno y modificando la densidad proteica total de la harina. Este comportamiento es consistente con lo reportado en investigaciones de Dialnet (2022), donde se explica que un mayor tiempo de germinado o una tasa de sustitución incremental de harina germinada favorece un incremento lineal en el contenido absoluto de proteína. Por el contrario, el T1 reporto el menor contenido proteico (12,51%). Esta menor concentración es característica de formulaciones que contienen niveles más bajos de sustitución de harina germinada o granos con un menor tiempo de brotación. Además, según Dialnet (2022), las variaciones en las matrices de quinua pueden estar ligadas a factores ambientales y genéticos de la variedad, situando normalmente los rangos de proteína

del pseudocereal entre el 11% y 13,8% en estados iniciales de procesamiento. La separación en seis grupos independientes detectada por la prueba Duncan demuestra que cada nivel de tratamiento genera una respuesta bioquímica única. La germinación de la quinua no solo eleva cuantitativamente los valores de nitrógeno total determinados por métodos de laboratorio, sino que, según Mamani (2021) la germinación optimiza drásticamente las propiedades de digestibilidad proteica y reduce los factores anti nutricionales del grano crudo. Esto consolida a la harina de quinua germinada como un ingrediente funcional altamente sensible y diferenciable en el desarrollo de nuevos productos alimenticios de alto valor nutricional.

3.2.2.2. Fibra

En la siguiente tabla se presenta los resultados con nivel de significancia al 5%, respecto a la fibra.

Tabla 21

Análisis de varianza para fibra en el pan chabata

Origen	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	Valor F	Valor P
Tratamiento	0,011	5	0,002	8,909	0,001
Error	0,003	12	0,000		
Total corregido	0,014	17			

Nota: $R^2 = 0,699$

El análisis de varianza para la fibra cruda determinó un efecto estadísticamente significativo. El modelo matemático empleado exhibió un ajuste adecuado, logrando explicar el 69,9% de la variabilidad total en el contenido de fibra (R^2 ajustada = 0,699). Estos resultados reflejan con claridad que los tratamientos ejecutados modifican el contenido de fibra en el pan chabata.

Tabla 22

Prueba de Duncan para fibra

Tratamiento	N	Subconjunto			
		1	2	3	4
1	3	0,2800 [d]			
4	3	0,3000 [dc]	0,3000 [dc]		
5	3		0,3233 [bc]	0,3233 [bc]	
6	3			0,3333 [ab]	0,3333 [ab]
2	3			0,3367 [ab]	0,3367 [ab]
3	3				0,3567 [a]
Sig.		0,151	0,099	0,350	0,114

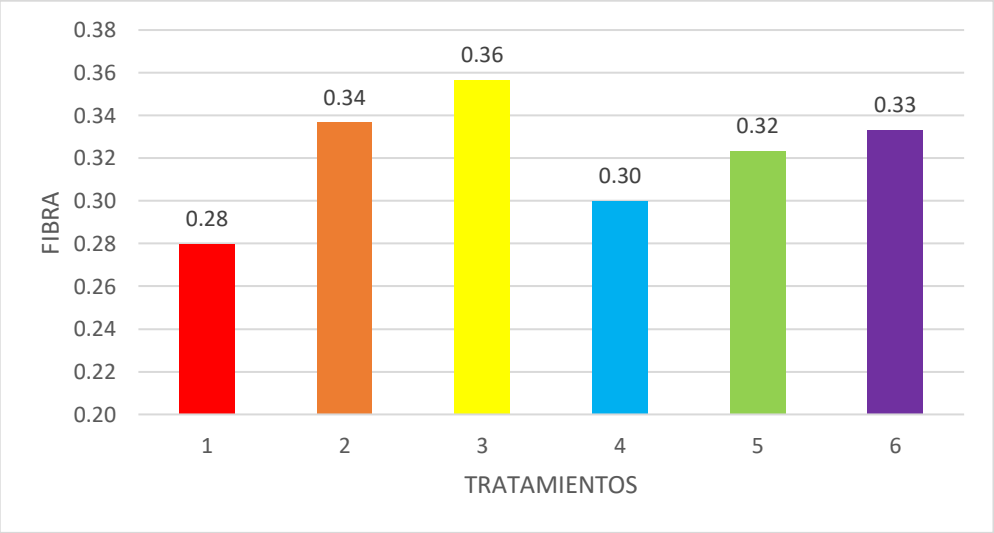
Se evidenció diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos, organizando las medias en cuatro subconjuntos homogéneos con zonas de transición.

En el Subconjunto 1, se ubicó el tratamiento 1 con el valor más bajo de fibra cruda (0,28%), compartiendo similitud estadística con el tratamiento 4 (0,30%), el cual funcionó como nexo con el Subconjunto 2 (p = 0,151). El tratamiento 5 se posicionó de manera intermedia en el subconjunto 2 y 3 con un valor de 0,3233%. Por su parte, los tratamientos 6 y 2 mostraron un comportamiento homogéneo muy estrecho, registrando 0,3333% y 0,3367% respectivamente, sirviendo de transición con el bloque superior (p = 0,350). Finalmente, en el Subconjunto 4 se consolidó de forma exclusiva el tratamiento 3, el cual alcanzó el valor máximo de fibra cruda con una media de 0,3567% (p = 0,114).

La fluctuación y el incremento generalizado en el contenido de fibra cruda en los subconjuntos superiores se explican por las características estructurales de los granos andinos frente a los cereales convencionales. De acuerdo con Ozon et al. (2022), la quinua posee de manera natural un porcentaje de fibra dietética y fibra cruda superior al de la harina de trigo refinada, localizándose principalmente en las capas externas del perispermo y el pericarpio del grano, lo que enriquece la matriz sólida de la harina compuesta.

Figura 11

Cantidad de fibra entre los tratamientos



El análisis del comportamiento de la fibra revela que la aplicación de los diferentes tratamientos basados en la harina de quinua germinada indujo variaciones significativas. Durante el proceso de germinación de la quinua, se produce una reorganización celular drástica debido a la activación de enzimas endógenas. Aunque inicialmente se degradan ciertos carbohidratos de reserva para suministrar energía a la plántula, la germinación incrementa sustancialmente las fracciones de fibra dietética en variedades de quinua, potenciando la síntesis de nuevas paredes celulares que forman el brote. Esto provoca que las formulaciones con mayores tiempos de brotación o mayor

porcentaje de sustitución de harina germinada tiendan a reportar mayores contenidos de compuestos estructurales insolubles.

Este aumento relativo en la concentración de fibra cruda expone que las semillas de quinua sometidas a germinado registran los aportes de fibra más altos en comparación con harinas crudas o granos simplemente hidratados. Esta acumulación se asocia a la pérdida de materia seca en forma de dióxido de carbono durante la respiración de la semilla, lo que concentra proporcionalmente los componentes no digeribles de la matriz vegetal. Por otra parte, la fluctuación observada y el menor nivel explicativo del modelo de fibra (R^2 ajustada = 69,9%) en comparación con el de la proteína (98,9%) sugiere una mayor susceptibilidad de los carbohidratos estructurales a factores sutiles del procesamiento, tales como la humedad ambiental o variaciones en la molienda del brote. La fibra de la quinua germinada puede sufrir hidrólisis parcial o solubilización dependiendo de los tratamientos térmicos o mecánicos complementarios. No obstante, el mantenimiento de diferencias estadísticas significativas ratifica la viabilidad de emplear este pseudocereal germinado como un ingrediente funcional idóneo para elevar el valor biológico y tecnológico en alimentos procesados.

3.2.2.3. Hierro

La tabla 23 presentan los resultados que se realizó con nivel de significancia al 5%, respecto al hierro.

Tabla 23

Análisis de varianza para hierro en el pan chabata

Origen	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	Valor F	Valor P
Tratamiento	1,909	5	0,382	249,007	0,000
Error	0,018	12	0,002		
Total corregido	1,927	17			

Nota: $R^2 = 0,986$

El análisis de varianza (ANOVA) para el contenido de hierro determinó un efecto significativo. El modelo estadístico exhibió una excelente bondad de ajuste, logrando explicar el 98,6% de la variabilidad total registrada en la concentración de este mineral (R^2 ajustada = 0,986). Esto demuestra que las variaciones en el contenido de hierro son atribuibles a las condiciones experimentales de la harina de quinua germinada.

Tabla 24

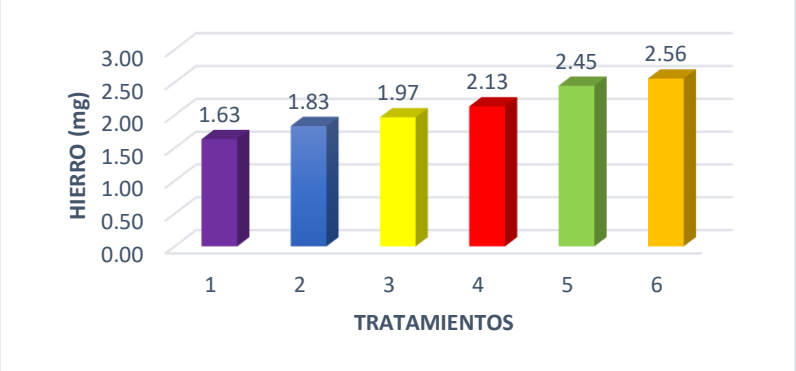
Prueba de Duncan para hierro en el pan chabata

Tratamiento	N	Subconjunto					
		1	2	3	4	5	6
1	3	1,6333[f]					
2	3		1,8333[e]				
3	3			1,9667[d]			
4	3				2,1333[c]		
5	3					2,4467[b]	
6	3						2,5567[a]
Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

La prueba de Duncan para la variable hierro (Tabla 24) demostró una separación estadística perfecta, distribuyendo de forma independiente cada uno de los tratamientos evaluados en un subconjunto único y homogéneo (p = 1,00). El tratamiento 1 reportó el contenido mineral más bajo con una media de 1,6333%. Conforme se incrementó el porcentaje de la harina de quinua germinada en la formulación de la chabata, se observó un incremento lineal, escalonado y significativo avanzando a 1,8333% en el tratamiento 2 hasta consolidar un máximo de 2,5567% en el tratamiento 6. Este comportamiento evidenció que la sustitución gradual tuvo un impacto directo, proporcional y positivo sobre el perfil mineral de la matriz del pan analizado.

