

Effect of thermoplastic extrusion on the techno-functional characteristics of husked fava bean meal

Grimaldo Wilfredo Quispe Santivañez¹ ; Henry Juan Javier-Ninahuaman² ; Joselin Paucarchuo Soto³

^{1,2,3} Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma Altoandina de Tarma, Acobamba 12701, Perú,

gquispe@unaat.edu.pe ; hjavier@unaat.edu.pe ; 71083073@unaat.edu.pe

Abstract— *The Andean fava beans are of particular interest due to their nutritional properties, which, with the addition of thermoplastic extrusion, make them a sustainable techno-functional alternative. Since these effects are still underexplored, this article aims to analyze the effects of extrusion on the techno-functional characteristics of dehulled broad bean flour. To achieve this, physicochemical, color, and rheological analyses were conducted, comparing their means using Student's t-test. The results indicate that thermoplastic extrusion significantly reduces protein content (from 38.11 ± 1.11 to 33.74 ± 1.95) and dietary fiber (from 5.74 ± 0.19 to 4.52 ± 0.17), while ash (from 1.03 ± 0.05 to 1.03 ± 0.02) and fat (from 2.14 ± 0.04 to 2.06 ± 0.08) remained relatively constant. The color darkened slightly (from 95.10 ± 0.06 to 83.5 ± 0.09), with a reddish (from 0.057 ± 0.01 to 3.81 ± 0.08) and yellowish (from 6.57 ± 0.79 to 23.58 ± 0.06) tendency. The rheological behavior of broad bean flour showed a reduction in yield stress parameters (from 52.64 ± 3.94 Pa to 21.97 ± 1.94 Pa), consistency index (from 507.97 ± 39.45 Pa·sⁿ to 359.82 ± 29.65 Pa·sⁿ), elasticity (from $30,417.91 \pm 431.12$ Pa to $23,969.48 \pm 319.48$ Pa), viscosity (from $21,777.93 \pm 314.15$ Pa to $15,679.52 \pm 214.56$ Pa), damping (from 0.72 ± 0.03 to 0.65 ± 0.02), and pseudoplastic behavior ($p < 0.05$).*

Keywords-- *Vicia Faba, physicochemicals, extruded flour, rheology, colorimetric*

Efecto de la extrusión termoplástica en las características tecno funcionales de la harina descascarillada de habas

Grimaldo Wilfredo Quispe Santivañez¹; Henry Juan Javier-Ninahuaman²; Joselin Paucarchuco Soto³

^{1,2,3} Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma Altoandina de Tarma, Acobamba 12701, Peru.,

gquispe@unaat.edu.pe; hjavier@unaat.edu.pe; 71083073@unaat.edu.pe

Resumen– Las habas andinas son de especial interés por sus propiedades nutricionales, que con la adición de la extrusión termoplástica lo convierten en una alternativa sostenible tecno funcionalmente, debido a que estos efectos todavía son poco estudiados, el presente artículo pretende analizar los efectos de la extrusión sobre las características tecno funcionales de la harina de habas descascarillada. Para ello realiza análisis fisicoquímicos, de color y reológicos para comparar sus medias mediante el estadístico *t* de Student. Los resultados indican que la extrusión termoplástica genera efectos significativos en la reducción de proteínas (de $38,11 \pm 1,11$ a $33,74 \pm 1,95$) y fibra dietaria (de $5,74 \pm 0,19$ a $4,52 \pm 0,17$), valores relativamente constantes de ceniza (de $1,03 \pm 0,05$ a $1,03 \pm 0,02$) y grasa (de $2,14 \pm 0,04$ a $2,06 \pm 0,08$), el color fue oscurecido levemente (de $95,10 \pm 0,06$ a $83,5 \pm 0,09$) con tendencia rojiza (de $0,057 \pm 0,01$ a $3,81 \pm 0,08$) y amarilla (de $6,57 \pm 0,79$ a $23,58 \pm 0,06$) y el comportamiento reológico de la harina de haba indica reducción en los parámetros de esfuerzo de fluencia (de $52,64 \pm 3,94$ Pa a $21,97 \pm 1,94$ Pa), índice de consistencia (de $507,97 \pm 39,45$ Pa·sⁿ a $359,82 \pm 29,65$ Pa·sⁿ), elasticidad (de $30417,91 \pm 431,12$ Pa a $23969,48 \pm 319,48$ Pa) y viscosidad (de $21777,93 \pm 314,15$ Pa a $15679,52 \pm 214,56$ Pa), amortiguamiento (de $0,72 \pm 0,03$ a $0,65 \pm 0,02$) y comportamiento pseudoplástico ($p < 0,05$).

