

## Modificación de las propiedades tecno-funcionales de la harina de habas descascarilladas mediante extrusión termoplástica

### *Modification of the techno-functional properties of dehulled bean flour by thermoplastic extrusion*

<sup>a</sup>Grimaldo W., Quispe Santivañez<sup>1</sup>  <sup>b</sup>Henry J., Javier Ninahuaman<sup>1</sup>  <sup>c</sup>Joselin Paucarchuco Soto<sup>1</sup> 

<sup>d</sup>María T., Pedrosa Silva Clerici<sup>2</sup>  <sup>e</sup>Rebeca Salvador Reyes<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Nacional Autónoma Altoandina de Tarma.

<sup>2</sup>Universidad Estadual de Campinas

<sup>3</sup>Universidad Tecnológica del Perú

Recibido: Mayo, 2025 / Aceptado: Junio 2025 / Publicado: Junio 2025

### RESUMEN

Las habas andinas (*Vicia faba* L.) representan una fuente nutricional subutilizada con potencial para desarrollo de alimentos funcionales sostenibles. Este estudio investigó los efectos de la extrusión termoplástica sobre las propiedades tecno funcionales de harina de habas descascarillada, evaluando su viabilidad como ingrediente alimentario mejorado. Se aplicó extrusión termoplástica a harina de habas y se compararon las características fisicoquímicas, colorimétricas y reológicas con muestras no procesadas mediante análisis estadístico t de Student.

La extrusión termoplástica produjo modificaciones significativas en la composición nutricional, reduciendo el contenido proteico (38,11% a 33,74%) y fibra dietaria (5,74% a 4,52%), mientras mantuvo estables los niveles de ceniza y grasa. El procesamiento generó cambios colorimétricos notables, oscureciendo la harina con tendencias rojizas y amarillas más pronunciadas. Las propiedades reológicas experimentaron mejoras sustanciales, evidenciadas por la reducción del esfuerzo de fluencia (52,64 a 21,97 Pa), índice de consistencia (507,97 a 359,82 Pa·s<sup>n</sup>), y parámetros viscoelásticos, manteniendo el comportamiento pseudoplástico ( $p < 0,05$ ).

Los resultados demuestran que la extrusión termoplástica mejora significativamente las propiedades tecno funcionales de la harina de habas, generando un ingrediente con mayor versatilidad aplicativa para la industria alimentaria. Este procesamiento ofrece una estrategia viable para valorizar leguminosas andinas en el desarrollo de productos alimentarios funcionales y sostenibles.

**Palabras clave:** *haba andina, extrusión termoplástica, harina de haba, composición nutricional.*

### ABSTRACT

Andean fava beans (*Vicia faba* L.) represent an underutilized nutritional source with potential for sustainable functional food development. This study investigated the effects of thermoplastic extrusion on the techno-functional properties of dehulled fava bean flour, evaluating its viability as an improved food ingredient. Thermoplastic extrusion was applied to fava bean flour and physicochemical, colorimetric, and rheological characteristics were compared with unprocessed samples by Student's t-statistical analysis.

Thermoplastic extrusion produced significant modifications in nutritional composition, reducing protein content (38.11% to 33.74%) and dietary fiber (5.74% to 4.52%), while maintaining stable levels of ash and fat. Processing generated notable colorimetric changes, darkening the flour with more pronounced reddish and yellowish tendencies. Rheological properties experienced substantial improvements, evidenced by the reduction of yield stress (52.64 to 21.97 Pa), consistency index (507.97 to 359.82 Pa·s<sup>n</sup>), and viscoelastic parameters, maintaining pseudoplastic behavior ( $p < 0.05$ ).

The results show that thermoplastic extrusion significantly improves the technical and functional properties of bean flour, generating an ingredient with greater versatility for the food industry. This processing offers a viable strategy to valorize Andean legumes in the development of functional and sustainable food products.

**Key words:** *Andean bean, thermoplastic extrusion, bean flour, nutritional composition.*

## INTRODUCCION

La crisis alimentaria global, que afecta a más de 800 millones de personas según la FAO (2023), exige soluciones innovadoras basadas en cultivos subutilizados con alta resiliencia climática y densidad nutricional. En este contexto, las leguminosas andinas — particularmente *Vicia faba* var. minor— emergen como recursos estratégicos para sistemas agroalimentarios sostenibles, combinando adaptación a condiciones edafológicas extremas y perfiles nutricionales superiores a legumbres convencionales [1]. El haba andina destaca por su contenido proteico (23-28% base seca) con proporción equilibrada de aminoácidos esenciales (lisina: 6.2 g/100g, metionina: 1.1 g/100g), superando a la soja (*Glycine max*) en biodisponibilidad de minerales (hierro: 6.5 mg/100g vs. 5.1 mg/100g) [2]. Su matriz bioactiva, rica en polifenoles (ácido gálico: 12.4 mg/100g) y flavonoides (catequina: 8.7 mg/100g), le confiere propiedades antioxidantes (ORAC: 1,500  $\mu$ mol TE/g) comparables a frutos rojos [2]. Sin embargo, su aplicación industrial se ve limitada por factores anti nutricionales (taninos condensados: 1.4-1.8%, fitatos: 0.6-0.9%) concentrados en el tegumento, los cuales reducen la biodisponibilidad de micronutrientes en un 30-40% [3].

