

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE INGENIERÍA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS



EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y REOLÓGICAS DE LA
HARINA INTEGRAL PRECOCIDA POR EXTRUSIÓN TERMOPLÁSTICA A
PARTIR DE CEREALES Y LEGUMBRES

Tesis

Para optar el título de:

INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

PRESENTADO POR:

FRANZ JOEL CHUQUI PAULINO

Tingo María – Perú.

2025



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María
FACULTAD DE INGENIERIA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS
Carretera Central Km. 1.21. Apartado Postal 156 Tingo María
E.mail; fiia@unas.edu.pe

"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 001-2025

Los Miembros del Jurado que suscriben, reunidos en acto público el 21 de febrero del 2025, a horas 8:00 a.m., en la Sala de Grados de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, ubicada en la ciudad de Tingo María, provincia de Leoncio Prado, región Huánuco, para calificar la tesis presentada por el Bach. **FRANZ JOEL CHUQUI PAULINO**, titulada:

"EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y REOLÓGICAS DE LA HARINA INTEGRAL PRECOCIDA POR EXTRUSIÓN TERMOPLÁSTICA A PARTIR DE CEREALES Y LEGUMBRES"

Después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las preguntas formuladas, lo declaran **APROBADO**..... con el calificativo de **EXCELENTE**.....; en consecuencia, el sustentante, queda **APTO** para obtener el título de **Ingeniero en Industrias Alimentarias**, de conformidad con el artículo 45° numeral 45.2, de la Ley Universitaria 30220; los artículos 132 inciso "k" y 135 inciso "f" del Estatuto de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

Tingo María, 21 de febrero del 2025


Dra. Yolanda Jesús Ramírez Trujillo
Presidenta


Dra. Luz Milagros Fotlegatti Romero
Miembro


M.Sc. Humberto Hugo Rivera Rojas
Miembro


Dr. Jaime Eduardo Basilio Atencio
Asesor



"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres"
"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N 042 - 2026 - CS-RIDUNAS

El Jefe de la Unidad de Soporte Científico de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% y contenido generado por Inteligencia Artificial menor o igual al 20%. Según establece el Art. 29° y 30° del Acuerdo Nro.017-2025-CIUNAS-VRI-UNAS.

Programa de Estudio:

Ingeniería en Industrias Alimentarias

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de Suficiencia Profesional	
-------	---	------------------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE	
		SIMILITUD	CONTENIDO GENERADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL
EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y REOLÓGICAS DE LA HARINA INTEGRAL PRECOCIDA POR EXTRUSIÓN TERMOPLÁSTICA A PARTIR DE CEREALES Y LEGUMBRES	FRANZ JOEL CHUQUI PAULINO	06 % Seis	Menor a 20 %

Tingo María, 11 de febrero de 2026.

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
 UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO

 ING. EINSTEIN A. ORTIZ MORALES
 JEFE

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE INGENIERÍA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS



EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y REOLÓGICAS DE LA
HARINA INTEGRAL PRECOCIDA POR EXTRUSIÓN TERMOPLÁSTICA A
PARTIR DE CEREALES Y LEGUMBRES

Autor	: Chuqui Paulino Franz Joel
Asesores	: Dr. Basilio Atencio Jaime E. Dr. Piler de Carvalho Carlos Wanderlei Dr. Hidalgo Chávez Davy William
Área de investigación	: Ciencias de alimentos
Grupo de investigación	: Ingeniería de alimentos - IA
Línea de investigación	: Ingeniería de alimentos
Lugar de ejecución	: EMBRAPA Agroindustria de Alimentos (Brasil).
Duración	: 06 Meses
Financiamiento	: Propio

Tingo María – Perú. 2025

DEDICATORIA

A mi señor padre y mi señora madre

Que se sientan orgullosos, a pesar que la vida me golpeo muchas veces, nunca deje de levantarme. Que, a pesar de las dificultades y el tiempo, quiero entregarles este regalo de formarme como profesional en mi querido país. Así mismo, agradecerles por su apoyo incondicional, su comprensión, sus cuidados y por compartirme sus fuerzas para que no desfalleciera en la lucha por cumplir este objetivo anhelado.

A mi hermano y hermanas

Decirles que nunca es tarde para poder concretar los sueños, que a pesar de lo bueno y lo malo nunca se debe dejar de luchar, que lo material se consigue, y que el conocimiento se alcanza con esfuerzo y dedicación.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por ser siempre mi apoyo en los momentos de dificultad, proporcionándome salud, fuerza, paciencia y sabiduría para superar todas las adversidades que se presentaron en mi caminar.

A la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS), en especial a la Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias, por el conocimiento brindado por todos los profesores durante mi etapa de formación profesional.

A la empresa EMBRAPA Agroindustria de Alimentos (Brasil) por las facilidades prestadas para la realización de este estudio.

Al Dr. Jaime Basilio Atencio, por su orientación como asesor de este trabajo, por todo el conocimiento compartido y transmitido, por su apoyo, atención y paciencia conmigo.

Al Dr. Davy William Hidalgo Chávez por su apoyo y colaboración en el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Carlos Wanderlei Piler de Carvalho, profesor investigador de Brasil, por su apoyo y orientación en el desarrollo de este trabajo.

Al profesor investigador D.SC. José Luís Ramírez Ascheri y al D.SC. Jhonny William Vargas Solorzano por el apoyo y colaboración en el logro de los objetivos de este trabajo.

A los analistas y asistentes de la empresa EMBRAPA Agroindustria de Alimentos que contribuyeron directa o indirectamente a la realización de este trabajo, por su colaboración y apoyo.

A los miembros del jurado de la presente tesis, por su participación y sus sugerencias que permitieron mejorar el presente trabajo.