Palabras clave– Vicia Faba, fisicoquímicas, Harina extruida, reología, colorimétrico.

I. INTRODUCCIÓN

El hambre y la seguridad alimentaria fueron considerados como objetivos de desarrollo sostenible prioritarios a nivel mundial. Las habas andinas (Vicia faba var. minor) están siendo valoradas como un potencial superalimento por sus propiedades del mejoramiento nutricional y útil para la innovación [1]. Su contenido nutricional es impresionante, pues contiene cerca al 25% de proteínas, cuyos aminoácidos con preponderantemente esenciales, esto sumado al alto contenido de fibra dietética, minerales y antioxidantes (polifenoles y flavonoides) [2] podrían calificarlo como un alimento funcional, pero la presencia de anti nutrientes en la cáscara lo limita, aunque el tratamiento de este defecto se puede subsanar al uso de técnicas físicas y térmicas como el preprocesamiento por inmersión y descascarillado, seguidas por la extrusión termoplástica, este método beneficia con el aumento de la digestibilidad de las proteínas, los compuestos bioactivos y la formación de péptidos resistentes a la digestión con potencial antidiabético y antihipertensivo [3], la extrusión es ampliamente utilizada en la industria agroalimentaria pues mejora la digestibilidad, estabilidad y propiedades sensoriales de distintos productos a base de cereales y leguminosas, pero

puede modificar sus propiedades nutricionales, la extrusión termoplástica contribuye al cambio de las propiedades reológicas e hidrocoloides [4], [5] que deben ser estudiadas ampliamente para su aplicación industrial. El objetivo de este estudio consiste en la determinación de los efectos de la extrusión termoplástica sobre las características tecno funcionales de la harina de habas andina descascarillada.

II. METODOLOGÍA

A. Materia prima

Las habas utilizadas en el presente estudio tienen su origen en la zona andina del Perú, y son parte de las muestras fueron usadas en la investigación de Salvador-Reyes et al. [3], a continuación, se describe el diagrama de flujo en la Fig 1.

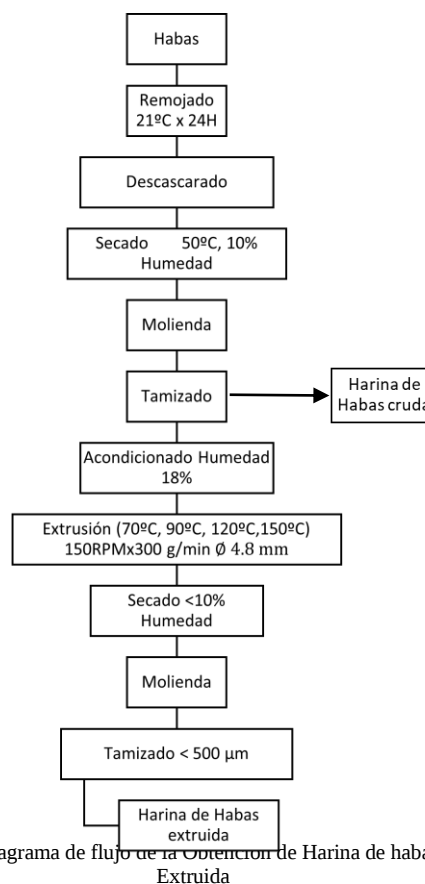


Fig 1. Diagrama de flujo de la obtención de Harina de habas Cruda y Extruida

B. Análisis Fisicoquímicos

El estudio se ocupa de reportar los efectos que tiene la aplicación de la tecnología de extruido termoplástico sobre la harina de habas, por lo que se describe los cambios producidos a nivel fisicoquímico primeramente.