Técnicas combinadas de descascarillado mecánico (eficiencia del 92-95% en remoción de tegumento) e hidratación controlada (12 h, 25°C) han demostrado reducir anti nutrientes hasta en un 85%, preservando simultáneamente el 97% de los compuestos bioactivos [3]. La posterior aplicación de extrusión termoplástica (120-160°C, 15-25% humedad) potencia las propiedades funcionales mediante, Desnaturalización proteica controlada (aumento del 40% en digestibilidad), Gelatinización de almidones (índice de gelatinización: 78-82%), Formación de péptidos bioactivos con actividad inhibidora de la ECA ( $83.2 \pm 2.1\%$ ) [4]. Este proceso modifica significativamente las propiedades reológicas, incrementando la capacidad espumante (de 45% a 68%) y la estabilidad de emulsiones (de 12 min a 25 min) [5]. No obstante, la optimización de parámetros de extrusión requiere estudios sistemáticos que correlacionen condiciones de proceso con características tecno funcionales finales, particularmente en matrices de leguminosas andinas poco exploradas. Este trabajo evalúa el impacto de la extrusión termoplástica en las propiedades fisicoquímicas, colorimétricas y reológicas de harina de haba andina descascarillada, generando modelos predictivos para el diseño de ingredientes adaptados a aplicaciones industriales específicas. Los hallazgos contribuyen a la valorización integral de recursos genéticos subutilizados, alineándose con los ODS 2 (Hambre Cero) y 12 (Producción y Consumo Responsables).

## METODOLOGÍA

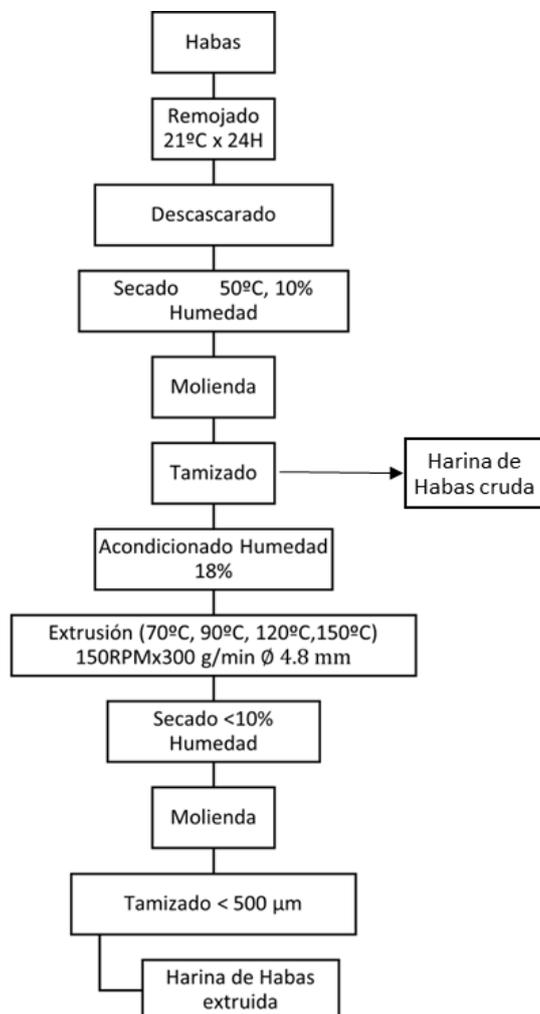
### A. Materia Prima

Las habas empleadas en este estudio provienen de la región andina del Perú y corresponden a las mismas muestras utilizadas previamente en la investigación de Salvador-Reyes et al. [3]. Para facilitar la comprensión del proceso experimental, se presenta el diagrama de flujo detallado en la Figura 1, que ilustra las etapas de preparación y procesamiento de la materia

prima.

### Figura N°01:

Diagrama de flujo de la Obtención de Harina de habas Cruda y Extruida



### B. Análisis Físicoquímicos

Este estudio se centra en evaluar los efectos de la aplicación de la tecnología de extrusión termoplástica sobre las propiedades físicoquímicas de la harina de habas, describiendo inicialmente los cambios producidos a nivel composicional y funcional.