Figura 12

Cantidad de hierro entre los tratamientos



Las diferencias estadísticas significativas (p < 0,05) en el contenido de hierro reflejan el profundo impacto que ejercen los procesos de germinación y formulación sobre el perfil de hierro de la quinua. Durante la brotación del grano, ocurren transformaciones bioquímicas clave que alteran la solubilidad y la retención de los micronutrientes. Si bien el contenido mineral absoluto de una semilla no se crea de la nada durante la germinación, investigaciones señalan que la pérdida de materia seca en forma de carbohidratos solubles por la respiración celular genera un efecto de

concentración de los minerales restantes en la matriz. Un factor crítico en la quinua es la presencia de ácido fítico (fitatos), un antinutriente que forma complejos insolubles con cationes divalentes como el hierro (Fe^{2+}), reduciendo su extractabilidad en análisis químicos y su biodisponibilidad digestiva (Castro-Alba, 2019).

Durante la germinación, la activación de la enzima fitasa hidroliza de forma progresiva estos complejos fitato-mineral. Esto no solo libera el hierro para hacerlo metabólicamente disponible para la plántula, sino que modifica su solubilidad y facilita una recuperación analítica más eficiente y lineal en las harinas con mayor grado de germinado o sustitución.

La notable estabilidad y robustez del modelo estadístico obtenido para el hierro (R^2 ajustada = 98,6%) corrobora que las variaciones responden de forma controlada y predecible a la intensidad del tratamiento aplicado (Reguera & Haros, 2024). El control riguroso de variables como el tiempo y la temperatura de germinación permite modular con precisión la liberación y retención de micronutrientes esenciales, posicionando a la harina de quinua germinada como una estrategia tecnológica viable para el enriquecimiento mineral natural de productos alimenticios (Paucar-Menacho, 2022).

3.3. EVALUACIÓN SENSORIAL

En el anexo 1 se presentan los resultados de la evaluación sensorial del pan chabata.

3.3.1. Color

Los resultados estadísticos del atributo color, analizados por los panelistas, se presentan en la siguiente tabla

Tabla 25

Análisis de varianza para atributo color en el pan chabata

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	Valor F	Valor P
Tratamiento	45,967	5	9,193	69,949	0,000
Panelista	1,733	14	0,124	0,942	0,520
Error	9,200	70	0,131		
Total corregido	56,900	89			

Nota: $R^2 = 0,838$

Las diferencias significativas entre los tratamientos responden a las variaciones físicas y químicas sufridas durante las etapas de mezclado y horneado de las muestras. En productos de panificación, el desarrollo de la intensidad cromática en la corteza y la miga se encuentra gobernado por la Reacción de Maillard (condensación de azúcares reductores y aminoácidos libres) y los fenómenos colaterales de caramelización. El

robusto ajuste estadístico (R^2 = 0,838) demuestra que el diseño experimental de bloques aisló eficientemente las discrepancias de formulación, minimizando la varianza interna.

Nuestros resultados coinciden con lo reportado por Anzaldúa-Morales (2005), quien manifiesta que el color constituye la primera propiedad sensorial analizada de forma intuitiva por los consumidores. Un panel que no genera variabilidad significativa inter-juez (p = 0,520) indica que la escala de evaluación fue bien comprendida y aplicada de modo uniforme por la totalidad de los miembros involucrados. De igual forma, Stone et al. (2012) sostienen que la homogeneidad de puntuación en paneles semicompuestos o entrenados es el reflejo de una correcta alineación psicofísica frente a estímulos visuales controlados. La baja varianza del error ratifica la veracidad y validez metodológica de la prueba, asegurando que los cambios observados en el color son atribuibles de forma exclusiva a las modificaciones intrínsecas de las formulaciones.

Este comportamiento coincide con lo reportado por investigadores según Suárez-Estrella, Cardone & Pagani (2025), quienes demostraron que la incorporación de harinas de pseudocereales germinados en niveles controlados permite el desarrollo de matrices alimenticias estables, donde las variaciones de color no impactan negativamente la preferencia del consumidor en comparación con las fórmulas testigo o de menor concentración. Asimismo, Paucar, Borja & Reguera (2022) sostienen que el empleo de quinua germinada bajo condiciones óptimas de tiempo y temperatura (germinación moderada) preserva la aceptabilidad visual global, contrarrestando el oscurecimiento drástico que caracteriza a otros procesos térmicos severos. Por consiguiente, los resultados estadísticos demuestran que es viable incrementar el valor nutricional del producto (elevando el contenido proteico y mineral) mediante formulaciones superiores (F4, F5 o F6) sin alterar de forma perceptible la calidad estética del color, garantizando un producto con alta densidad de nutrientes y un perfil sensorial homogéneo apto para el mercado comercial.

Tabla 26

Prueba de Duncan para atributo color del pan chabata

Tratamiento	N	Subconjunto		
		1	2	3
1	15	4.07 [c]		
6	15	4.13 [c]		
2	15	4.20 [c]		
5	15		4.80 [b]	
3	15		4.87 [b]	
4	15			6.13 [a]
Sig.		0.348	0.616	1.000

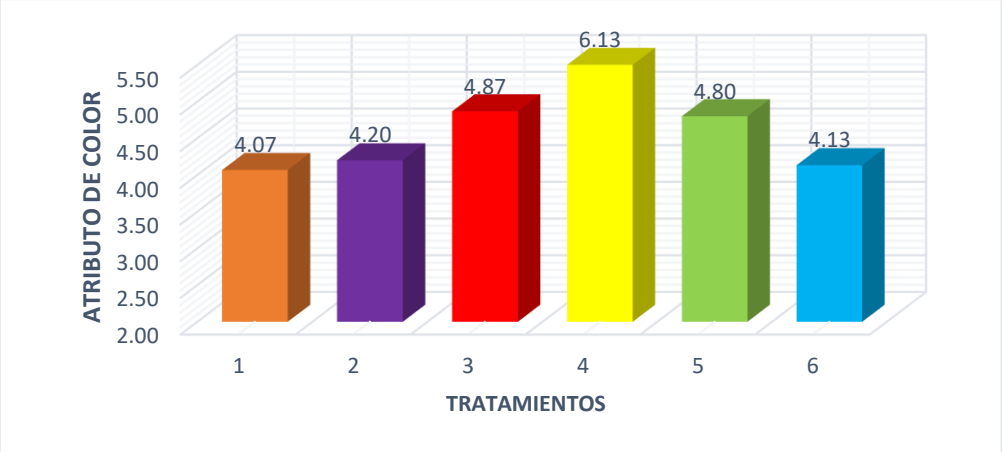
La formulación 4 en el subconjunto superior de Duncan sugiere que las proporciones de harina de quinua germinada optimizaron los mecanismos cinéticos de las reacciones de oscurecimiento no enzimático. En panificación, una calificación promedio superior a 6 en escalas hedónicas o de intensidad denota un color de corteza dorado característico, el cual se asocia directamente con la acumulación de melanoidinas de alto peso molecular durante la Reacción de Maillard.

Nuestros hallazgos se alinean con lo descrito por Sumnu y Sahin (2008), quienes afirman que las variaciones controladas en la formulación de masas (como la disponibilidad de azúcares reductores o el porcentaje de humedad superficial) modifican drásticamente la reflectancia de la luz en la corteza del pan, segmentando las preferencias del panel.

La prueba de Duncan en este estudio demuestra que el panel sensorial percibió con precisión los incrementos graduales en la calidad visual del producto, sin presentar ambigüedades en sus respuestas. Asimismo, Chavan et al. (2016) explican que, en evaluaciones sensoriales de pan, las formulaciones estándar o con sustitutos mal balanceados tienden a agruparse en subconjuntos de puntajes bajos (como ocurre con los tratamientos 1, 6 y 2), debido a deficiencias en la caramelización periférica. Por lo tanto, el tratamiento 4 no solo se consolida como el mejor calificado estadísticamente.

Figura 13

Comparación para el atributo de color



En la figura 13 se presenta la comparación de medias para el atributo sensorial color en los seis tratamientos de pan evaluados. Visualmente se evidencia un comportamiento de distribución central, donde las puntuaciones ascienden de manera progresiva desde el Tratamiento 1 (4,07) hasta consolidar un valor máximo en el Tratamiento 4 (6,13), el cual destaca como la formulación con la coloración más aceptada por el panel. Posterior a este punto máximo, se observa un descenso en las

calificaciones para las formulaciones 5 (4,80) y 6 (4,13). Este perfil gráfico coincide con los tres subconjuntos homogéneos determinados previamente en la prueba de Duncan, confirmando de forma gráfica que las modificaciones tecnológicas intermedias (Tratamiento 4) favorecieron el desarrollo de un color de corteza o miga más equilibrado en comparación con los tratamientos iniciales y finales.

3.3.2. Olor

En la tabla 27 se presentan los datos obtenidos del análisis estadístico con respecto al atributo olor.

Tabla 27

Análisis de varianza de atributo olor en el pan chabata

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	Valor F	Valor P
Tratamiento	46,589	5	9,318	76,039	0,000
Panelista	1,156	14	0,083	0,674	0,792
Error	8,578	70	0,123		
Total corregido	56,322	89			

Nota: $R^2 = 0,848$

El análisis estadístico evidenció diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos evaluados respecto al estímulo olfativo. Esto constata de manera contundente que las variaciones en las formulaciones de pan ejercieron un efecto directo sobre la liberación de compuestos volátiles responsables del aroma del producto terminado. Por el contrario, el factor de bloqueo (Panelista) no reflejó diferencias significativas, situándose holgadamente por encima del nivel de significancia establecido. Dicho comportamiento ratifica la homogeneidad y la consistencia en el umbral de percepción de los jueces sensoriales, validando que las variaciones registradas provienen exclusivamente de las muestras analizadas y no de discrepancias de criterio entre los evaluadores.