Los análisis fisicoquímicos fueron determinados de acuerdo a la metodología oficial de la AACCI [6], el cual indica la metodología de determinación de la humedad (44-15.02), proteína (46-13.01, factor de conversión de nitrógeno = 5.4), grasa bruta (30-25.01), fibra dietética (32-05.01) y cenizas totales (08-16.01).

Los carbohidratos digeribles fueron calculados por diferencia del peso inicial de muestra menos el contenido de proteínas, grasa bruta, fibra dietética y cenizas totales (en base seca). Los parámetros de color (L^* , a^* y b^*) fueron calculados en el sistema CIELab utilizando un colorímetro CR-400 (Konica Minolta, Japón).

El estudio se ocupó de evaluar las propiedades reológicas de la harina cruda y extruida de habas andina. Las características reológicas fueron evaluadas de acuerdo al protocolo de Lemus-Moncada et al. [7], mediante un reómetro HAAKE RheoStress 6000 (Thermo Scientific, Karlsruhe, Alemania), el proceso de medición consistió en colocar las muestras entre placas paralelas (60 mm) a 25 °C para luego ser comprimidas hasta un espacio de 1 mm, los resultados reológicos se obtuvieron luego de 5 minutos de equilibrio para alcanzar la temperatura de medición de 25 °C. Las curvas de flujo se midieron en función de la velocidad de corte (0,01–10 s^{-1}) para determinar el esfuerzo cortante mediante la fórmula: $\tau = \tau_0 + k [\dot{\gamma}]^n$; donde k es el índice de consistencia (Pa.s n), y n es el comportamiento del flujo [8].

Los análisis estadísticos, se basaron en la comparación de medias e identificación de las diferencias significativas entre muestras ($p < 0,05$) determinadas por la prueba t de Student en el software libre R.

III. RESULTADOS

Los resultados muestran que la extrusión hizo modificaciones sustanciales a la composición y reología de la harina, por ello los resultados se evalúan en tres enfoques, la primera de acuerdo a los cambios en la evaluación proximal, la segunda se ocupa de los cambios en el color (colorimétricas) en el Sistema Cielab y la tercera parte de los cambios en las propiedades reológicas.

A. Cambios en la evaluación proximal

En la Tabla I se muestran las comparaciones proximales de la harina de haba cruda y extruida, indicando el grado de significancia de cada una, estos resultados son comprados y e informa el grado de significancia.

TABLA I
COMPARACIONES QUÍMICO PROXIMALES ENTRE LAS HABAS ANDINAS
CRUDAS Y EXTRUIDAS

Características	Habas andinas crudas (HAC)	Habas andinas extruidas (HAE)	$p < 0.05^2$
Proteína (g/100g)	38.11 $\pm$ 1.11	33.74 $\pm$ 1.95	**
Grasa (g/100g)	2.14 $\pm$ 0.04	2.06 $\pm$ 0.08	*
Ceniza (g/100g)	1.03 $\pm$ 0.05	1.03 $\pm$ 0.02	*
Fibra dietaria (g/100g)	5.74 $\pm$ 0.19	4.52 $\pm$ 0.17	**
Carbohidratos digeribles (g/100g)	50.98	58.65	**

^a Nota: 1 Humedad inicial HAC=4,25 $\pm$ 0,25 (g/100g), HAE=4,97 $\pm$ 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 fue reducida de 38.11 $\pm$ 1.11 g/100g en las habas crudas a 33.74 $\pm$ 1.95 g/100g en las extruidas ($p < 0.05$), podría deberse a la desnaturalización de las proteínas durante el proceso de extrusión, el contenido de grasa se conservó relativamente constante, con un ligero descenso de 2.14 $\pm$ 0.04 g/100g a 2.06 $\pm$ 0.08 g/100g ($p < 0.05$), por lo que se puede indicar que la extrusión no afecta significativamente este componente, muy parecido al comportamiento del contenido de ceniza, pues se mantuvo invariable (1.03 $\pm$ 0.05 g/100g en crudas y 1.03 $\pm$ 0.02 g/100g en extruidas), sin embargo, la fibra dietaria se redujo significativamente de 5.74 $\pm$ 0.19 g/100g a 4.52 $\pm$ 0.17 g/100g ($p < 0.05$), lo que podría estar relacionado con la degradación de estructuras complejas.