INDICE

I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Antecedentes	3
2.2. Cereales integrales y legumbres.....	4
2.2.1. Arroz parbolizado integral	5
2.2.2. Mijo perla	6
2.2.3. Frijol carioca	7
2.2.4. Garbanzos.....	8
2.3. Extrusión de cereales y legumbres.....	9
2.3.1. Proceso de extrusión	9
2.3.2. Tipos de extrusoras	9
2.3.3. Efecto de las condiciones de extrusión.	10
2.4. Proceso de extrusión de harinas de cereales y legumbres.....	11
2.5. Harinas integrales precocidas sin gluten extruidas usadas en alimentos	13
III. MATERIALES Y MÉTODOS	15
3.1. Lugar de ejecución.....	15
3.2. Materiales.....	16
3.2.1. Materia prima.....	16
3.3. Metodología experimental	16
3.3.1. Preparación de las harinas crudas	16
3.3.2. Determinación y ajuste del contenido de humedad.....	16
3.3.3. Proceso de extrusión de las harinas.....	17
3.3.4. Obtención de la harina extruida	18
3.3.5. Evaluación de las propiedades físicas de las harinas	18
3.3.6. Evaluación de las propiedades tecnológicas de las harinas	20
3.3.7. Evaluación de las propiedades reológicas de las harinas	21
3.4. Diseño experimental.	21
3.5. Análisis estadísticos	23
IV. RESULTADOS Y DISCUSION.....	24
4.1. Efecto de las condiciones de extrusión en las variables del sistema del proceso	24

4.1.1. Torque.....	24
4.1.2. Energía mecánica específica (EME).....	24
4.2. Propiedades físicas de las harinas.....	26
4.2.1. Densidad aparente.....	26
4.2.2. Distribución del tamaño de partícula.....	27
4.2.3. Color en las harinas.....	31
4.3. Propiedades tecno-funcionales de las harinas.....	34
4.3.1. Índice de absorción de agua.....	34
4.3.2. Índice de solubilidad en agua.....	36
4.3.3. Índice de absorción de aceite.....	38
4.4. Propiedades reológicas de las harinas.....	40
4.5. Contenido de polifenoles totales y propiedades antioxidantes de las harinas.....	43
4.5.1. Contenido de polifenoles totales (CPT).....	43
4.5.2. Actividad antioxidante ABTS+ y DPPH.....	43
V. CONCLUSIONES.....	45
VI. PROPUESTAS A FUTURO.....	46
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47
ANEXOS.....	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
Tabla 1. Comercialización y descripción del arroz beneficiado.....	5
Tabla 2. Determinación del flujo de agua para ajuste del contenido de humedad.	17
Tabla 3. Contenido de polifenoles totales (CPT), actividad antioxidante (ABTS+ y DPPH), en las harinas integrales de cereales y legumbres, harina integral mezclada no extrusionada y extrusionada.	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
Figure 1. Estructura del grano de arroz.	6
Figura 2. Tecnología de extrusión (a) Extrusora mono tornillo (b) Extrusora de doble tornillo (c) Tipos de aberturas de las matrices (d) Tornillo corrotante y contrarrotante. Adaptado de Dalbhagat and Mishra (2019).	10
Figure 3. Ubicación y localización del lugar de ejecución.	15
Figure 4. Cereales integrales y legumbres usadas en el presente trabajo, frijol carioca (a), arroz parbolizado (b), mijo perla (c) y garbanzo (d).....	16
Figure 5. Sistema de color CIELAB.....	20
Figure 6. Esquema de la obtención de la harina integral extruida. M1: 60/15/10/15, M2: 15/60/10/15, M3: 15/15/10/60 y M4: 30/30/10/30 (Formulaciones con porcentaje de la mezcla de arroz/mijo/Frijol/garbanzo). SE: Sin extrusión, C1: velocidad de tornillo (300 Rpm) y Humedad (30 %) y C2: Velocidad de tornillo (600 Rpm) y Humedad (18 %).	22
Figura 7. Efecto de las condiciones de extrusión en el torque (a) y la EME (b) en la obtención de harinas precocidas integrales.	25
Figura 8. Efecto de las condiciones de extrusión en la densidad aparente de las mezclas de harinas de las formulaciones crudas (a) y extruidas (b).	27
Figura 9. Curvas de distribución del tamaño de las partículas de harina integral mezclada no extruida (a), diámetro de partícula grande D90 (b), diámetro de partícula intermedio D50 (c) y diámetro de partícula pequeña D10 (d).	28
Figura 10. Valores de media volumétrica D [4,3] (a), media superficial D [3,2] (b), de Span (c) y de las curvas de porcentaje en volumen de la distribución del tamaño de partículas (d).	29
Figura 11. Curvas de distribución del tamaño de las partículas de la harina integral mezclada extruida (a), diámetro de las partículas grandes D90 (b), diámetro de las partículas intermedias D50 (c) y diámetro de las partículas pequeñas D10 (d).	30
Figura 12. Parámetros de color de las harinas mixtas crudas, L* (a), a* (b), b* (c). ...	31
Figura 13. Color en la harina mezclada extruida, L* (a), a* (b) y b* (c).	33
Figura 14. Índice de absorción de agua de las harinas mezcladas no extruidas (a) y harinas mezcladas extruidas (b).	36

Figura 15. Índice de solubilidad en agua de las harinas mezcladas no extruidas (a) y harinas mezcladas extruidas (b).....	38
Figura 16. Índice de absorción de aceite de las harinas crudas (a) y extruidas (b).	39
Figura 17. Perfil de las propiedades reológicas de las harinas mezcladas no extruidas.	41
Figura 18. Perfil de las propiedades reológicas de las harinas mezcladas extruidas bajo las dos condiciones de extrusión.	42