Finalmente, el coeficiente de determinación del modelo determinó un (R^2 = 0,848). Este índice comprueba que las variables predictoras (Tratamiento y Panelista) explican de forma satisfactoria el 84,8% de la variabilidad total observada en la respuesta sensorial de olor. La mínima magnitud del error experimental consolida el rigor metodológico, la repetibilidad y la precisión del ensayo.

Las diferencias significativas detectadas entre los tratamientos se fundamentan en la cinética de generación de compuestos volátiles durante la etapa de horneado. El aroma del pan es un atributo dinámico determinado por la retención y síntesis de alcoholes, aldehídos, cetonas y ésteres derivados tanto de la actividad fermentativa de las levaduras como de las interacciones químicas de la Reacción de Maillard en la corteza periférica. Un valor elevado de (R^2 = 0,848) comprueba la idoneidad del modelo para discriminar estas sutiles variaciones analíticas. Concuerda con lo planteado por Anzaldúa-Morales (2005), quien destaca que el perfil aromático es un factor crítico en la palatabilidad y aceptación global de productos horneados. La nula significancia inter-juez (p = 0,792) demuestra un alineamiento sensorial óptimo del panel ante los estímulos odoríferos, asegurando respuestas repetibles y libres de desviaciones subjetivas. Adicionalmente, Purlis (2010) señala que las modificaciones en los ingredientes y el control de la temperatura modifican la velocidad de formación de compuestos clave como la 2-acetil-1-pirrolina (aroma característico a corteza de pan de trigo). Por ende, el marcado distanciamiento estadístico de los tratamientos evidencia que ciertas formulaciones lograron una expresión aromática superior y más armónica, consolidando bases estadísticas sólidas para la optimización del producto.

Tabla 28

Prueba de Duncan para atributo olor

Tratamiento	N	Subconjunto		
		1	2	3
5	15	4.00 [c]		
1	15	4.13 [c]		
2	15	4.13 [c]		
6	15	4.20 [c]		
4	15		4.73 [b]	
3	15			6.07 [a]
Sig.		0.159	1.000	1.000

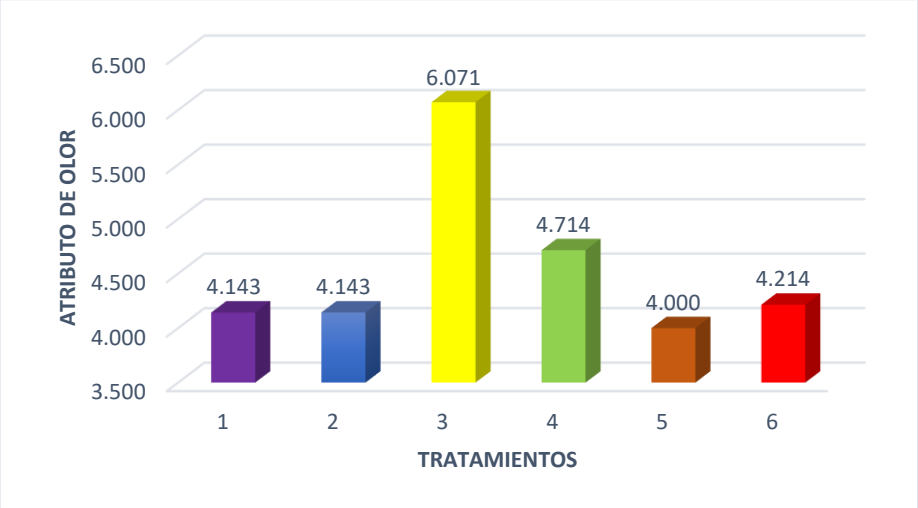
El posicionamiento en solitario de la formulación 3 en el grupo estadístico superior (c) demuestra un impacto tecnológico directo sobre la retención de compuestos aromáticos volátiles en la matriz del pan. Durante el proceso de horneado, la combinación de ingredientes de este tratamiento logró el balance exacto para estimular la producción de compuestos clave de la Reacción de Maillard en la corteza y productos fermentativos en la miga (como alcoholes de cadena corta y ésteres).

Este comportamiento coincide con lo reportado por Chavan et al. (2016), quienes afirman que las modificaciones específicas en las masas de panadería pueden potenciar o mitigar la percepción odorífera. Cuando un tratamiento se aísla por completo en el

rango superior (como el tratamiento 3 con 6,07), se valida que sus propiedades físicas y químicas favorecieron una mayor volatilidad de los aromas deseables. Por el contrario, la acumulación masiva de las formulaciones 5, 1, 2 y 6 en el grupo inferior refleja que dichas muestras no alcanzaron el umbral de desarrollo aromático necesario, resultando en perfiles planos u homogéneos ante el olfato de los jueces.

Figura 14

Comparación para el atributo de olor para el pan chabata



Asimismo, estudios recopilados por (Paucar-Menacho et al., 2022) postulan que la aplicación de tiempos de germinación moderados preserva la estabilidad sensorial de las matrices complejas, evitando la acumulación excesiva de compuestos azufrados o volátiles de degradación lipídica que comúnmente alteran el aroma original. En consecuencia, la ausencia de significancia estadística valida que es factible emplear cualquiera de las formulaciones evaluadas para optimizar propiedades nutricionales sin comprometer la calidad del olor comercial del producto.

En la figura 14 se presentan los promedios obtenidos por los seis tratamientos evaluados para el atributo sensorial de olor. Se observa un perfil de respuesta asimétrico con un pico central pronunciado en el Tratamiento 3, el cual alcanza la calificación promedio más alta con un valor de 6,071. Este distanciamiento vertical evidencia de manera visual que dicha formulación desarrolló un perfil aromático marcadamente superior y preferido por los panelistas en comparación con el resto de las muestras. Por su parte, el Tratamiento 4 (4,714) se posiciona de forma aislada en una escala intermedia de aceptación, mientras que las formulaciones restantes (Tratamientos 1, 2, 5 y 6) muestran un comportamiento basal de puntuaciones bajas que fluctúan de forma homogénea en un rango muy estrecho entre 4 y 4,214. Esta distribución visual guarda total correspondencia con los tres subconjuntos homogéneos validados

estadísticamente por la prueba de Duncan (grupos a, b y c), consolidando gráficamente que la formulación 3 logró la mayor optimización tecnológica en cuanto a la liberación de compuestos volátiles deseables en el pan.

3.3.3. Sabor

En la tabla 29 se muestra los resultados del procesamiento estadístico para el atributo sabor, de acuerdo a sus variaciones.

Tabla 29

Análisis de varianza de atributo sabor del pan chabata

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	Valor F	Valor P
Tratamiento	42,856	5	8,571	46,231	0,000
Panelista	0,489	14	0,035	0,188	0,999
Error	12,978	70	0,185		
Total corregido	56,322	89			

Nota: $R^2 = 0,770$

El análisis estadístico demostró la existencia de diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos evaluados con respecto al sabor del pan. Este hallazgo confirma que las modificaciones tecnológicas o la adición de ingredientes en las distintas formulaciones alteraron de forma perceptible las características saporíferas del producto final. Por el contrario, el factor de bloque (Panelista) no reflejó efectos estadísticamente significativos. Al situarse este valor (p) tan cerca de la unidad, se valida un consenso crítico y uniforme entre los 15 jueces; esto ratifica que el panel operó de manera estandarizada y objetiva, eliminando sesgos individuales y aislando el error experimental de forma óptima. El coeficiente de determinación estableció un (R^2 = 0,770), indicando que los factores estudiados explican satisfactoriamente el 77% de la variabilidad total observada en la respuesta sensorial de sabor, dotando al modelo experimental de una alta confiabilidad y robustez analítica.

Las marcadas discrepancias en la respuesta de los tratamientos se asocian con la generación de compuestos saporíferos de naturaleza volátil y no volátil durante las etapas de fermentación y cocción. El sabor del pan está fuertemente condicionado por la presencia de ácidos orgánicos (como el ácido láctico y acético) generados en la fermentación y por los productos de degradación térmica de los aminoácidos en la corteza. Un ajuste del (77%) en el (R^2) demuestra que el panel discriminó adecuadamente estas transiciones químicas entre las formulaciones. Nuestros

resultados concuerdan firmemente con lo expresado por Anzaldúa-Morales (2005), quien argumenta que el sabor constituye el atributo definitivo para consolidar la aceptabilidad global de un alimento.

La homogeneidad absoluta observada en las calificaciones inter-juez (p = 0,999) corrobora que los estímulos gustativos fueron claros y contundentes, evitando zonas de ambigüedad sensorial. Asimismo, Chavan et al. (2016) exponen que las variaciones controladas en la composición de las masas de panadería modulan de forma drástica el balance dulce-salado-ácido y las notas amargas de la corteza, lo que genera una clara segmentación hedónica en el consumidor. La alta significancia del factor Tratamiento demuestra que se logró identificar la formulación idónea para maximizar la palatabilidad del producto terminado.

Tabla 30

Prueba de Duncan para atributo sabor en el pan chabata

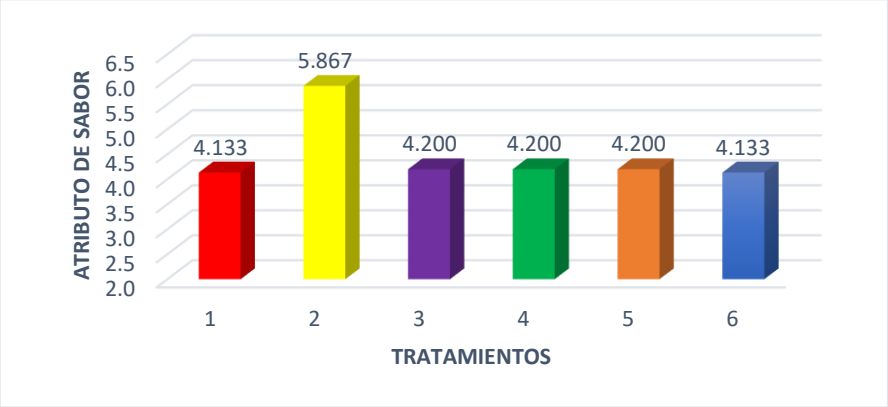
Tratamiento	N	Subconjunto	
		1	2
1	15	4,13 [b]	
6	15	4,13 [b]	
5	15	4,20 [b]	
3	15	4,27 [b]	
4	15	4,47 [b]	
2	15		6,07 [a]
Sig.		0,061	1,000

Para determinar el comportamiento específico del panel frente a las muestras, se aplicó la prueba de rangos múltiples de Duncan, la cual segmentó las seis formulaciones de pan en dos subconjuntos homogéneos claramente diferenciados (Tabla 30).