Los análisis físicoquímicos se realizaron siguiendo los procedimientos oficiales establecidos por la AACCI [6]. En particular, se determinaron los contenidos de humedad (método 44-15.02), proteína (método 46-13.01, con un factor de conversión de nitrógeno de 5.4), grasa bruta (método 30-25.01), fibra dietética (método 32-05.01) y cenizas totales (método 08-16.01). Los carbohidratos digeribles se calcularon por diferencia, considerando la masa inicial de la muestra menos los contenidos de proteína, grasa bruta, fibra dietética y cenizas, todos expresados en base seca.

Para la evaluación del color, se midieron los parámetros CIELab (L\*, a\*, b\*) utilizando un colorímetro CR-400 (Konica Minolta, Japón), lo que permitió cuantificar los cambios

cromáticos inducidos por el procesamiento.

Las propiedades reológicas de las harinas cruda y extruida se analizaron conforme al protocolo descrito por Lemus-Moncada et al. [7]. Las mediciones se efectuaron con un reómetro HAAKE RheoStress 6000 (Thermo Scientific, Karlsruhe, Alemania), empleando placas paralelas de 60 mm de diámetro. Las muestras se colocaron entre las placas a 25 °C y se comprimieron hasta un espesor de 1 mm. Tras un periodo de estabilización de 5 minutos para alcanzar la temperatura de medición, se registraron las curvas de flujo en función de la velocidad de corte, que varió entre 0.01 y 10 s<sup>-1</sup>. El esfuerzo cortante ( $\tau$ ) se calculó mediante el modelo de Herschel-Bulkley:

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n \quad \tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

donde  $\tau_0$  es el esfuerzo de fluencia,  $k$  el índice de consistencia (Pa·s<sup>n</sup>) y  $n$  el índice de comportamiento del flujo [8], que describe la pseudoplasticidad del material.

Para el análisis estadístico, se compararon las medias de las diferentes muestras utilizando la prueba t de Student, considerando diferencias significativas cuando  $p < 0.05$ . Los cálculos se realizaron con el software estadístico libre R, garantizando rigor y reproducibilidad en la interpretación de los resultados.

## RESULTADOS

Los resultados evidencian que la extrusión termoplástica provocó alteraciones significativas tanto en la composición química como en el comportamiento reológico de la harina de habas. Por este motivo, el análisis de los datos se estructura en tres enfoques principales: primero, se examinan las modificaciones en la composición proximal; segundo, se evalúan los cambios en las propiedades colorimétricas utilizando el sistema CIELab; y tercero, se analizan las variaciones en las características reológicas del material.

### A. Modificaciones en la Composición Proximal

La Tabla I presenta una comparación detallada de los parámetros proximales entre la harina de haba en estado crudo y tras el proceso de extrusión. Además, se indica el nivel de significancia estadística asociado a cada variable, permitiendo evaluar la relevancia de las diferencias observadas. Estos resultados se contrastan y discuten en función de su significancia para comprender el impacto del tratamiento sobre la composición nutricional.

#### Tabla N°01:

*Comparaciones Químico-Proximales entre las habas andinas crudas y extruidas*

Características	Habas andinas crudas (HAC)	Habas andinas extruidas (HAE)	p < 0.052
Proteína (g/100g)	38.11 ± 1.11	33.74 ± 1.95	**
Grasa (g/100g)	2.14 ± 0.04	2.06 ± 0.08	*
Ceniza (g/100g)	1.03 ± 0.05	1.03 ± 0.02	*
Fibra dietaría (g/100g)	5.74 ± 0.19	4.52 ± 0.17	**
Carbohidratos digeribles (g/100g)	50.98	58.65	**

a Nota: 1 Humedad inicial HAC=4,25 ± 0,25 (g/100g), HAE=4,97 ± 0,14 (g/100g). Los asteriscos de la última columna indican la presencia (\*\*) o ausencia (\*) de diferencias significativas entre muestras (p < 0,05) determinadas por la prueba t de Student.

El contenido de proteína disminuyó significativamente de 38.11 ± 1.11 g/100g en las habas andinas crudas a 33.74 ± 1.95 g/100g en las extruidas (p < 0.05), lo cual podría atribuirse a la desnaturalización de las proteínas inducida por el proceso de extrusión. En cuanto al contenido de grasa, este se mantuvo relativamente estable, con una leve reducción de 2.14 ± 0.04 g/100g a 2.06 ± 0.08 g/100g (p < 0.05), lo que sugiere que la extrusión no afecta de manera significativa este componente. Un comportamiento similar se observó en el contenido de ceniza, que permaneció constante (1.03 ± 0.05 g/100g en crudas y 1.03 ± 0.02 g/100g en extruidas).