RESUMEN

El estudio analiza el uso de fuentes vegetales, como cereales no tradicionales y legumbres, en la producción de harinas precocidas integrales sin gluten. Se evaluaron diferentes mezclas de mijo perla, arroz integral parbolizado, garbanzos y frijol carioca. Se llevaron a cabo dos condiciones de extrusión: C1 (blanda) y C2 (severa). Se midieron variables del proceso, como el torque y la energía mecánica específica, siendo mayores en C2. Se analizaron las características físicas: densidad aparente, distribución granulométrica (tamaño de partícula) y color. Las dos condiciones de extrusión promovieron una reducción de las fracciones del tamaño de partículas en las harinas. Entre tanto, el color fue influenciado con la reducción de los parámetros de luminosidad (L^*) y aumento de la cromaticidad a^* y b^* . También se observaron propiedades tecno-funcionales (solubilidad, absorción de agua y de aceite). Tras la extrusión, la densidad aparente, la solubilidad y la absorción de agua aumentaron, mientras que la absorción de aceite disminuyó. Las condiciones de extrusión usadas afectaron negativamente a los gránulos de almidón reduciendo los valores de viscosidad y a las propiedades antioxidantes de las harinas. Por otro lado, el uso de elevadas temperaturas, puede reducir dichas propiedades. Además, las harinas con más mijo y frijol carioca mostraron mayores compuestos fenólicos y actividad antioxidante.

Palabras Clave: Extrusión, harinas precocidas, propiedades tecno-funcionales, legumbres, cereales integrales.

ABSTRACT

This study analyzes the use of plant sources, such as non-traditional cereals and legumes, in the production of gluten-free precooked whole-grain flours. Different blends of pearl millet, parboiled brown rice, chickpeas, and carioca beans were evaluated. Two extrusion conditions were used: C1 (soft) and C2 (hard). Process variables such as torque and specific mechanical energy were measured, with C2 being higher. Physical characteristics were analyzed: apparent density, particle size distribution (particle size), and color. Both extrusion conditions promoted a reduction in particle size fractions in the flours. Color was influenced by a reduction in the luminosity parameters (L^*) and an increase in the chromaticity parameters a^* and b^* . Techno-functional properties (solubility, water and oil absorption) were also observed. After extrusion, bulk density, solubility, and water absorption increased, while oil absorption decreased. The extrusion conditions used negatively affected the starch granules, reducing the flours' viscosity and antioxidant properties. Furthermore, the use of high temperatures can reduce these properties. Furthermore, flours with higher levels of millet and carioca beans showed higher phenolic compounds and antioxidant activity.

Key Words: Extrusion, precooked flours, techno-functional properties, legumes, whole grains.

I. INTRODUCCIÓN

Los patrones dietéticos están cambiando para obtener más proteínas de fuentes vegetales con el fin de aprovechar los atributos nutricionales de los cereales combinados con legumbres, lo que ofrece la oportunidad de mejorar simultáneamente la calidad nutricional y la sostenibilidad medioambiental de las dietas Marinangeli (2022). Las legumbres son un subconjunto de cereales ampliamente identificados en forma de judías secas, lentejas, guisantes y garbanzos (FAO, 2023). Tanto las legumbres como los cereales, consumidos en su totalidad, son alimentos ricos en nutrientes. Combinarlos es una estrategia para garantizar la suficiencia de aminoácidos esenciales, fibra alimentaria, folato, hierro, potasio y otros micronutrientes, que pueden complementar el perfil nutricional y los beneficios para la salud (Marinangeli, 2022).

Sin embargo, aprovechar los atributos nutricionales de los granos enteros de cereales como las legumbres para el desarrollo de nuevos productos ha sido un reto, sobre todo porque presentan en cierto grado factores anti nutricionales y sabor indeseable (sabor a frijol), por lo que se ha utilizado la extrusión termoplástica con el propósito de modificar su sabor y reducir estos factores. La cocción por extrusión se ha utilizado durante mucho tiempo para procesar materiales amiláceos, así como otros materiales (Tiwari & Jha, 2017). Esta tecnología es una operación versátil porque facilita el procesamiento de una amplia variedad de materias primas, incluyendo cereales, legumbres y sus mezclas, para producir comidas precocinadas con atributos físicos específicos (Pismag et al., 2023). La cocción por extrusión es un proceso térmicamente eficiente porque ofrece muchas ventajas en el procesamiento de productos con un alto contenido proteico, como la soja o las legumbres, etc., debido a la cocción a alta temperatura y durante un corto período de tiempo, por lo que los factores anti nutricionales se destruyen eficazmente sin perjudicar la calidad nutricional de la materia prima (Tiwari & Jha, 2017). El desarrollo de las propiedades físicas en las harinas precocidas es el resultado del uso de los parámetros o condiciones del proceso en la extrusora y, en consecuencia, de las modificaciones que se producen en los materiales procesados (Pismag et al., 2023).

El proceso de extrusión puede analizarse examinando los efectos de la modificación de parámetros independientes que influyen en un conjunto de parámetros dependientes. Estos parámetros independientes pueden clasificarse como parámetros ajustables o variables. Los parámetros ajustables deben definirse antes del funcionamiento del equipo y están relacionados con el diseño del mismo, como la configuración del tornillo, la rotación del tornillo, el diseño

de la matriz y otros. Por otro lado, los parámetros variables pueden ser ajustados durante la operación del equipo, por ejemplo, perfil de temperatura de las zonas de calentamiento, contenido de humedad de las harinas crudas, velocidad del tornillo, caudal de alimentación, entre otros. Los parámetros dependientes se clasifican en dos categorías: parámetros del sistema, relacionados con el funcionamiento del equipo, y parámetros del producto, asociados a las transformaciones de las materias primas alimentadas en la extrusora. La energía mecánica específica (EME) y el par (T) son los parámetros del sistema que permiten estimar el consumo de energía y la fuerza mecánica ejercida durante el proceso de extrusión, así como la presión en el interior del equipo, condición que también puede controlarse parcialmente y cuyo comportamiento depende de los parámetros del proceso. Los parámetros del producto representan los resultados del proceso, y sus valores dependen de la manipulación de los parámetros del proceso y del sistema (Pismag et al., 2023).