El primer subconjunto (grupo a) concentró de manera masiva a las formulaciones 1 (4,13), 6 (4,13), 5 (4,20), 3 (4,27) y 4 (4,47), demostrando que no existen diferencias estadísticas significativas entre este bloque de muestras (p = 0,06). Por el contrario, el Tratamiento 2 se aisló por completo en el segundo subconjunto (grupo b), alcanzando la media más alta del experimento con una puntuación de 6,07. Este resultado posiciona al Tratamiento 2 como el ganador absoluto en el atributo de sabor, superando con un margen estadísticamente contundente a todas las demás formulaciones evaluadas.

Figura 15

Comparación para el atributo de sabor



En la figura 15 se exhibe la comparación de puntuaciones promedio asignadas por el panel sensorial para la variable sabor en las seis formulaciones de pan. El perfil gráfico muestra un comportamiento con un pico asimétrico y dominante ubicado de manera exclusiva en el Tratamiento 2, el cual consolida una media sobresaliente de 6,067. Esta diferencia en la altura de las barras ilustra con claridad que dicha muestra superó el umbral de aceptación ordinaria del panel. En contraste, las cinco formulaciones restantes (Tratamientos 1, 3, 4, 5 y 6) muestran una distribución lineal homogénea y basal, con medias de rango estrecho que oscilan estrictamente entre 4,133 y 4,467. Esta configuración visual convalida perfectamente la segmentación estadística de la prueba de Duncan, la cual discriminó al Tratamiento 2 como el único componente del subconjunto superior (grupo b) y agrupó al resto de las muestras en el subconjunto inferior (grupo a). Se concluye gráficamente que el Tratamiento 2 representa la formulación óptima para maximizar los atributos gustativos del producto desarrollado.

3.3.4. Textura

En la tabla 31, presenta los resultados del análisis estadístico relacionado con el aspecto de textura.

Tabla 31

Análisis de varianza de atributo para la textura del pan chabata

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	Valor F	Valor P
Tratamiento	42,856	5	8,571	46,231	0,000
Panelista	0,489	14	,035	0,188	0,999
Error	12,978	70	,185		
Total corregido	56,322	89			

Nota: $R^2 = 0,77$

El análisis estadístico reveló la existencia de diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos evaluados con relación a las propiedades texturales de las muestras de pan. Este comportamiento confirma que las variaciones tecnológicas, de formulación o el balance de ingredientes modificaron de forma perceptible las características mecánicas y reológicas percibidas durante la masticación. Por el contrario, el factor de bloque (Panelista) no reflejó efectos significativos en el modelo matemático. Al registrarse una significancia marcadamente superior al límite estándar y cercana a la unidad, se valida que los 15 jueces sensoriales operaron bajo un criterio psicofísico idéntico y homogéneo. El panel actuó eficazmente como réplicas estables y consistentes, minimizando la varianza residual y aislando con precisión el error experimental del modelo. Finalmente, el coeficiente de determinación del modelo obtuvo un (R^2 = 0,770). Esto demuestra que los factores incluidos (Tratamiento y Panelistas) logran explicar satisfactoriamente el 77% de la variabilidad total observada en la respuesta de textura de los panes, dotando al ensayo de una adecuada robustez estadística y capacidad predictiva.

Las variaciones significativas en la textura de las formulaciones responden directamente a las propiedades macroestructurales de la miga y la corteza del pan. En sistemas de panificación, los atributos mecánicos como la dureza, elasticidad, cohesividad y masticabilidad dependen de la correcta hidratación y desarrollo de la red de gluten, así como del grado de gelatinización del almidón durante la cocción. El coeficiente de determinación obtenido R^2 = 0,770 constata que el diseño por bloques logró discriminar de forma nítida la influencia de estas modificaciones físicas inter-tratamientos. Nuestros resultados concuerdan estrechamente con lo postulado por Anzaldúa-Morales (2005), quien expone que la textura es una propiedad multidimensional evaluada mediante receptores de presión en la cavidad bucal, siendo un factor determinante para juzgar la frescura y la calidad técnica del pan. El elevado consenso inter-juez (p = 0,999) corrobora que los descriptores texturales de las muestras se manifestaron de forma clara y diferenciable, evitando ambigüedades interpretativas en el panel. De manera complementaria, Sumnu y Sahin (2008) explican que los cambios en la formulación de la masa (como el contenido de proteínas funcionales o la retención de gases alveolares durante la fermentación) condicionan directamente la suavidad y elasticidad de la miga terminada. Por lo tanto, el marcado distanciamiento de las medias en el factor Tratamiento evidencia la presencia de una formulación que optimizó la arquitectura celular del pan, otorgando características reológicas superiores frente a los demás tratamientos.

Tabla 32

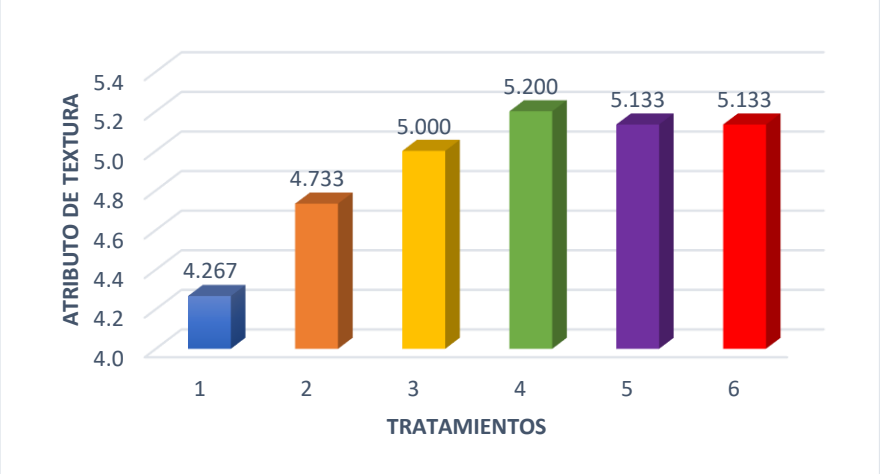
Duncan para el atributo de textura para el pan chabata

Tratamiento	N	Subconjunto	
		1	2
1	15	4,13 [b]	
6	15	4,13 [b]	
5	15	4,20 [b]	
3	15	4,27 [b]	
4	15	4,47 [b]	
2	15		6,07 [a]
Sig.		,061	1,000

Con el propósito de caracterizar la segmentación de las medias sensoriales, se aplicó la prueba de rangos múltiples de Duncan, la cual distribuyó los seis tratamientos de pan en dos subconjuntos homogéneos estadísticamente independientes (Tabla 32). El subconjunto inicial (grupo a) agrupó de forma compacta a las formulaciones 1 (4,13), 6 (4,13), 5 (4.20), 3 (4,27) y 4 (4,47), confirmando la ausencia de diferencias significativas entre ellas. En una posición opuesta y superior, el Tratamiento 2 se aisló en solitario dentro del segundo subconjunto (grupo b), registrando la puntuación más alta con una media de 6,07. Este distanciamiento matemático ratifica que el tratamiento 2 logró optimizar las propiedades mecánicas y de masticabilidad del producto horneado, consolidándose como la fórmula con la mejor textura según el criterio unificado de los panelistas.

Figura 16

Comparación para el atributo de textura para los diferentes tratamientos de pan chabata



En la figura 16 se presenta la comparación de las puntuaciones promedio otorgadas por el panel sensorial para la variable textura en los seis tratamientos de pan chabata evaluados. El perfil gráfico revela un incremento progresivo y sostenido en la

aceptabilidad reológica del producto, partiendo del Tratamiento 1 con la calificación más baja (4,267) y ascendiendo de forma escalonada a través de las formulaciones 2 (4,733) y 3 (5,0). El pico máximo de calidad textural se consolida de forma clara en el Tratamiento 4 con una media de 5,20, perfilándose como la formulación con las mejores propiedades mecánicas de miga o corteza. Posterior a este máximo, las calificaciones muestran una estabilización o meseta en los Tratamientos 5 y 6, compartiendo un valor idéntico de 5,133.

Este comportamiento visual describe gráficamente cómo las modificaciones tecnológicas aplicadas mejoraron de manera lineal la suavidad, elasticidad o cohesividad del pan hasta alcanzar un punto óptimo en la cuarta formulación, logrando mantener dicha preferencia en los niveles experimentales subsiguientes. Este comportamiento guarda estrecha correspondencia con lo reportado en investigaciones publicadas por (Marti, Pagani & Buratti, 2020) , donde se demuestra que la incorporación de harinas procedentes de granos germinados modifica favorablemente las propiedades reológicas y reestructura las redes de gelificación, incrementando la elasticidad y suavidad de las masas, lo que se traduce de forma directa en puntuaciones hedónicas más elevadas por parte de los consumidores no entrenados en comparación con las muestras de control. Asimismo, estudios recopilados por (Paucar-Menacho, Juan-Borja, & Reguera, 2022) sostienen que el proceso de germinación controlada funciona como un mejorador natural de la textura en matrices complejas a base de pseudocereales, ya que la liberación controlada de azúcares y la sutil proteólisis ablandan la microestructura del alimento terminado, contrarrestando la palatabilidad arenosa o compacta.