Por otro lado, la fibra dietaría presentó una disminución significativa, pasando de 5.74 ± 0.19 g/100g a 4.52 ± 0.17 g/100g (p < 0.05), posiblemente debido a la ruptura de estructuras complejas durante la extrusión. En contraste, los carbohidratos digeribles aumentaron de 50.98 g/100g a 58.65 g/100g (p < 0.05), lo que indica que el tratamiento térmico favorece la hidrólisis de polisacáridos complejos en formas más fácilmente asimilables. Esta propiedad es altamente valorada en la industria alimentaria, ya que permite el desarrollo de snacks, productos con texturas personalizadas, alimentos funcionales y dietas especiales, además de facilitar la producción a escala.

### B. Cambios colorimétricos

La Tabla II presenta la comparación de los parámetros colorimétricos de la harina de habas andinas crudas y extruidas, evaluados según el sistema CIELAB. Se observan diferencias estadísticamente significativas (p < 0.05) en los valores de color, lo que indica que el proceso de extrusión influye notablemente en las características visuales del producto.

### Tabla N°02:

*Comparaciones colorimétricas entre las habas andinas crudas y extruidas*

Características	HAC	HAE	p < 0.05
L*	95.10 ± 0.06	83.59 ± 0.09	**
a*	0.57 ± 0.01	3.81 ± 0.08	**
b*	6.57 ± 0.79	23.58 ± 0.06	**

a Nota: 1 Humedad inicial HAC=4,25 ± 0,25 (g/100g), HAE=4,97 ± 0,14 (g/100g). Los asteriscos de la última columna indican la presencia (\*\*) o ausencia (\*) de diferencias significativas entre muestras (p < 0,05 determinadas por la prueba t de Student.

Los cambios observados en los parámetros colorimétricos fueron estadísticamente significativos. La claridad (L\*) disminuyó notablemente de 95.10 ± 0.06 en la harina cruda a 83.59 ± 0.09 en la extruida (p < 0.05), lo cual podría atribuirse a reacciones de Maillard y procesos de caramelización inducidos por el calor durante la extrusión. \*

En cuanto al componente rojo (a), se evidenció un incremento significativo de 0.57 ± 0.01 a 3.81 ± 0.08 (p < 0.05), mientras que el componente amarillo (b\*) aumentó de 6.57 ± 0.79 a 23.58 ± 0.06 (p < 0.05). Estos cambios sugieren la formación de nuevos pigmentos como resultado de las transformaciones térmicas. Estas diferencias visuales pueden apreciarse claramente en la Figura 2, donde se comparan las harinas de habas sin extruir y extruidas.

### Figura N°02:

*Comparativo colorimétrico de la harina de habas cruda y extruida*



a Nota: EN A se puede ver la muestra de Harina de Habas Cruda; en B se puede observar la Harina de Habas Extruida

### C. Cambios en las propiedades reológicas

En la Tabla III. Se muestran las comparaciones de las propiedades reológicas de la harina

de habas cruda y extruida.  $\tau_0$  (Pa), es el esfuerzo de fluencia (Yield Stress) y permite medir el esfuerzo de corte mínimo necesario para que el material comience a fluir, por ello si el esfuerzo aplicado es menor que este valor, el material se comporta como un sólido elástico.

$K$  ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ ) es la consistencia (Coeficiente de Consistencia, Ley de Potencia), es el parámetro del modelo de la ley de potencia (modelo de Ostwald-de Waele) que indica la viscosidad aparente del material. Representa la resistencia al flujo y se mide en Pascales por segundo elevado a un exponente  $n$ .

$N$  es el Índice de Comportamiento (Exponente de la Ley de Potencia) e indica la naturaleza del flujo del material:

- Si  $n < 1$ , el Fluido es pseudoplástico (su viscosidad disminuye con la tasa de deformación, como la miel diluida).
- Si  $n = 1$ , El fluido es newtoniano (su viscosidad es constante, como el agua).
- Si  $n > 1$  el fluido es dilatante (su viscosidad aumenta con la tasa de deformación, como una suspensión de almidón en agua).

$R^2$  Es el Coeficiente de Determinación e indica qué tan bien un modelo reológico se ajusta a los datos experimentales, un valor cercano a 1 significa un buen ajuste.

$G'$  (Pa) – Es el Módulo de Almacenamiento (Storage Modulus) y representa la energía elástica almacenada en el material durante una deformación oscilatoria. Un material con alto  $G'$  se comporta más como un sólido elástico.