Se han publicado varios informes sobre la cocción por extrusión con materias primas de origen vegetal, puras o mezcladas, utilizadas en la producción de harinas precocidas y, durante el proceso de producción, se ha evaluado el comportamiento de los parámetros de extrusión en los materiales extruidos. El objetivo general de este estudio fue evaluar las características físicas y reológicas de la harina integral precocida por extrusión termoplástica a partir de cereales y legumbres. Y como objetivos específicos:

- Evaluar el efecto de las condiciones de extrusión (C1=suave y C2=severa) sobre el rendimiento de la extrusora (Torque y energía mecánica específica) durante la obtención de harinas integrales precocidas.
- Evaluar las propiedades físicas (Densidad aparente, distribución del tamaño de partículas y color) de las harinas mezcladas crudas y precocidas por extrusión bajo dos condiciones: suave y severa.
- Evaluar las propiedades tecno-funcionales (Índice de absorción de agua, de solubilidad en agua y de absorción de aceite) de las harinas mezcladas crudas y precocidas por extrusión bajo dos condiciones: suave y severa.
- Evaluar las propiedades reológicas mediante el análisis del perfil de viscosidad de pasta (RVA), de las harinas mezcladas crudas y precocidas por extrusión bajo dos condiciones: suave y severa.
- Determinar el contenido de polifenoles totales (CPT) y las propiedades antioxidantes de las harinas mezcladas crudas y precocidas por extrusión bajo dos condiciones: suave y severa.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

Alemayehu et al. (2019) evaluaron el efecto de los parámetros del proceso de extrusión en la calidad de aperitivos listos para el consumo a base de cereales y legumbres. Buscando la mezcla óptima, se seleccionó y analizó una formulación que contenía 41,1 g/100 g de garbanzo (desi), 16,0 g/100 g de alubia blanca (Nasir), 31,9 g/100 g de maíz (Melkassa 2) y 10,9 g/100 g de harina de mijo (Tadesse), por ser la mayor fuente de proteínas (18,09 g/10 g) y energía (400,56 kcal). El extruido óptimo obtenido a una temperatura de barril de 120 °C, una velocidad de tornillo de 340 rpm y un contenido de humedad del pienso del 15 % presentaba un índice de absorción de agua máximo (6,02 g/g) y una carga de rotura mínima (16 N). Por lo tanto, la temperatura del barril de 120 °C, la velocidad del tornillo de 340 rpm y el contenido de humedad de la alimentación del 15 % han resultado ser los parámetros operativos óptimos para el desarrollo de aperitivos a base de cereales y legumbres.

(Angelova et al., 2021), para obtener un producto instantáneo a partir de garbanzo evaluaron el efecto del contenido de humedad, la temperatura del barril, la velocidad del tornillo y la velocidad del tornillo de alimentación sobre el índice de expansión seccional (SEI) y la densidad aparente. El valor más bajo para el SEI fue 102 % (20 % de contenido de humedad, 150 °C de temperatura del barril, 190 rpm de velocidad del tornillo, y 65 rpm de velocidad del tornillo de alimentación) y el valor más alto fue 137 % (23 % de contenido de humedad, 160 °C de temperatura del barril, 170 rpm de velocidad del tornillo, y 50 rpm de velocidad del tornillo de alimentación). Los modelos de regresión para las respuestas investigadas fueron altamente significativos (según el valor P) con coeficientes satisfactorios de determinación (R²) 0,894 y 0,957. El estudio demostró que la expansión estaba influida por la humedad y la temperatura y que aumentaba con el incremento de la temperatura para contenidos de humedad del 20 % al 23 % y después disminuía

Guldiken et al. (2020) evaluaron el efecto de las condiciones de extrusión sobre las propiedades físicas de los extrudados de garbanzo:cebada (60:40) y la calidad proteica resultante de sus harinas a temperatura del barril (150-170 °C) y contenido de humedad (16-20 %). Como parámetros de respuesta se analizaron dureza, índice de expansión, densidad aparente y calidad proteínica. Se observó que la expansión era mayor a temperaturas más bajas y con mayor humedad para la mezcla 60:40 de garbanzos y cebada; la densidad aparente se reducía

con el aumento de la humedad; y la dureza aumentaba a temperaturas más altas y humedades más bajas. La calidad proteínica de las harinas resultantes era mayor con contenidos de humedad superiores a 16 %. También se examinaron la composición, la calidad proteica y los atributos funcionales de las harinas crudas y precocidas de garbanzo, cebada y su mezcla en el punto central del diseño RSM (18 % de humedad, 160 °C). La extrusión también dio lugar a una mejora de las capacidades de hidratación del agua y a una reducción de la viscosidad de las harinas precocidas individuales y mezcladas en relación con las crudas. La extrusión dio lugar a una mejora de la calidad proteínica de la harina de garbanzos y de la mezcla de garbanzos y cebada, pero no de la harina de cebada individual.

2.2. Cereales integrales y legumbres.

Los granos integrales de cereales deben consistir en carióspsides intactas, molidas, agrietadas o en copos, cuyos principales componentes anatómicos -el endospermo amiláceo, el germen y el salvado- estén presentes en las mismas proporciones relativas que en la carióspside intacta. Tanto los cereales integrales intactos como los componentes de los cereales integrales reconstituidos en proporciones relativas presentes de forma natural en el cereal pueden añadirse a los alimentos integrales (Yi et al., 2022).