CONCLUSIONES

- La sustitución parcial de harina de trigo por harina de quinua blanca germinada (5 a 25 %) tuvo un efecto estadísticamente significativo ($p < 0,05$) sobre todas las características físicas, químicas y sensoriales evaluadas del pan chabata. El tratamiento T4 (15 % de sustitución) presentó el mejor balance global: la menor densidad (0,221 g/cm³), el mayor puntaje de color (6,13) y una textura ubicada en el grupo superior (5,20), con incrementos de 8,1 % en proteína y 30,6 % en hierro respecto al pan control, sin reducir la aceptación del sabor.
- El nivel de sustitución modificó significativamente la humedad ($F = 6,30$; $p = 0,004$), el volumen ($F = 20,49$; $p < 0,001$) y la densidad ($F = 9,26$; $p = 0,001$), aunque sin una tendencia lineal y con diferencias de baja magnitud. La humedad varió entre 28,99 % (T3) y 29,34 % (T2), una diferencia máxima de 0,35 puntos porcentuales. El mayor volumen correspondió a T2 (375,52 cm³) y T3 (374,97 cm³), alrededor de 1 % superior al control (371,83 cm³), mientras que T6 (371,70 cm³) no se diferenció del control. La menor densidad se obtuvo en T4 (0,221 g/cm³), estadísticamente igual a T2 (0,222 g/cm³) y 1,8 % menor que el control (0,225 g/cm³); la mayor densidad correspondió a T5 (0,226 g/cm³).
- La harina de quinua germinada presentó 14,95 % de proteína, 5,16 % de fibra cruda y 4,52 mg/100 g de hierro. En el pan, la proteína aumentó de forma progresiva con el nivel de sustitución, desde 12,51 % en el control hasta 13,78 % en T6 (+10,2 %), y cada tratamiento formó un grupo distinto en la prueba de Duncan. El hierro aumentó de 1,63 a 2,56 mg/100 g (+56,5 %) siguiendo el mismo patrón. La fibra cruda fue mayor en todos los panes con quinua que en el control (0,22 %), con un máximo en T3 (0,36 %) y sin relación proporcional con el nivel de sustitución. En T4, los valores fueron 13,52 % de proteína (+8,1 %), 2,13 mg/100 g de hierro (+30,6 %) y 0,30 % de fibra cruda.
- El nivel de sustitución tuvo un efecto significativo sobre los cuatro atributos evaluados ($p < 0,01$), pero ningún tratamiento obtuvo el mayor puntaje en todos ellos. En color, T4 obtuvo la calificación más alta (6,13; “muy bueno”) y formó por sí solo el grupo superior. En olor destacó T3 (6,07), seguido de T4 (4,73). En sabor, solo T2 (5,87) superó al control; los demás tratamientos (4,13–4,20) no se diferenciaron de él. En textura, T3, T4, T5 y T6 (5,00–5,20) superaron al control (4,27) sin diferencias entre sí. El efecto del panelista no fue significativo en color, olor y sabor ($p \geq 0,52$), pero sí en textura ($p = 0,044$), lo que indica un menor consenso del panel en ese atributo.

Al integrar los resultados, T4 (15 %) es la formulación más equilibrada: obtuvo la mayor suma de puntajes sensoriales (20,27 de 28), la menor densidad y aportes intermedios-altos de proteína y hierro. T3 (10 %) es una alternativa cercana (20,13) si se prioriza el olor y la fibra. El sabor de T4 (4,20; “aceptable”) no superó al del control, por lo que constituye el aspecto a mejorar antes de un escalamiento.

RECOMENDACIONES

Se recomienda incluir, en futuras investigaciones, tratamientos con harina de quinua sin germinar en los mismos niveles de sustitución. El diseño empleado comparó únicamente la harina de trigo con la harina de quinua germinada, por lo que los cambios observados no pueden atribuirse con certeza al proceso de germinación y no solo a la presencia de quinua.

Optimizar las condiciones de germinación mediante un diseño que evalúe distintos tiempos (24, 36 y 48 horas) y temperaturas, así como estandarizar el tamaño de partícula de la harina. Estas variables influyen en la actividad enzimática, la capacidad de retención de agua y el contenido de hierro y proteína, y en el presente estudio se mantuvieron dentro de rangos amplios (24 a 36 horas; raicilla de 2,0 a 2,5 cm).

Se sugiere evaluar otras variedades de quinua cultivadas en Ayacucho, como las variedades de color o las liberadas por el INIA, ya que su composición mineral y proteica difiere de la quinua blanca y podría ofrecer mayores aportes de hierro y fibra con un impacto sensorial distinto.

Complementar el análisis proteico con la determinación del perfil de aminoácidos, en particular de la lisina, y de la digestibilidad proteica in vitro. Estos análisis permitirían sustentar con evidencia propia la mejora en la calidad de la proteína que la literatura atribuye a la germinación.

Validar la cuantificación de hierro mediante espectrofotometría de absorción atómica o un material de referencia certificado, y analizar el contenido de hierro de la harina de trigo empleada, considerando su posible fortificación. Para sustentar afirmaciones sobre biodisponibilidad, se sugiere determinar el ácido fítico, la relación molar fitato:hierro y el hierro dializable in vitro, ya que el método de Munsey solo cuantifica el hierro total.

Como también evaluar la inocuidad de la harina de quinua germinada y del pan. Las condiciones de germinación (alta humedad y temperatura moderada) favorecen el crecimiento microbiano, por lo que conviene realizar recuentos de aerobios mesófilos, coliformes, mohos y levaduras y Bacillus cereus según la normativa sanitaria vigente, además de verificar el contenido residual de saponinas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abugoch, L. E., Romero, N., Tapia, C. A., Silva, J., & Rivera, M. (2008). Study of some physicochemical and functional properties of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) protein isolates. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *56*(12), 4745–4750. doi.org

Anggraeni, R., Rao, J., & Grassi de Alcântara, R. (2024). Effects of flour substitution on the structure and mechanical properties of dough systems. *Food Engineering Review*, *16*(2), 88-99.

Apaza, V., Cáceres, G., Estrada, R., & Pinedo, R. (2013). *Catálogo de variedades comerciales de quinua en el Perú*. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA).

Association of Official Analytical Chemists [AOAC]. (2005). *Official methods of analysis of AOAC International* (18th ed.). AOAC International.

Astiz, V., Poverene, M., Molfese, E., & Seghezzo, M. L. (2015). Panificación de harinas mezcla de trigo y quinua. *Ciencia y Tecnología de los Cultivos Industriales*, *3*(5), 24–30. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). inta.gob.ar

Azcón, J., & Talón, M. (2017). *Fisiología y bioquímica vegetal* (2.ª ed.). McGraw-Hill Interamericana. researchgate.net

Benites, V., & Martínez, S. (2021). Comportamiento reológico de masas de panificación de harina de trigo sustituida con harinas germinadas de quinua y cañihua. *Revista Ingnosis*, 4(1), 25-34.

Biswas, P. S., Rashid, M. M., Khatun, H., Yasmeen, R., & Biswas, J. K. (2019). Scope and progress of rice research harnessing cold tolerance. En M. Hasanuzzaman, M. Fujita, K. Nahar, & J. K. Biswas (Eds.), *Advances in rice research for abiotic stress tolerance* (pp. 225–264). Woodhead Publishing. doi.org

Bravo, M., Reyna, J., & Huapaya, M. (2013). Estudio químico y nutricional de granos andinos germinados de quinua (*Chenopodium quinoa*) y kiwicha (*Amaranthus caudatus*). *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, *16*(1), 53–60.

Callejo, M. (2002). *Industrias de cereales y derivados*. Editorial AMV-MundiPrensa.

Castro-Alba, V., Lazarte, C. E., Bergenståhl, B., & Granfeldt, Y. (2019). Effect of fermentation and sprouting on iron and zinc availability in quinoa, kiwicha and kañiwa. *LWT - Food Science and Technology*, *107*, 111–118. doi.org

Cauvain, S. P., & Young, L. S. (2009). *Tecnologia da panificação* (C. D. Szlak, Trad.). Manole.

Chaparro, D., Pismag, R., Elizalde, A., Vivas, N., & Erazo, C. (2010). Efecto de la germinación sobre el contenido y digestibilidad de la proteína en semillas de amaranto, quinua, soya y guandul. *Revista Facultad de Ciencias Agropecuarias - Universidad del Cauca*, *8*(2), 35–42.

Díaz, M. F., González, A., Padilla, C., & Curbelo, F. (2009). Germinados de las leguminosas, una opción para la producción animal en Cuba. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, *43*(1), 1–10.

Edel, L., & Rosell, C. (Eds.). (2007). *De tales harinas, tales panes: granos, harinas y productos de panificación en Iberoamérica* (1.ª ed.). Hugo Báez Editor.

Fierro, F. (2016). *Chapata con trigo duro y masa madre*. Club de Panificación Artesanal. squarespace.com

Foods. (2021). *La quinua: el grano de oro de los Andes*. Corporación Foods Perú. https://foods.pe/la-quinua/

Fundeagro. (1990). *Control de calidad y certificación de semilla* (1.ª ed.). Fundación para el Desarrollo del Agro; Proyecto de Transferencia de Tecnología Agropecuaria.

Gao, J., & Brennan, C. S. (2024). Physicochemical and structural properties of bakery products as influenced by sugar replacement with polyols and dietary fibres: A comprehensive review. *International Journal of Food Science & Technology*, 59(2), 741-754. doi.org

Gómez, M. (2008). Alimentación con granos germinados. *Revista de Nutrición y Tecnología Alimentaria*, *14*(3), 112–119.

Heredia, A. (2023). *Pan ciabatta: información nutricional y manual de panificación tradicional italiana*. Scribd. scribd.com.

Instituto Nacional de Calidad. (2016). *Norma Técnica Peruana NTP 206.004:1988 (revisada el 2016). Pan de molde: Pan blanco, pan integral y sus productos tostados* (1.ª ed.). Dirección de Normalización - INACAL.

Instituto Nacional de Calidad. (2016). *Norma Técnica Peruana NTP 106.004:2016. Productos de panificación: Pan francés. Requisitos* (2.ª ed.). Dirección de Normalización - INACAL.