$G''$  (Pa) – Es el Módulo de Pérdida (Loss Modulus), representa la energía disipada como calor debido a la viscosidad del material durante la deformación oscilatoria. Un material con alto  $G''$  tiene comportamiento de líquido viscoso.

$\tan \delta$  – Es la Tangente de la fase (Factor de Pérdida,  $G'' / G'$ ) Es la relación entre  $G''$  y  $G'$  y clasifica el comportamiento del material

- $\tan \delta < 1$ , el material es más elástico (predomina  $G'$ )
- $\tan \delta > 1$ , el material es más viscoso (predomina  $G''$ )
- $\tan \delta \approx 1$ , El material es un gel y está en estado intermedio

El parámetro de esfuerzo de fluencia ( $\tau_0$ ) disminuyó de  $52.64 \pm 3.94$  Pa a  $21.97 \pm 1.94$  Pa ( $p < 0.05$ ), lo que indica una menor resistencia al flujo después de la extrusión. El índice de consistencia ( $K$ ) disminuyó significativamente ( $507.97 \pm 39.45$   $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$  en crudas y  $359.82 \pm 29.65$   $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$  en extruidas), lo que implica la tenencia a una menor viscosidad, el exponente de flujo ( $n$ ) se redujo de  $0.48 \pm 0.01$  a  $0.35 \pm 0.02$  ( $p < 0.05$ ), indicando que la extrusión convierte la mezcla en un fluido más pseudoplástico, de la misma forma, los módulos viscoelásticos también disminuyeron:  $G'$  de  $30417.91 \pm 431.12$  Pa a  $23969.48 \pm 319.48$  Pa, y  $G''$  de  $21777.93 \pm 314.15$  Pa a  $15679.52 \pm 214.56$  Pa ( $p < 0.05$ ), lo que sugiere una menor elasticidad y viscosidad; el factor de amortiguamiento ( $\tan \delta$ ) disminuyó de  $0.72 \pm 0.03$  a  $0.65 \pm 0.02$  ( $p < 0.05$ ), indicando una menor contribución de la fase viscosa.

**Tabla N°03:**

*Comparaciones colorimétricas entre las habas andinas crudas y extruidas*

Características	HAC	HAE	p < 0.052
$\tau_0$ (Pa)	52.64 ± 3.94	21.97 ± 1.94	**
K (Pa·s <sup>n</sup> )	507.97 ± 39.45	359.82 ± 29.65	**
N	0.48 ± 0.01	0.35 ± 0.02	*
R <sup>2</sup>	0.93 ± 0.06	0.95 ± 0.03	*
G' (Pa)	30417.91 ± 431.12	23969.48 ± 319.48	**
G'' (Pa)	21777.93 ± 314.15	15679.52 ± 214.56	**
Tan $\delta$	0.72 ± 0.03	0.65 ± 0.02	**

a Nota: 1 Humedad inicial HAC=4,25 ± 0,25 (g/100g), HAE=4,97 ± 0,14 (g/100g). Los asteriscos de la última columna indican la presencia (\*\*) o ausencia (\*) de diferencias significativas entre muestras (p < 0,05) determinadas por la prueba t de Student

Los principales cambios observados incluyen la disminución de proteínas y fibra dietaria; el aumento de carbohidratos digeribles, el oscurecimiento del color y aparición de tonalidades más rojizas y amarillas; la reducción en la viscosidad y resistencia mecánica de la pasta.

## DISCUSIÓN

La investigación aclara las implicaciones del proceso de extrusión en la composición proximal de la harina de haba, por lo que se documentó una disminución notable en la concentración de proteínas, pasando de 38,11 ± 1,11 g/100 g en la harina sin procesar a 33,74 ± 1,95 g/100 g en la harina extruida (p < 0,05). Es probable que esta alteración sea atribuible a la desnaturalización de las proteínas precipitada por los efectos sinérgicos de la temperatura y la presión elevadas encontradas durante el proceso de extrusión, lo que provoca transformaciones estructurales que pueden influir tanto en la solubilidad como en la disponibilidad biológica de las proteínas [9]. Estos fenómenos se observan con frecuencia en el procesamiento térmico intensivo, en el que la modificación de los enlaces peptídicos puede poner en peligro la funcionalidad de las proteínas [10]. En relación con el contenido de lípidos, se observó una ligera disminución, pasando de 2,14 ± 0,04 g/100 g en la harina cruda a 2,06 ± 0,08 g/100 g en la harina extruida (p < 0,05). A pesar de esta reducción, la influencia de la extrusión sobre el contenido de lípidos fue mínima, lo que implica que las condiciones de procesamiento no facilitaron la degradación sustancial de estos lípidos [11]. Estos hallazgos sugieren que los frijoles presentan un mayor grado de estabilidad lipídica en comparación con los granos o frijol de ayocote, donde se observaron discrepancias significativas en condiciones de extrusión estandarizadas [12]. El contenido de cenizas no mostró ninguna variación (1,03 ± 0,05 g/100 g en crudo y 1,03 ± 0,02 g/100 g en extruido), lo que indica que el tratamiento térmico no alteró la concentración de minerales en la harina. Esta observación se alinea con la estabilidad inherente de los minerales en respuesta a los tratamientos térmicos, aunque su biodisponibilidad puede verse influenciada por factores