Por otro lado, los carbohidratos digeribles aumentaron de 50.98 g/100g a 58.65 g/100g ($p < 0.05$), sugiriendo que la extrusión facilita la hidrólisis de polisacáridos complejos en formas más asimilables, esta propiedad es muy valorada a nivel industrial en la fabricación de snacks, desarrollo de nuevos productos, obtención de texturas personalizadas, dietas especiales y en la producción a escala.

B. Cambios colorimétricos

La Tabla II. Muestra las comparaciones de los cambios en el color de la harina de habas andinas crudas y extruidas, según el sistema Cielab, se observa la significancia de los parámetros a 0.05 de significancia.

TABLA II
COMPARACIONES COLORIMÉTRICAS ENTRE LAS HABAS ANDINAS
CRUDAS Y EXTRUIDAS

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

^a Nota: 1 Humedad inicial HAC=4,25 $\pm$ 0,25 (g/100g), HAE=4,97 $\pm$ 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

Estos cambios fueron significativos, observándose una disminución en la claridad (L^*), de 95.10 $\pm$ 0.06 en crudas a 83.59 $\pm$ 0.09 en extruidas ($p < 0.05$), posiblemente por el desarrollo de reacciones de Maillard y caramelización.

Al analizar el componente rojo (a^*) se muestra el aumento significativo de 0.57 ± 0.01 a 3.81 ± 0.08 ($p < 0.05$), mientras que el amarillo (b^*) incrementó de 6.57 ± 0.79 a 23.58 ± 0.06 ($p < 0.05$), estos cambios se asocian a la generación de pigmentos durante la extrusión.

La diferencia se puede observar en la Fig. 2. de la harina de habas sin extruir y la extruida.



Fig. 2
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. τ_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 (τ_0) disminuyó de 52.64 ± 3.94 Pa a 21.97 ± 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 ± 39.45 $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$ en crudas y 359.82 ± 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 ± 0.01 a 0.35 ± 0.02 ($p < 0.05$), indicando que la extrusión convierte la mezcla en un fluido más seudoplástico, de la misma forma, los módulos viscoelásticos también disminuyeron: G' de 30417.91 ± 431.12 Pa a 23969.48 ± 319.48 Pa, y G'' de 21777.93 ± 314.15 Pa a 15679.52 ± 214.56 Pa ($p < 0.05$), lo que sugiere una menor elasticidad y viscosidad; el factor de amortiguamiento ($\tan \delta$) disminuyó de 0.72 ± 0.03 a 0.65 ± 0.02 ($p < 0.05$), indicando una menor contribución de la fase viscosa.

TABLA III
COMPARACIONES DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS DE LAS HABAS ANDINAS CRUDAS Y EXTRUIDAS

Características	HAC	HAE	p < 0.052
-----------------	-----	-----	-----------

τ_0 (Pa)	52.64 ± 3.94	21.97 ± 1.94	**
K (Pa·s ⁿ)	507.97 ± 39.45	359.82 ± 29.65	**
N	0.48 ± 0.01	0.35 ± 0.02	*
R ²	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 δ	0.72 ± 0.03	0.65 ± 0.02	**

^a Nota: 1 Humedad inicial HAC=4,25 $\pm$ 0,25 (g/100g), HAE=4,97 $\pm$ 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.

IV. DISCUSIONES

La investigación revela los efectos del proceso de extrusión sobre la composición proximal de la harina de haba, se observó una reducción significativa en el contenido de proteína, desde 38.11 ± 1.11 g/100g en la harina cruda a 33.74 ± 1.95 g/100g en la harina extruida ($p < 0.05$), presumiblemente por la desnaturalización proteica inducida por la combinación de alta temperatura y presión durante el proceso de extrusión, lo que genera modificaciones estructurales que pueden afectar la solubilidad y disponibilidad biológica de las proteínas [9], este fenómeno es común en procesos térmicos intensivos, donde la alteración de los enlaces peptídicos puede comprometer la funcionalidad proteica [10].

En cuanto al contenido lipídico, se registró una leve disminución de 2.14 ± 0.04 g/100g en la harina cruda a 2.06 ± 0.08 g/100g en la extruida ($p < 0.05$). A pesar de la reducción, el impacto de la extrusión sobre los lípidos fue mínimo, lo que sugiere que las condiciones del proceso no promovieron una degradación significativa de estos compuestos [11]. Estos resultados indican que en el haba hay mayor estabilidad de los lípidos que en el frijol de ayocote, donde se encontraron diferencias significativas bajo condiciones controladas de extrusión [12].