Los cereales pertenecen a la familia de las gramíneas (*Gramineae*), que incluye el trigo, la cebada, la avena, el maíz, el arroz, el centeno, el mijo y el sorgo, entre otros. Proporcionan una fuente importante de energía, en forma de almidón, en la mayoría de las dietas y pueden consumirse como granos enteros o en su forma refinada (Bouchard et al., 2022). Sin embargo, en los últimos años, los estudios han demostrado que deben evitarse varios de estos cereales debido a que contienen gluten, como el trigo, la cebada, el centeno, la avena y los granos híbridos de estos cereales, causantes de la enfermedad celíaca (Possik et al., 2005). La sustitución del gluten representa un reto tecnológico importante, ya que es una proteína esencial para construir la estructura necesaria para formular productos a base de cereales, lo que influye en la demanda de productos sin gluten, que es paralela al aumento aparente o real de la enfermedad celíaca u otras reacciones alérgicas o intolerancias al gluten (Gallagher et al., 2004).

Las legumbres son granos comestibles de la familia de las leguminosas, entre las que se incluyen las judías, los guisantes, los garbanzos y las lentejas. Tienen un alto contenido en proteínas y fibra dietética y un bajo contenido en grasas. Son alternativas ricas en proteínas en comparación con los cereales, siendo una buena fuente de hidratos de carbono, fibras solubles, calcio, fósforo, potasio, magnesio, hierro y vitaminas del grupo B. El perfil de aminoácidos de las legumbres, es limitado en metionina, complementario al de los cereales,

limitado en lisina, por lo que el consumo combinado de estos granos aumenta la calidad de la proteína total de la dieta (Rico et al., 2021).

2.2.1. Arroz parbolizado integral

El arroz es uno de los cereales que se consume principalmente en forma de granos enteros, sin cáscara, en tres tipos de productos: pulido molido, vaporizado e integral (Vieira, 2004), en forma de harina y fermentado (Muchlisiyah et al., 2023). Entretanto, la Instrucción Normativa Brasileira (2009), menciona que el arroz beneficiado se comercializa en cuatro diferentes formas: integral, pulido, vaporizado integral y vaporizado (Tabla 1).

Tabla 1. Comercialización y descripción del arroz beneficiado.

Forma de comercialización	Descripción
Arroz integral	Producto del que sólo se ha eliminado la cáscara, quedando alrededor de un 10 % de salvado.
Arroz pulido	Producto sin germen y pericarpio.
Arroz parbolizado integral	Producto sometido al proceso de vaporizado y apenas descascarado.
Arroz parbolizado	Producto sometido al proceso de vaporizado, descascarado y pulido.

Fuente: Instrucción Normativa Brasileira Nº 6 (IN 6/2009)

El arroz integral está compuesto por una fina capa externa de salvado que envuelve el embrión y el endospermo. Sus componentes nutricionales existen principalmente en las capas de germen y salvado, que se eliminan principalmente mediante el pulido, presentando una calidad nutricional inferior a la del arroz integral (Mir et al., 2019).

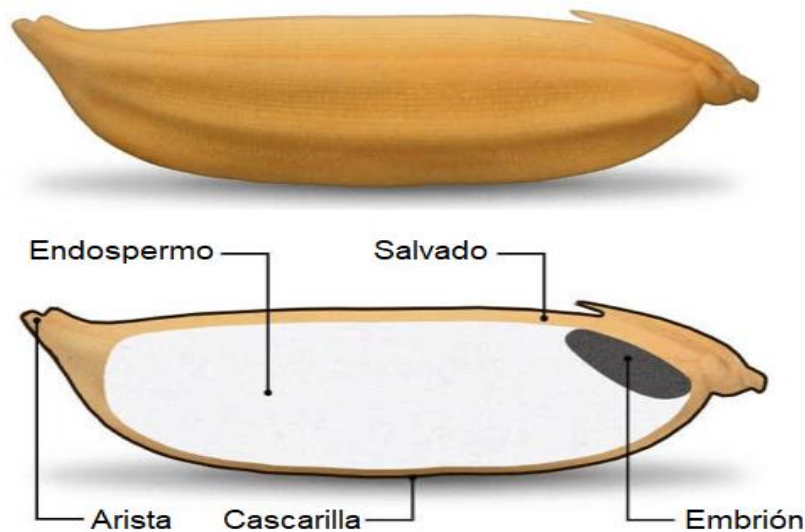


Figure 1. Estructura del grano de arroz.

Para la obtención de arroz parbolizado o vaporizado, los pasos básicos de producción son la hidratación del arroz, el tratamiento térmico para lograr la gelatinización completa y la deshidratación hasta un contenido de humedad adecuado para la molienda (Oli et al., 2014). El parbolizado del arroz se usa como una forma de minimizar la pérdida de grano y evitar la eliminación de compuestos de valor nutricional, aumentando el contenido de nutrientes y compuestos funcionales donde su valor justifica la expansión del mercado de este producto a lo largo de los últimos años (Carla Dors et al., 2011). El arroz integral contiene fibra dietética, vitaminas (2,1 - 4,5 $\mu\text{g/g}$ de VB1, 13 $\mu\text{g/g}$ de VE) y minerales (65 - 400 $\mu\text{g/g}$ de Ca, 7 - 54 $\mu\text{g/g}$ de Fe, 13 - 42 $\mu\text{g/g}$ de Mn), siendo el más nutritivo que el arroz blanco (Ding et al., 2023). Estudios demostraron que, al obtener las harinas de arroz integral, obtuvieron un mayor contenido total de fibra dietética (3,08 % - 3,68 %), absorción de aceite (116,0 % - 139,0 %), capacidad de emulsión (4,78 % - 9,52 %), estabilidad de emulsión (87,46 % - 99,93 %) y contenido de almidón resistente (6,80 % - 9,00 %) que las harinas de arroz pulido. Sin embargo, las harinas pulidas mostraron una mayor absorción de agua (102,0 %-122,0 %), capacidad espumante (8,00 % - 13,63 %) y amilosa aparente (19,16 % - 22,62 %) que las harinas integrales. Las harinas de arroz integral mostraron un mayor contenido fenólico total (4,40 - 6,40 mg GAE/g), inhibición de la peroxidación lipídica (19,50 % - 33,20 %) y actividad de barrido de radicales DPPH (85,45 %) (Qadir & Wani, 2023).