adicionales, incluida la formación de complejos insolubles con subproductos resultantes de la aplicación de calor [13] (Ding et al., 2021). Por el contrario, la fibra dietética mostró una disminución significativa, pasando de  $5,74 \pm 0,19$  g/100 g a  $4,52 \pm 0,17$  g/100 g ( $p < 0,05$ ). Esta reducción puede atribuirse a la degradación de estructuras intrincadas de polisacáridos no digeribles, como la celulosa y las hemicelulosas, atribuible a los efectos de la energía térmica y al cizallamiento mecánico intrínsecos al proceso de extrusión [14]. La desintegración de estas estructuras reduce la proporción de fibra insoluble, lo que podría afectar a la capacidad de retención de agua y a las aplicaciones funcionales de la harina en los sistemas alimentarios [15], [16].

La elevación de la digestibilidad de los carbohidratos de  $50,98$  g/100 g a  $58,65$  g/100 g ( $p < 0,05$ ) implica que el proceso de extrusión ayuda a la hidrólisis parcial de polisacáridos intrincados, lo que produce configuraciones moleculares que son más susceptibles a la degradación enzimática y la posterior asimilación. Esta observación se alinea con la literatura existente que postula que la extrusión mejora la digestibilidad del almidón al promover la gelatinización y romper los enlaces dentro de la matriz polimérica [17], [18].

En cuanto a las alteraciones en los atributos cromáticos de la harina de haba andino, se registró una disminución notable en la claridad ( $L^*$ ), pasando de  $95,10 \pm 0,06$  en la harina sin procesar a  $83,59 \pm 0,09$  en la variante extruida ( $p < 0,05$ ). Esta reducción puede atribuirse a la aparición de reacciones de Maillard y a la caramelización, que son fenómenos característicos asociados a los tratamientos a alta temperatura que culminan en la síntesis de compuestos pigmentados [19].

En cuanto a los componentes cromáticos, la intensidad del parámetro rojo ( $a^*$ ) mostró un aumento sustancial de  $0,57 \pm 0,01$  a  $3,81 \pm 0,08$  ( $p < 0,05$ ), mientras que el parámetro amarillo ( $b^*$ ) aumentó de  $6,57 \pm 0,79$  a  $23,58 \pm 0,06$  ( $p < 0,05$ ). Dichas modificaciones pueden estar relacionadas con la formación de pigmentos resultantes de reacciones térmicas y la degradación de compuestos preexistentes inherentes a la harina cruda (Moreira et al., 2019). La generación de melanoidinas y otros subproductos cromáticos durante el proceso de extrusión es un fenómeno bien documentado en el discurso académico, que afecta tanto a las características estéticas del producto final como a su aceptabilidad sensorial [20], [21].

Con respecto a las alteraciones en las propiedades reológicas de la harina de haba después de la extrusión, el límite elástico ( $\tau_3$ ) disminuyó de  $52,64 \pm 3,94$  Pa a  $21,97 \pm 1,94$  Pa ( $p < 0,05$ ), lo que significa una reducción de la resistencia al flujo, lo que sugiere una modificación en la estructura del material debido al procesamiento térmico y mecánico. Además, el índice de consistencia (K) experimentó una disminución de  $507,97 \pm 39,45$  Pa a  $359,82 \pm 29,65$  Pa·s ( $p < 0,05$ ), lo que indica una menor viscosidad de la harina extruida, lo que facilita su manipulación en contextos industriales [22].

El exponente de flujo ( $n$ ) disminuyó de  $0,48 \pm 0,01$  a  $0,35 \pm 0,02$  ( $p < 0,05$ ), indicando que la extrusión genera un fluido más pseudoplástico, característico de materiales con una mayor facilidad de deformación bajo esfuerzo [23], además, los módulos viscoelásticos  $G'$

y G” disminuyeron significativamente, lo que sugiere una menor rigidez estructural y una mayor fluidez del material. La reducción del factor de amortiguamiento ( $\text{Tan } \delta$ ) de  $0.72 \pm 0.03$  a  $0.65 \pm 0.02$  ( $p < 0.05$ ) indica una menor contribución de la fase viscosa, lo que puede influir en la textura y en las propiedades de procesamiento de la harina.