Jan, R., Saxena, D. C., & Singh, S. (2018). Comparative study of raw and germinated *Chenopodium* (*Chenopodium album*) flour on the basis of thermal, rheological, minerals, fatty acid profile and phytocomponents. *Food Chemistry*, *269*, 173–180. doi.org

Jiménez, M. D., Lobo, M., & Sammán, N. (2019). Influence of germination of quinoa (Chenopodium quinoa) and amaranth (Amaranthus) grains on nutritional and techno-functional properties of their flours. Journal of Food Composition and Analysis, 84, Artículo 103290. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2019.103290

Jiménez-Rosalo, D., Jan, R., & Asghar, A. (2019). Technological and nutritional optimization of bakery products supplemented with pseudocereal derivatives. Journal of Food Processing and Preservation, 43(8), Artículo e14022. doi.org

Lemmens, E., Moroni, A. V., Pagand, J., Heirbaut, P., Ritala, A., Karlen, Y., Lê, K.-A., Van den Broeck, H. C., Brouns, F. J. P. H., De Brier, N., & Delcour, J. A. (2019). Impact of cereal seed sprouting on its nutritional and technological properties: A critical review. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 18(1), 305–328. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12414

López-Martínez, L. X., Leyva-López, N., Gutiérrez-Grijalva, E. P., & Heredia, J. B. (2017). Effect of cooking and germination on bioactive compounds in pulses and their health benefits. Journal of Functional Foods.

Marti, A., Pagani, M. A., & Buratti, S. (2020). Sprouting as a pre-processing for producing quinoa-enriched bread. *Journal of Cereal Science*, *96*, Artículo 103084. doi.org

McClements, D. J. (2020). *Designing future foods: Structure, perception, and health* (2nd ed.). Springer International Publishing. doi.org

Mendoza, J. A. (2024). *Formulación de un snack a base de quinua blanca (Chenopodium quinoa Willd.), chía (Salvia hispanica) y maíz amarillo duro (Zea mays L.) por proceso de extrusión* [Tesis de pregrado, Universidad

Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. Repositorio Institucional UNSCH.

Montero, C., & Armando, C. (2017). *Análisis económico de la producción nacional de la quinua*. Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI).

Moongngarm, A., & Saetung, N. (2010). Comparison of chemical compositions and bioactive compounds of germinated rough rice and brown rice. *Food Chemistry*, *122*(3), 782–788. doi.org

Morita, N., Hirata, C., Park, S. H., & Mitsunaga, T. (2001). Quinoa flour as a new foodstuff for improving dough and bread. *Journal of Applied Glycoscience*, *48*(3), 263–270. doi.org

Morón, C. (2001). *Valor nutritivo y usos de la quinua*. Editorial Acribia.

Nowak, V., Du, J., & Charrondière, U. R. (2016). Assessment of the nutritional composition of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Chemistry*, *193*, 47–54. doi.org

Osen, R., & Schweiggert-Weisz, U. (2024). High-moisture extrusion cooking of plant proteins for meat analogues: Process-structure relationships and protein-protein interactions. *Food Hydrocolloids*, *151*, Artículo 109815. doi.org

Pagnifique. (2022). *Catálogo técnico de panificados ultracongelados y soluciones de panificación*. https://www.pagnifique.com

Pamplona, J. (1995). *Alimentos que curan*. Editorial Safeliz.

Paucar, M., Peñas, E., Dueñas, M., Frias, J., & Martínez, V. (2015). *Optimisation of germination time and temperature on the antioxidant activity of Chenopodium quinoa using response surface methodology*. 18th EuroFoodChem Conference, Madrid, España.

Paucar-Menacho, L. M., Martínez-Villaluenga, C., Dueñas, M., Frias, J., & Peñas, E. (2018). Response surface optimization of germination conditions to improve the accumulation of bioactive compounds and the antioxidant activity in quinoa. *International Journal of Food Science and Technology*, *53*(2), 516–524. doi.org

Paucar-Menacho, L. M., Peñas, E., Dueñas, M., Frias, J., & Martínez-Villaluenga, C. (2022). Efecto de la germinación sobre el contenido de compuestos bioactivos y

capacidad antioxidante en pseudocereales. *Revista de Investigación Agropecuaria*, *48*(2), 145–154.

Pereira, E., Encina-Zelada, C., Barros, L., Gonzales-Barron, U., Cadavez, V., & Ferreira, I. (2019). Chemical and nutritional characterization of *Chenopodium quinoa* Willd (quinoa) grains: A good alternative to nutritious food. *Food Chemistry*, *280*, 110–114. doi.org

Quintana, J. (2020). *Elaboración y caracterización fisicoquímica de pan con sustitución parcial de harina de trigo por harina de quinua (Chenopodium quinoa Willd) y kiwicha (Amaranthus caudatus L.) germinadas* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional José María Arguedas]. Repositorio Institucional UNAJM.

Reguera, M., & Haros, C. M. (2024). Nutritional enhancement of quinoa flour through controlled germination techniques. *Journal of Cereal Science*, *116*, Artículo 103842. doi.org

Repo-Carrasco, R. (1998). *Introducción a la ciencia y tecnología de cereales y granos andinos*. Editorial Agraria.

Rojas, A. O. (2021). *Historia del pan chapata*. Scribd. https://es.scribd.com/presentation/526525171/Historia-Del-Pan-Chapata

Russo, R., Vivas, N., & Erazo, C. (2010). Classification of temperature response in germination of Brassicas. *Industrial Crops and Products*, *31*(1), 48–51. doi.org

Salinas, A. R., Yoldjian, A., Craviotto, R. M., & Bisaro, V. (2001). Pruebas de vigor y calidad fisiológica de semillas de soja. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, *36*(2), 371–379. doi.org

Sánchez, M., & Torres, H. (2023). *Sustitución de grasas saturadas en la industria alimentaria utilizando hidrogeles a base de carbohidratos y proteínas microparticuladas.* Revista Iberoamericana de Tecnología de Alimentos, 21(3), 112-125.

Singh, A., Sharma, S., & Singh, B. (2017). Effect of germination time and temperature on the functionality and protein solubility of sorghum flour. *Journal of Cereal Science*, *76*, 131–139. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.06.003

Smith, J. (2020). La quinoa: historia, botánica y valor nutricional. *Revista de Agricultura Sostenible*, *14*(2), 45–56.

Soleil, D. (2003). *Brotes y germinados caseros* (3.ª ed.). Ediciones Obelisco.

Soto, J. A., Tintín, J. M., & Yánez, S. G. (2011). *Elaboración de una harina compuesta a base de trigo (Triticum aestivum), quinua (Chenopodium quinoa) y soya (Glycine max) para la panificación y su control de calidad* (Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo). Repositorio Institucional ESPOCH. espoch.edu.ec

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

Suárez-Estrella, D., Cardone, G., & Pagani, M. A. (2025). Germinated quinoa flour as a functional ingredient: Nutritional enhancement and consumer acceptance. *Food Hydrocolloids*, *158*, Artículo 110421. doi.org

Torres-Gallo, R., & Miranda, M. (2026). Caracterización de aislados proteicos de tarwi (*Lupinus mutabilis*) y su comportamiento funcional en matrices alimentarias reformuladas. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, *92*(1), 14-27.

Tovar-Hernández, C. E., Perafán-Gil, E. A., Enríquez-Collazos, M. G., Pismag-Portilla, Y., & Ceron-Fernández, L. (2017). Evaluación del efecto del proceso de extrusión en harina de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) normal y germinada. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, *15*(2), 30–38. doi.org

Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. (2025). *Efecto del tiempo de germinación en el contenido de minerales de cuatro accesiones de quinua (Chenopodium quinoa Willdenow)* [Informe de investigación, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. Repositorio Institucional UNSCH. unsch.edu.pe

Valverde-Sánchez, J. M., & Sánchez, L. D. (2026). *Efecto del proceso de germinación controlada en las propiedades fisicoquímicas, proximales y funcionales de ecotipos de Chenopodium quinoa Willd* (Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Santa). Repositorio Institucional UNS. uns.edu.pe

Varela, G., Carbajal, A., Monteagudo, E., & Moreiras, O. (1991). *El pan en la alimentación de los españoles*. Editorial Eudema.

Wolny, E., Betekhtin, A., Rojek, M., Braszewska-Zalewska, A., Lusinska, J., & Hasterok, R. (2018). Germination and the early stages of seedling development in

Brachypodium distachyon. *International Journal of Molecular Sciences*, *19*(10), Artículo 2916. https://doi.org/10.3390/ijms19102916

Zheng, H., & Brennan, C. S. (2025). *Tribological insights into fat replacement: How colloidal systems and hydrogels mimic mouthfeel in low-calorie food matrices*. Food Hydrocolloids, 158, Artículo 110482. doi.org

Ziobro, R., Witczak, T., Juszczak, L., & Korus, J. (2021). Effects of the addition of legume flours on the rheological properties of dough and bread quality: A review. *Foods*, *10*(6), Artículo 1250. doi.org

ANEXOS

ANEXO 1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS FÍSICO, QUÍMICO Y SENSORIAL

Tabla 33

Datos obtenidos del análisis físico

Tratamientos	Humedad (%)	Volumen (g/cm^3)	Densidad (g/mL)
T1	29.05	372.05	0.224
	29.25	371.50	0.226
	29.18	371.95	0.225
T2	29.15	375.20	0.222
	29.39	375.26	0.221
	29.48	376.10	0.223
T3	28.99	375.50	0.223
	29.05	375.20	0.223
	28.94	374.22	0.224
T4	29.10	373.58	0.222
	29.08	372.50	0.221
	28.98	373.15	0.220
T5	29.30	372.50	0.225
	29.26	373.15	0.226
	29.21	374.40	0.226
T6	28.97	371.25	0.222
	29.03	372.05	0.223
	29.11	371.80	0.225

Tabla 34

Datos obtenidos del análisis químico

Tratamientos	Proteína (%)	Fibra (%)	Hierro (mg)
T1	12.50	0.20	1.62
	12.49	0.24	1.65
	12.53	0.21	1.63
T2	12.99	0.32	1.80
	13.15	0.33	1.86
	13.07	0.36	1.84
T3	13.27	0.36	1.96
	13.25	0.37	2.01
	13.22	0.34	1.93
T4	13.55	0.31	2.09
	13.49	0.29	2.11
	13.51	0.30	2.20
T5	13.62	0.34	2.40
	13.65	0.31	2.45
	13.69	0.32	2.49
T6	13.72	0.35	2.55
	13.79	0.34	2.59
	13.83	0.31	2.53