2.2.2. Mijo perla

El mijo comprende varias especies de cereales de pequeño tamaño. La especie, *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br., es una de ellas, se cultiva en Brasil como forraje, cobertura y cereal siendo la más plantada en el mundo conocida por soportar condiciones cálidas y secas, así como por producir granos nutritivos, que se incluyen en la dieta de varios países africanos y asiáticos (Dias-Martins et al., 2018). El mijo es una buena fuente de energía y proporciona proteínas, ácidos grasos, minerales, vitaminas, fibra dietética y polifenoles. Además, la proteína típica del mijo contiene gran cantidad de aminoácidos esenciales (Amadou et al., 2013). Los macronutrientes de estos granos tienen valores de proteína que van del 7 al 13 %, carbohidratos del 60 al 70 %, lípidos del 1,5 al 5 %, fibra (2 % - 7 %) y también micronutrientes como hierro, calcio, fósforo y magnesio, etc. (Kaur et al., 2023).

Los granos de mijo tienen un alto potencial como alimento para el ser humano, ya que no contiene gluten, tiene mayor contenido en fibra dietética que el arroz, pero

similar contenido en lípidos que el maíz y mayor contenido en aminoácidos esenciales como leucina, isoleucina y lisina, que otros cereales tradicionales como el trigo y el (Dias-Martins et al., 2018). Tiene un alto valor energético, con menor contenido en almidón, alto contenido en fibra (1,2 g/100 g, mayoritariamente insoluble), actividad α -amilasa entre 8 y 15 veces superior en comparación con el trigo, tiene bajo índice glucémico y no contiene gluten. La energía del mijo es superior a la del sorgo y casi igual a la del arroz integral porque el contenido en lípidos es generalmente más elevado (3 a 6 %) (Nambiar et al., 2011).

El grano de mijo se puede bruñir eliminando el salvado, que es rico en fibra y fitoquímicos, causando así pérdidas significativas, ya que es una buena fuente de antioxidantes como ácidos fenólicos y flavonoides (Amadou et al., 2013; Kaur et al., 2023). De esta forma, el mantenimiento del salvado tiene una interesante importancia nutricional. En cuanto a las posibilidades de uso del mijo, se puede moler en forma de harina, el grano puede ser decorticado, germinado, fermentado, cocido y procesado por extrusión termoplástica. A partir de esta última, se pueden obtener productos como harinas precocidas para diversos usos (gachas), galletas dulces y saladas listas para consumir, pasta e incluso bebidas probióticas no lácteas (Dias-Martins et al., 2018).

2.2.3. Frijol carioca

Existen miles de especies de leguminosas, de las cuales las más consumidas son las judías comunes (*Phaseolus vulgaris* L.), sobre todo en países como México y Brasil, donde las judías son la principal fuente de proteínas de la dieta humana (Broughton et al., 2003). El frijol carioca es un grano de color crema claro, con vetas marrones claras, siendo el más cultivado en Brasil y ligeramente similar a los frijoles pintos, excepto por las rayas en lugar de manchas en el tegumento y por el menor tamaño de los granos (Bento et al., 2022). Las alubias secas (a menudo denominadas legumbres y actualmente leguminosas) pueden aportar algunos de los beneficios para la salud asociados a las dietas basadas en plantas. Las alubias son ricas en varios micronutrientes importantes, como potasio, magnesio, folato, hierro y zinc; y son fuentes importantes de proteínas en las dietas vegetarianas. En particular, se encuentran entre los únicos alimentos vegetales que proporcionan cantidades significativas del aminoácido indispensable lisina. Las alubias secas de consumo habitual también son ricas en fibra total y soluble, y almidón resistente, que contribuyen a su bajo índice glucémico. También aportan grandes cantidades de polifenoles, muchos de los cuales son potentes antioxidantes (Messina et al., 2025), al igual que sus harinas (Nagai et al., 2022). Sin embargo, la actividad antiinflamatoria de la cáscara de frijol depende de su contenido fenólico y de su actividad

antioxidante, que se vieron significativamente afectados por el cultivar y el disolvente de extracción (Oomah et al., 2010).

En las harinas de este grano, las capacidades de absorción de agua y aceite se correlacionaron con los contenidos de fibra dietética total de las harinas, y se observaron actividades y estabilidades de emulsión adecuadas, correlacionadas positivamente con sus contenidos de proteína, convirtiéndose en ingredientes potenciales para el desarrollo de nuevos productos de valor agregado basados en sus características nutricionales, fisicoquímicas y funcionales (Nagai et al., 2022). Además de eso, por sus características funcionales y tecnológicas los frijoles pueden ser utilizados en sistemas alimentarios como sopas, panificación, productos extruidos como snacks y productos cárnicos (Alves et al., 2019; Boye et al., 2010).

2.2.4. Garbanzos

El garbanzo (*Cicer arietinum* L.) es una leguminosa que se cultiva principalmente en climas templados y semiáridos. Se caracteriza por contener un alto contenido de proteínas, grasas (lípidos), vitaminas, fibra y un menor contenido de hidratos de carbono que la harina de trigo, es nutricionalmente rica en importantes ácidos grasos insaturados, como el ácido linoleico y oleico, y puede utilizarse para desarrollar productos nutritivos con valor añadido (Kishor et al., 2017). Además, la composición química de la harina de garbanzo cruda mostró que los contenidos de proteínas, grasas y cenizas eran superiores a los registrados en la harina de trigo (Arab et al., 2010).