## CONCLUSIONES

La extrusión termoplástica de harina de haba andina alteró de forma significativa su perfil composicional y funcional: redujo proteína y fibra, incrementó carbohidratos digestibles y gelatinizó el almidón, lo que originó una masa más fluida pero menos elástica. El oscurecimiento y el viraje a tonalidades rojo-amarillas sugieren la formación de pigmentos de Maillard y carotenoides termo-estables con potencial antioxidante, mientras que la desnaturalización proteica podría favorecer la liberación de péptidos bioactivos. Estas transformaciones convierten a la harina extruida en un ingrediente prometedor para snacks expandidos, mezclas sin gluten y formulaciones imprimibles en 3D, siempre que se controlen las pérdidas nutricionales y se preserve la aceptabilidad sensorial.

Para maximizar su valor, se recomienda optimizar temperatura, humedad y velocidad de tornillo a fin de conservar proteína y fibra sin sacrificar procesabilidad, e incorporar hidrocoloides o concentrados proteicos que restituyan elasticidad en aplicaciones avanzadas. Estudios adicionales de digestibilidad, biodisponibilidad mineral y reducción de anti nutrientes, así como pruebas sensoriales y de vida útil a escala piloto, serán esenciales para validar la viabilidad industrial y compatibilizar el ingrediente con estrategias de economía circular y nutrición sostenible

## AGRADECIMIENTO

Se agradece a la Universidad Nacional Autónoma Altoandina de Tarma el financiamiento que contribuyó a el desarrollo del estudio, mediante la resolución RCO 0148-2023-UNAAT donde se declara ganador del Concurso de Proyectos de Investigación en CTi, Edición 2023.

## REFERENCIAS

- [1] R. Salvador-Reyes, L. C. Furlan, C. Martínez-Villaluenga, B. M. Dala-Paula, and M. T. P. S. Clerici, “From ancient crop to modern superfood: Exploring the history, diversity, characteristics, technological applications, and culinary uses of Peruvian fava beans,” *Food Research International*, vol. 173, p. 113394, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.FOODRES.2023.113394.
- [2] R. S. Reyes et al., “Peruvian Fava Beans for health and food innovation: Physicochemical, morphological, nutritional, and techno-functional characterization,” *Anais do 15º SLACAN - Simpósio Latino-Americano de Ciência de Alimentos e Nutrição.*, vol. 406963, pp. 21252–21252, 2023.

- [3] R. Salvador-Reyes, M. Teresa Pedrosa Silva Clerici, and C. Martínez-Villaluenga, “Enhancing the nutritional and bioactive benefits of faba bean flour by combining preprocessing and thermoplastic extrusion: A comprehensive study on digestion-resistant peptides,” *Food Research International*, vol. 183, p. 114231, May 2024, doi: 10.1016/J.FOODRES.2024.114231.
- [4] J. Espinosa-Ramírez, A. Rodríguez, J. De la Rosa-Millán, E. Heredia-Olea, E. Pérez-Carrillo, and S. O. Serna-Saldívar, “Shear-induced enhancement of technofunctional properties of whole grain flours through extrusion,” *Food Hydrocoll*, vol. 111, p. 106400, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.FOODHYD.2020.106400.
- [5] R. Comettant-Rabanal, C. W. P. Carvalho, J. L. R. Ascheri, D. W. H. Chávez, and R. Germani, “Extruded whole grain flours and sprout millet as functional ingredients for gluten-free bread,” *LWT*, vol. 150, p. 112042, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.LWT.2021.112042.
- [6] Committee A.A. of C.Chemists.A.M, “Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists AACCC.” Accessed: Feb. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.cerealsgrains.org/resources/Methods/Pages/default.aspx>
- [7] R. Lemus-Mondaca, L. Puente-Díaz, A. Vásquez-Montaña, E. León, L. Zura-Bravo, and J. Ortiz-Viedma, “Printability and Thermophysical Properties of Three-Dimensional-Printed Food Based on ‘Cochayuyo’ *Durvillaea antarctica* Seaweed Flour,” *Foods* 2024, Vol. 13, Page 1825, vol. 13, no. 12, p. 1825, Jun. 2024, doi: 10.3390/FOODS13121825.
- [8] Y. Liu et al., “Effects of sodium alginate and rice variety on the physicochemical characteristics and 3D printing feasibility of rice paste,” *LWT*, vol. 127, 2020, doi: 10.1016/j.lwt.2020.109360.
- [9] O. O. Adeleye, S. T. Awodiran, A. O. Ajayi, and T. F. Ogunmoyela, “Effect of high-temperature, short-time cooking conditions on in vitro protein digestibility, enzyme inhibitor activity and amino acid profile of selected legume grains,” *Heliyon*, vol. 6, no. 11, p. e05419, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.HELIYON.2020.E05419.
- [10] C. A. Moreno-Valdespino, D. Luna-Vital, R. M. Camacho-Ruiz, and L. Mojica, “Bioactive proteins and phytochemicals from legumes: Mechanisms of action preventing obesity and type-2 diabetes,” *Food Research International*, vol. 130, p. 108905, Apr. 2020, doi: 10.1016/J.FOODRES.2019.108905.
- [11] L. Hülsebusch, T. R. Heyn, J. Amft, and K. Schwarz, “Extrusion of plant proteins: A review of lipid and protein oxidation and their impact on functional properties,” *Food Chem*, vol. 470, p. 142607, Apr. 2025, doi: 10.1016/J.FOODCHEM.2024.142607.
- [12] E. I. Osuna-Gallardo et al., “Impact of Cooking and Extrusion Processing on Nutritional, Antinutritional, and Techno-Functional Characteristics of Indigenous Bean (*Phaseolus coccineus*),” *ACS Food Science and Technology*, vol. 3, no. 11, pp. 1835–1853, Nov. 2023, doi: 10.1021/ACSFOODSCITECH.2C00416/ASSET/