El contenido de ceniza permaneció invariable (1.03 ± 0.05 g/100g en cruda y 1.03 ± 0.02 g/100g en extruida), lo que indica que el tratamiento térmico no afectó la concentración de minerales en la harina. Esto es consistente con la naturaleza estable de los minerales frente a los procesos térmicos, aunque su biodisponibilidad podría verse modificada por otros

factores, como la formación de complejos insolubles con compuestos resultantes del tratamiento térmico [13](Ding et al., 2021).

Por otro lado, la fibra dietaria sufrió una reducción significativa de 5.74 ± 0.19 g/100g a 4.52 ± 0.17 g/100g ($p < 0.05$). Esta disminución podría deberse a la degradación de estructuras complejas de polisacáridos no digeribles, tales como la celulosa y hemicelulosas, por efecto del calor y la cizalla mecánica inherente a la extrusión [14]. La fragmentación de estas estructuras reduce la proporción de fibra insoluble, lo que podría influir en la capacidad de retención de agua y en la funcionalidad de la harina en aplicaciones alimentarias [15], [16].

El aumento en los carbohidratos digeribles de 50.98 g/100g a 58.65 g/100g ($p < 0.05$) sugiere que la extrusión facilita la hidrólisis parcial de polisacáridos complejos, generando estructuras más accesibles para la acción enzimática y posterior absorción. Este hallazgo coincide con investigaciones previas que indican que la extrusión mejora la digestibilidad del almidón al inducir la gelatinización y romper los enlaces de la matriz polimérica [17], [18].

En cuanto a los cambios en el color de la harina de habas andinas se observó una reducción en la claridad (L*), de 95.10 ± 0.06 en la harina cruda a 83.59 ± 0.09 en la extruida ($p < 0.05$), esta disminución puede atribuirse al desarrollo de reacciones de Maillard y caramelización, procesos típicos en tratamientos térmicos intensos que conducen a la formación de compuestos pigmentados [19].

Respecto a los componentes cromáticos, el parámetro rojo (a*) mostró un aumento significativo de 0.57 ± 0.01 a 3.81 ± 0.08 ($p < 0.05$), mientras que el amarillo (b*) se incrementó de 6.57 ± 0.79 a 23.58 ± 0.06 ($p < 0.05$). Estos cambios pueden estar relacionados con la generación de pigmentos derivados de reacciones térmicas y la descomposición de compuestos preexistentes en la harina cruda (Moreira et al., 2019). La formación de melanoidinas y otros productos coloreados durante la extrusión es un fenómeno documentado en la literatura, que influye en la apariencia del producto final y en su aceptación sensorial [20], [21].

Sobre los cambios en las propiedades reológicas de la harina de habas tras la extrusión, el esfuerzo de fluencia (τ_0) disminuyó de 52.64 ± 3.94 Pa a 21.97 ± 1.94 Pa ($p < 0.05$), indicando una menor resistencia al flujo, lo que sugiere que la estructura del material ha sido modificada por el tratamiento térmico y mecánico, asimismo, el índice de consistencia (K) se redujo de 507.97 ± 39.45 Pa·sⁿ a 359.82 ± 29.65 Pa·sⁿ ($p < 0.05$), lo que implica una menor viscosidad en la harina extruida, favoreciendo su manipulación en aplicaciones industriales [22].

El exponente de flujo (n) disminuyó de 0.48 ± 0.01 a 0.35 ± 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 ($\tan \delta$) de 0.72 ± 0.03 a 0.65 ± 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.

V. 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 antinutrientes, 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/RECONOCIMIENTO

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 15° 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 AACC." Accessed: Feb. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.cerealsgrains.org/resources/Methods/Pages/default.aspx>
- [7] R. Lemus-Mondaca, L. Puente-Díaz, A. Vásquez-Montaño, 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.HELİYON.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. Mironcasi, I. Coțovanu, C. Mironcasi, 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 physicochemical 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.)," *Biotecnología 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.