Tabla 35

Puntuación de la evaluación sensorial para el atributo de color

PANELISTA	COLOR					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
1	4	4	5	6	5	4
2	4	4	5	6	4	4
3	4	4	5	7	5	4
4	4	4	4	6	5	4
5	5	4	5	6	5	4
6	4	4	5	6	4	4
7	4	5	5	6	5	4
8	4	4	5	6	5	5
9	4	4	4	7	5	5
10	4	5	5	6	5	4
11	4	4	5	6	4	4
12	4	4	5	6	5	4
13	4	4	5	6	5	4
14	4	5	5	6	5	4
15	4	4	5	6	5	4

Tabla 36

Puntuación de la evaluación sensorial para el atributo de olor

PANELISTA	OLOR					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
1	4	4	6	5	4	4
2	4	5	6	4	4	4
3	4	4	6	5	4	4
4	4	4	6	5	4	4
5	5	4	6	5	4	4
6	4	4	7	5	4	4
7	4	4	6	5	4	5
8	4	4	6	4	4	5
9	4	5	6	5	4	4
10	4	4	6	4	4	4
11	5	4	6	5	4	4
12	4	4	6	5	4	4
13	4	4	6	4	4	4
14	4	4	6	5	4	4
15	4	4	6	5	4	5

Tabla 37

Puntuación de la evaluación sensorial para el atributo de sabor

PANELISTA	SABOR					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
1	4	6	4	5	4	4
2	4	6	5	4	4	4
3	4	6	4	4	5	4
4	5	6	4	4	4	4
5	4	6	4	4	4	5
6	4	5	4	5	4	4
7	4	6	5	4	4	4
8	4	6	4	4	5	4
9	5	6	4	4	4	4
10	4	6	4	4	4	4
11	4	6	4	4	4	5
12	4	6	5	4	4	4
13	4	5	4	4	5	4
14	4	6	4	4	4	4
15	4	6	4	5	4	4

Tabla 38

Puntuación de la evaluación sensorial para el atributo de textura

PANELISTA	TEXTURA					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
1	4	4	4	4	4	6
2	3	5	5	6	5	5
3	4	5	5	6	6	5
4	3	4	6	5	5	5
5	5	5	6	6	5	5
6	6	5	5	6	6	5
7	4	5	5	6	5	4
8	5	6	6	5	5	4
9	5	4	5	4	6	6
10	4	5	4	6	5	5
11	4	4	4	5	4	5
12	5	5	5	5	6	5
13	3	5	5	5	5	6
14	5	5	5	5	6	6
15	4	4	5	4	4	5

ANEXO 2. RESULTADOS DE LAS MEDIAS DE LOS TRATAMIENTOS

Tabla 39

Medias de los tratamientos en el análisis físico de la variable humedad (%)

Formulaciones	Media	Desv. Error	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
1	29,160	0,077	28,918	29,155
2	29,340	0,077	24,985	25,482
3	28,993	0,077	26,018	26,515
4	29,053	0,077	26,085	26,582
5	29,257	0,077	28,785	29,282
6	29,037	0,055	28,918	29,155

Tabla 40

Medias de los tratamientos en el análisis físico de la variable volumen (g/cm^3)

Tratamientos	Media	Desv.Error	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
1	371.833	0.348	371.074	372.592
2	375.520	0.348	374.761	376.279
3	375.023	0.348	374.264	375.782
4	373.077	0.348	372.318	373.836
5	373.350	0.348	372.591	374.109
6	371.700	0.348	370.941	372.459

Tabla 41

Medias de los tratamientos en el análisis físico de la variable densidad (g/mL)

Tratamientos	Media	Desv.Error	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
1	0.225	0.001	0.224	0.226
2	0.222	0.001	0.221	0.223
3	0.223	0.001	0.222	0.224
4	0.221	0.001	0.220	0.222
5	0.225	0.001	0.224	0.226
6	0.223	0.001	0.222	0.225

Tabla 42

Medias de los tratamientos en el análisis químico de la variable proteína (%)

Tratamientos	Media	Desv.Error	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
1	12,507	0,027	12,449	12,565
2	13,070	0,027	13,012	13,128
3	13,247	0,027	13,189	13,305
4	13,517	0,027	13,459	13,575
5	13,653	0,027	13,595	13,711
6	13,780	0,027	13,722	13,838

Tabla 43

Medias de los tratamientos en el análisis químico de la variable fibra (%)

Tratamientos	Media	Desv.Error	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
1	0,280	0,009	0,260	0,300
2	0,336	0,009	0,316	0,356
3	0,356	0,009	0,336	0,376
4	0,300	0,009	0,280	0,320
5	0,323	0,009	0,303	0,343
6	0,333	0,009	0,313	0,353

Tabla 44

Medias de los tratamientos en el análisis químico de la variable hierro (mg/100g)

Tratamientos	Media	Desv.Error	Intervalo de confianza al 95%	
			Límite inferior	Límite superior
1	1,634	0,023	1,584	1,683
2	1,834	0,023	1,784	1,883
3	1,967	0,023	1,917	2,016
4	2,134	0,023	2,084	2,183
5	2,447	0,023	2,397	2,496
6	2,557	0,023	2,507	2,606

ANEXO 3. VARIABLES DEPENDIENTES E INDEPENDIENTES

Tabla 45

Variables del estudio, indicadores y unidades de medida

	VARIABLES DE ESTUDIO	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN
Variable independiente	HT: Harina de trigo HQG: Harina de quinua germinada	Porción: - Harina de trigo - Harina de quinua germinada	Proporciones T1:100 %(patrón) T2:95%HT:5%HQG T3:90%HT:10%HQG T4:85%HT:15%HQG T5:80%HT:20%HQG T6:75%HT:25%HQG	HT: En % HQG: En %
Variables dependientes	Características físico, químicas y sensoriales	Características físicas	Humedad Volumen Densidad	porcentaje g/cm^3 g/mL
		Características químicas	Proteína Fibra Hierro	porcentaje porcentaje mg/100g
		Características sensoriales	Color Olor Sabor Textura	Escala hedónica de 7 puntos

ANEXO 4. FICHA DE EVALUACIÓN SENSORIAL

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

"EFECTO DE LA ADICIÓN DE HARINA DE QUINUA (Chenopodium quinoa Willd.) BLANCA GERMINADA EN LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS Y SENSORIALES DEL PAN CHABATA"

Instrucción: Observe las muestras en el orden indicado y marque su respuesta con una (X).

	GRADO DE ACEPTABILIDAD	PUNTAJE	T1	T2	T3	T4	T5	T6
COLOR	Excelente	7						
	Muy bueno	6						
	Bueno	5						
	Aceptable	4						
	Menos que aceptable	3						
	Desagradable	2						
	Pesimo	1						

	GRADO DE ACEPTABILIDAD	PUNTAJE	T1	T2	T3	T4	T5	T6
OLOR	Excelente	7						
	Muy bueno	6						
	Bueno	5						
	Aceptable	4						
	Menos que aceptable	3						
	Desagradable	2						
	Pesimo	1						

	GRADO DE ACEPTABILIDAD	PUNTAJE	T1	T2	T3	T4	T5	T6
SABOR	Excelente	7						
	Muy bueno	6						
	Bueno	5						
	Aceptable	4						
	Menos que aceptable	3						
	Desagradable	2						
	Pesimo	1						

	GRADO DE ACEPTABILIDAD	PUNTAJE	T1	T2	T3	T4	T5	T6
TEXTURA	Excelente	7						
	Muy bueno	6						
	Bueno	5						
	Aceptable	4						
	Menos que aceptable	3						
	Desagradable	2						
	Pesimo	1						

ANEXO 5. PANEL FOTOGRÁFICO

Figura 17

Registro fotográfico de la recepción de la quinua blanca perlada



Figura 18

Registro fotográfico del pesado de la quinua blanca



Figura 19

Registro fotográfico del agua utilizada para la germinación



Figura 20

Registro fotográfico del lavado y acondicionamiento de la quinua



Figura 21

Registro fotográfico del monitoreo continuo de la germinación de la quinua



Figura 22

Registro fotográfico de la germinación de la quinua

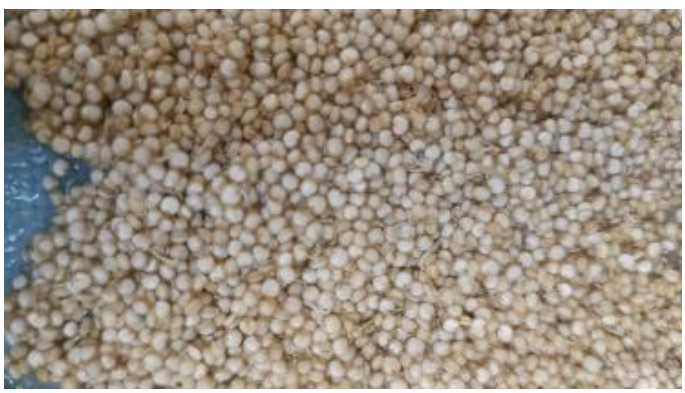


Figura 23

Registro fotográfico de la germinación de la quinua



Figura 24

Registro fotográfico del secado de la quinua

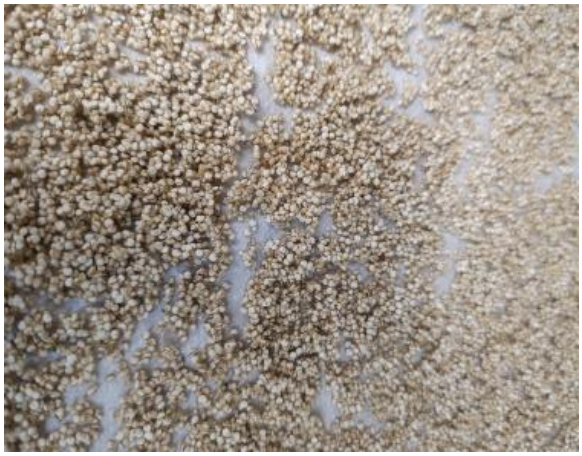


Figura 25

Registro fotográfico de la molienda de la quinua germinada



Figura 26

Registro fotográfico del molino adquirido por FOCAM



Figura 27

Registro fotográfico de la recepción de la harina de quinua germinada



Figura 28

Registro fotográfico del amasado



Figura 29

Registro fotográfico del la masa ya reposada



Figura 30

Registro fotográfico de la división de los panes



Figura 31

Registro fotográfico de los panes chabatas T1 antes del horneado



Figura 32

Registro fotográfico de los panes chabatas T2 antes del horneado



Figura 33

Registro fotográfico de los panes chabatas T3 antes del horneado



Figura 34

Registro fotográfico del horneado de los panes



Figura 35

Registro fotográfico de la salida de los panes



Figura 36

Registro fotográfico del pesado de los panes para el análisis de humedad



Figura 37

Registro fotográfico de la distribución de panes para los análisis



Figura 38

Registro fotográfico del inicio de los análisis físico, químico y sensorial



Figura 39

Registro fotográfico de los materiales de laboratorio



Figura 40

Registro fotográfico del análisis sensorial



ANEXO 21. NORMA TÉCNICA PERUANA 106.004.2016

NORMA TÉCNICA PERUANA | NTP 106.004 2016

Dirección de Normalización - INACAL
Calle Las Camelias 815, San Isidro (Lima 27) | Lima, Perú