IMAGES/LARGE/FS2C00416\_0006.JPEG.

- [13] S. Mironeasa, I. Coțovanu, C. Mironeasa, and M. Ungureanu-Iuga, “A Review of the Changes Produced by Extrusion Cooking on the Bioactive Compounds from Vegetal Sources,” *Antioxidants* 2023, Vol. 12, Page 1453, vol. 12, no. 7, p. 1453, Jul. 2023, doi: 10.3390/ANTIOX12071453.
- [14] S. Naumann, U. Schweiggert-Weisz, A. Martin, M. Schuster, and P. Eisner, “Effects of extrusion processing on the physiochemical and functional properties of lupin kernel fibre,” *Food Hydrocoll*, vol. 111, p. 106222, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.FOODHYD.2020.106222.
- [15] C.-F. C.L., G.-M. I.V., L.-Q. J.A., E.-C. M.G., and P.-P. Y., “Efeito da extrusão sobre as características físico-químicas da farinha de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd),” *Biocología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 2016, doi: 10.18684/bsaa(14)92-99.
- [16] L. Roman, M. Gomez, B. R. Hamaker, and M. M. Martinez, “Shear scission through extrusion diminishes inter-molecular interactions of starch molecules during storage,” *J Food Eng*, vol. 238, pp. 134–140, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.JFOODENG.2018.06.019.
- [17] J. Plaza-Díaz, O. Martínez, and Á. Gil, “Los alimentos como fuente de mono y disacáridos: aspectos bioquímicos y metabólicos,” *EFSA Journal*, vol. 8, no. 3, May 2016, doi: 10.2903/J.EFSA.2010.1462.
- [18] C. J. Biermann, “Hydrolysis and other Cleavages of Glycosidic Linkages in Polysaccharides,” *Adv Carbohydr Chem Biochem*, vol. 46, no. C, pp. 251–271, Jan. 1988, doi: 10.1016/S0065-2318(08)60168-7.
- [19] P. B. Pathare, U. L. Opara, and F. A. J. Al-Said, “Colour Measurement and Analysis in Fresh and Processed Foods: A Review,” *Food Bioproc Tech*, vol. 6, no. 1, pp. 36–60, Jan. 2012, doi: 10.1007/S11947-012-0867-9.
- [20] S. Shin and S. R. Bhowmik, “Thermal kinetics of color changes in pea puree,” *J Food Eng*, vol. 24, no. 1, pp. 77–86, Jan. 1995, doi: 10.1016/0260-8774(94)P1609-2.
- [21] C. T. TAN and F. J. FRANCIS, “Effect of Processing Temperature on Pigments and Color of Spinacha,” *J Food Sci*, vol. 27, no. 3, pp. 232–241, May 1962, doi: 10.1111/J.1365-2621.1962.TB00086.X.
- [22] L. Ananthanarayan et al., “Effect of extrusion on thermal, textural and rheological properties of legume based snack,” *J Food Sci Technol*, vol. 55, no. 9, pp. 3749–3756, Sep. 2018, doi: 10.1007/S13197-018-3306-8/METRICS.
- [23] M. Abdi, M. Ould-Rouiss, and A. Noureddine, “Hydrodynamic and rheological characteristics of a pseudoplastic fluid through a rotating cylinder,” *Numeri Heat Transf A Appl*, vol. 85, no. 2, pp. 250–269, 2024, doi: 10.1080/10407782.2023.2181894.