Los garbanzos, además de su valor nutricional, sus granos contienen varios compuestos fenólicos y flavonoides, que son de particular interés debido a su contribución al color de la semilla, características sensoriales y diversas propiedades biológicas. Los flavonoides son uno de los principales grupos de compuestos fenólicos que se encuentran en los granos de leguminosas (Singh et al., 2017).

La harina integral de garbanzo tendría un gran potencial en diversas aplicaciones alimentarias debido a sus propiedades funcionales. Los altos niveles de absorción de agua y aceite, la buena capacidad gelificante, la emulsificación y la formación de espuma deberían hacer que esta harina fuera útil en diversas formulaciones, como productos de panadería, sopas, productos lácteos, alimentos sin gluten y otros nuevos productos alimentarios (Ladjal Ettoumi & Mohamed, 2015). Además, la incorporación de ingredientes a base de garbanzo y arroz en formulaciones sin gluten permite obtener formulaciones funcionales

adecuadas para el desarrollo de productos innovadores sin gluten, como snacks, que pueden ser una alternativa interesante para las personas celíacas (Ciudad-Mulero et al., 2022).

2.3. Extrusión de cereales y legumbres

2.3.1. Proceso de extrusión

La cocción por extrusión es un proceso de alta temperatura y corta duración (HTST) (Awol et al., 2024), que inactiva las enzimas y reduce la contaminación microbiana (Choton et al., 2020). Considerada una tecnología versátil en la producción de diversos tipos de alimentos. Esta tecnología está siendo más popular en la industria mundial de transformación agroalimentaria, que emplea la mezcla, la formación, la texturización y la cocción para desarrollar nuevos productos alimentarios (Choton et al., 2020). Tecnología que las industrias de alimentos están usando para procesar y comercializar un gran número de productos de distinto tamaño, forma, textura y sabor (Alam et al., 2016).

La tecnología de cocción por extrusión ha dado lugar a la producción de una amplia variedad de productos como pasta, cereales para el desayuno, pan rallado, galletas, galletas saladas, picatostes, alimentos infantiles, aperitivos, productos de confitería, chicles, proteína vegetal texturizada (TVP), almidón modificado, alimentos para mascotas, sopas deshidratadas, mezclas de bebidas secas, etc. (Alam et al., 2016; Choton et al., 2020). Además, es una técnica útil para producir alimentos sin conservantes y aumentar la gama de productos a base de cereales integrales (Vargas-Solórzano, 2019).

2.3.2. Tipos de extrusoras

- **Extrusora de rosca simples:** La extrusora monorosca contiene un único tornillo giratorio en un barril metálico, normalmente con ranuras helicoidales o axiales en la superficie interior que transportan el material a la sección de transición, donde el canal del tornillo se hace menos profundo y el material se compacta (Fig. 1a) (Dalbhagat & Mishra, 2019). Las materias primas se alimentan a través de la tolva situada en la sección de alimentación y el tornillo giratorio transporta el material a la sección de transición. En la sección de transición, el canal del tornillo se vuelve menos profundo y el material se compacta, lo que provoca un aumento de la temperatura del material. El almidón se gelatiniza y el material se vuelve más cohesivo. Se sigue transportando a través de la sección de dosificación y se empuja a través de la abertura de la matriz (Choton et al., 2020). Las extrusoras formadoras mono tornillo se utilizan para fabricar pasta, carnes procesadas y rellenos. Las extrusoras mono tornillo de cocción, se utilizan para producir alimentos secos y semihúmedos para mascotas,

aperitivos expandidos, cereales para el desayuno, pudines, bases para sopas y bebidas, almidón gelatinizado y proteínas vegetales texturizadas (Tiwari & Jha, 2017).

- **Extrusora de dupla rosca:** Las extrusoras de doble tornillo son complejas y caras, pero tienen varias ventajas sobre las extrusoras de tornillo único. Los ingredientes se mezclan a fondo dentro del barril con dos tornillos antes de entrar en las otras zonas de la extrusora (Fig. 1b) (Dalbhagat & Mishra, 2019). Consiste en dos tornillos paralelos de igual longitud que giran dentro del mismo barril, generalmente la superficie interior del barril de las extrusoras de doble tornillo es lisa. Las extrusoras de doble tornillo se utilizan para extrusión de alta humedad, productos que incluyen mayores cantidades de componentes como fibras, grasas, etc. y productos más sofisticados. Dependiendo de la posición de los tornillos y de su dirección de rotación, son posibles cuatro tipos diferentes de configuraciones: (i) tornillos corrotantes entrelazados; (ii) tornillos corrotantes no entrelazados; (iii) tornillos contrarrotantes entrelazados; (iv) tornillos contrarrotantes no entrelazados (Choton et al., 2020). La extrusora de doble tornillo puede funcionar incluso con una humedad de alimentación muy baja y ofrece una mayor flexibilidad de operaciones para controlar las variables de tiempo, temperatura y velocidad del tornillo (Dalbhagat & Mishra, 2019). Las aplicaciones de la extrusora de doble tornillo incluyen la mayoría de los productos SSCE y recubrimientos de chocolate, caramelos, gomas, procesos de modificación enzimática, etc. (Tiwari & Jha, 2017).