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

PANADERÍA, PASTELERÍA Y GALLETERÍA. Pan francés. Requisitos

BAKERY, PASTRY AND BISCUITS . French bread. Requirements

2016-10-06
1ª Edición

R.D. Nº 028-2016-INACAL/DN. Publicada el 2016-10-11 | Precio basado en 15 páginas
I.C.S.: 67.060 | ESTA NORMA ES RECOMENDABLE
Descriptores: Pan, pan francés, pistolete

© INACAL 2016

6.2 Requisitos específicos

6.2.1 Requisitos fisicoquímicos

Los requisitos fisicoquímicos se detallan en la Tabla 1 .

TABLA 1 - Requisitos fisicoquímicos

Ensayos	Mínimo	Máximo	Método de ensayo
Humedad (g/100g)	25	35	NTP 206.011 AACC 44-15.02 AOAC 935.29 ISO 712

NOTA: Se podrán utilizar otros métodos de ensayo validados o normalizados.

6.2.2 Requisitos microbiológicos

Se deberá cumplir con los requisitos microbiológicos establecidos por la autoridad sanitaria nacional competente (véase la Tabla 2).

TABLA 2 – Requisitos microbiológicos para el pan francés

Agente microbiano	Categoría	Clase	n	c	Límite por g		Método de ensayo
					m	M	
Mohos	2	3	5	2	10^2	10^3	ISO 21527-2 AOAC 2014.05 FDA/BAM AACC 42-50.01

NOTA: Este requisito no debe ser aplicado de manera rutinaria sino como parte de los controles en el Aseguramiento de la calidad del productor.

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

UNSCH FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA

ACTA DE SUSTENCIÓN DE LA TESIS:

(Reglamento de grados y títulos, aprobado con RCU N° 3403-2024-UNSCH-CU)

Efecto de la adición de harina de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) blanca germinada en las características físicas, químicas y sensoriales del pan chabata

Expositora: Katherine Sharlotte Liza Avalos
Bachiller en Ingeniería en Industrias Alimentarias

Expediente Nº 26138088 Resolución Decanal Nº 158-2026-UNSCH-FIQM/D Fecha: 07-10-2026

En la Sala de Conferencia "Pedro Villena Hidalgo" de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia, ubicada en la Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga (H-121), siendo las ocho de la mañana con cinco minutos del día lunes doce de octubre del año dos mil veintiséis, se reunieron la Bachiller en Ingeniería en Industrias Alimentarias **Katherine Sharlotte Liza Avalos,** los Docentes Miembros del Jurado de Sustentación Ingenieros: Mg. Julio Fernando PEREZ SAEZ, Dr. Wilfredo TRASMONTE PINDAY (Miembros) y Dr. Antonio Jesús MATOS ALEJANDRO (Miembro-Asesor), bajo la Presidencia del Dr. Agustín Julián PORTUGUEZ MAURTUA (Decano de la FIQM), el Mg. Fredy Rober PARIONA ESCALANTE (Secretario-Docente).

Acto seguido, el Presidente del Jurado de Sustentación dispuso que el Secretario Docente dé lectura a los antecedentes tramitados para el presente Acto Público de Sustentación de la Tesis: **Efecto de la adición de harina de quinua (Chenopodium quinoa Willd) blanca germinada en las características físicas, químicas y sensoriales del pan chabata,** presentado por la Bachiller **Katherine Sharlotte Liza Avalos**. A continuación, el Secretario-Docente procedió a dar lectura a la Resolución Decanal N°158-2026-UNSCH-FIQM/D.

Luego, el Presidente del Jurado invitó a la Bachiller **Katherine Sharlotte Liza Avalos,** a pasar al estrado y exponer su trabajo de Tesis en un tiempo máximo de treinta y cinco minutos.

Finalizado la exposición de la Bachiller, el presidente invitó a los Señores Miembros del Jurado de Sustentación a que formulen sus preguntas y señalen sus observaciones, en el siguiente orden: Dr. Antonio Jesús MATOS ALEJANDRO (Miembro-Asesor), Dr. Wilfredo TRASMONTE PINDAY y Mg. Julio Fernanado PEREZ SAEZ (Miembros).

A continuación, el presidente del jurado invitó a la sustentante y al público para que se sirva abandonar la sala de conferencia con la finalidad de permitir al jurado de sustentación deliberar sobre la evaluación a otorgar. Se alcanzó el siguiente resultado. **APROBADA POR UNANIMIDAD PROMEDIO QUINCE (15).**

UNSCH FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA

ACTA DE SUSTENCIÓN DE LA TESIS:

(Reglamento de grados y títulos, aprobado con RCU N° 3403-2024-UNSCH-CU)

Efecto de la adición de harina de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) blanca germinada en las características físicas, químicas y sensoriales del pan chabata

Expositora: Katherine Sharlotte Liza Avalos
Bachiller en Ingeniería en Industrias Alimentarias

Expediente Nº 26138088 **Resolución Decanal Nº 158-2026-UNSCH-FIQM/D** **Fecha: 07-10-2026**

Finalmente, el Presidente del Jurado dispuso que se invite a la Sustentante y al público asistente a que se sirvan ingresar a la sala de conferencias y anunció que, la Bachiller **Katherine Sharlotte Liza Avalos,** ha resultado **APROBADA POR UNANIMIDAD**, y por lo tanto a partir de la fecha la Universidad y la Facultad cuenta con una flamante **INGENIERA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS** y le augura éxitos en su desempeño profesional.

Siendo las diez de la mañana con cinco minutos se dio por finalizado este acto académico de Sustentación de Tesis. En fe de lo cual firmamos:

Dr. Agustín Julián PORTUGUEZ MAURTUA
Presidente

Mg. Julio Fernando PEREZ SAEZ
Miembro

Dr. Wilfredo TRASMONTE PINDAY
Miembro

Dr. Antonio Jesús MATOS ALEJANDRO
(Miembro-Asesor)

Mg. Fredy Rober PARIONA ESCALANTE
(Secretario Docente)

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA Y METALURGIA
Escuela Profesional de Ingeniería en Industrias Alimentarias
AVENIDA INDEPENDENCIA S/N CIUDAD UNIVERSITARIA
E-mail: ep.alimentarias@unsch.edu.pe Teléfono - 066- 312340
AYACUCHO – PERÚ

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD

El Director de la Escuela Profesional de Ingeniería en Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, hace CONSTAR:

Que, la Srta. Katherine Sharlotte LIZA AVALOS egresada de la Escuela Profesional de Ingeniería en Industrias Alimentarias ha remitido, con el aval y por intermedio de su asesor Ing. Antonio Jesús Matos Alejandro, la Tesis: Efecto de la adición de harina de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) blanca germinada en las características físicas, químicas y sensoriales del pan chabata y se precisa con el Informe de Originalidad de Turnitin, que el índice de similitud del trabajo es de 9% y que se ha generado el Recibo digital que confirma el Depósito que el trabajo ha sido recibido por Turnitin con fecha octubre 27 de 2026 e Identificador de la Entrega Nº 3072597988.

Se expide la presente, para los fines pertinentes.

Ayacucho, 28 de octubre del 2026.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
EFP DE INGENIERÍA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

Mg. JUAN CARLOS PONCE RAMÍREZ
DIRECTOR

c.c. : Archivo.
Constancia Nº 124

Efecto de la adición de harina de quinua (Chenopodium quinoa Willd.) blanca germinada en las características físicas, químicas y sensoriales del pan chabata

por Katherine Sharlotte Liza Avalos

Fecha de entrega: 27-oct-2026 04:09p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 3072597988
Nombre del archivo: 2-TESIS_CORTADA_KSLIZA.pdf (1.32M)
Total de palabras: 30968
Total de caracteres: 171932

Efecto de la adición de harina de quinua (Chenopodium quinoa Willd.) blanca germinada en las características físicas, químicas y sensoriales del pan chabata

INFORME DE ORIGINALIDAD

9%	9%	2%	4%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	2%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
3	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	repositorio.unsa.edu.pe Fuente de Internet	<1%
6	kupdf.net Fuente de Internet	<1%
7	qdoc.tips Fuente de Internet	<1%
8	repositorio.upec.edu.ec Fuente de Internet	<1%
9	studylib.es Fuente de Internet	<1%
10	www.scribd.com Fuente de Internet	<1%
11	repositorio.uam.es Fuente de Internet	<1%
12	repositorio.uns.edu.pe Fuente de Internet	<1%
13	libros.cienciadigital.org Fuente de Internet	<1%
14	pa.bibdigital.uccor.edu.ar Fuente de Internet	<1%

Submitted to Integración Blackboard

15	Trabajo del estudiante	<1 %
16	repositorio.uteq.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
17	repositorio.unamba.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
18	revistas.unicauca.edu.co Fuente de Internet	<1 %
19	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
20	vsip.info Fuente de Internet	<1 %
21	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	<1 %
22	Submitted to Universidad del Valle de Guatemala Trabajo del estudiante	<1 %
23	cia.uagraria.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
24	repositorio.unne.edu.ar Fuente de Internet	<1 %

Excluir citas	Activo	Excluir coincidencias	< 30 words
Excluir bibliografía	Activo		