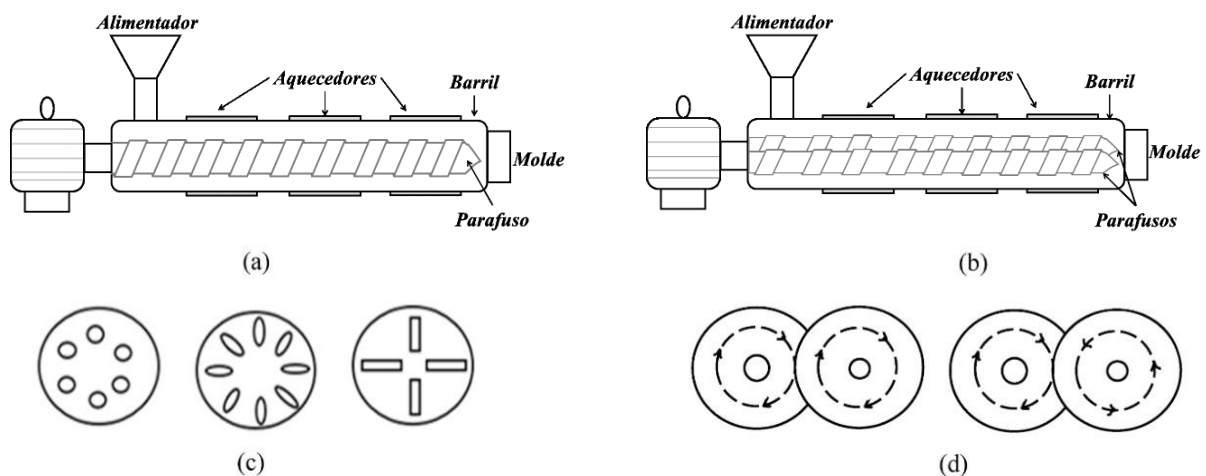


Figura 2. Tecnología de extrusión (a) Extrusora mono tornillo (b) Extrusora de doble tornillo (c) Tipos de aberturas de las matrices (d) Tornillo corrotante y contrarrotante. Adaptado de Dalbhagat and Mishra (2019).

2.3.3. Efecto de las condiciones de extrusión

El proceso de extrusión puede analizarse examinando los efectos de la modificación de parámetros independientes que influyen en un conjunto de parámetros

dependientes. Los parámetros del proceso (independientes) pueden ajustarse en función de las características deseadas del producto final. Estos parámetros pueden clasificarse como ajustables o variables. Los parámetros ajustables deben configurarse antes de poner en funcionamiento el equipo y están relacionados con el diseño del equipo, como la configuración del tornillo, la velocidad de rotación del tornillo, el diseño de la matriz (área y forma) y otros. Por otro lado, los parámetros variables pueden ser ajustados durante la operación del equipo, tales como el perfil de temperatura, el contenido de humedad, la velocidad del tornillo y otros (Pismag et al., 2023). Por otro lado, los parámetros del proceso primario de la extrusora, como temperatura del barril, humedad de la alimentación, velocidad de alimentación y velocidad del tornillo, determinan los parámetros del proceso secundario, como temperatura de la masa, presión de salida del material en la matriz, torque y energía mecánica específica (Dalbhagat & Mishra, 2019). El control adecuado de estos parámetros proporciona las características deseadas del producto extruido. Por otra parte, los estudios han llevado a una creciente concienciación sobre la importancia de las variables (velocidad del tornillo, velocidad de alimentación y geometría de la matriz) que controlan la historia mecánica y el tiempo de permanencia del material en el extrusor (Alam et al., 2016). Los efectos de los parámetros del proceso de extrusión (temperatura, velocidad del tornillo, velocidad de alimentación, configuración del tornillo, presión y par de la matriz) y las propiedades de la materia prima (por ejemplo, proporción de ingredientes, tamaño de partícula, contenido de humedad) en la calidad de los productos extruidos han sido estudiados por varios investigadores (Cotacallapa-Sucapuca et al., 2021). Aún no existe un modelo mecánico capaz de explicar completamente la influencia de las variables de extrusión y las propiedades del material sobre la expansión y la estructura celular final (Cotacallapa-Sucapuca et al., 2021).

2.4. Proceso de extrusión de harinas de cereales y legumbres

El procesamiento por extrusión termoplástica se ha utilizado anteriormente en mezclas de cereales y legumbres, como en el trabajo de Silva et al. (2014), que procesaron harinas mixtas de maíz desgerminado y habas de carioca descascarilladas (*Phaseolus vulgaris* L.) en una extrusora monotornillo de laboratorio. Se adoptó un diseño de rotación compuesta para evaluar el efecto de la velocidad de rotación del tornillo (318,9-392,9 rpm), la humedad del alimento (10,9-21,0 g/100 g) y el nivel de harina de frijol (4,8-55,2 g/100 g) sobre las variables de respuesta, energía mecánica específica (EME), índice de expansión seccional (SEI), índice de expansión longitudinal (LEI), índice de expansión volumétrica (VEI) y densidad aparente (D) textura instrumental. Las variables independientes tuvieron efectos

significativos sobre las propiedades físicas (SEI, VEI y densidad) de los extruidos, con excepción del EME y el LEI. El SEI aumentó con el incremento de la velocidad de rotación del tornillo, pero un mayor contenido de humedad y de harina de habas dio lugar a un menor SEI y VEI. Según el análisis de textura, algunos tratamientos con 30 y 45 g/100 g de harina de alubias no mostraron diferencias significativas en comparación con las marcas comerciales de aperitivos, lo que indica que la adición de alubias permitió obtener productos aireados y crujientes similares al producto comercial de maíz.

En otro estudio realizado con harina de judía procesada por extrusión, se consideraron los efectos de la humedad de la alimentación por extrusión (20; 27,5; 35 g/100 g), la velocidad de alimentación (2; 2,5; 3 kg/h) y la temperatura de la matriz (70, 100 y 130 °C) sobre algunas propiedades fisicoquímicas de dos variedades de judía (Fuji y Medalist). Los resultados mostraron diferentes grados de digestibilidad del carbohidrato, propiedades de la pasta y capacidades de retención de disolventes, que pueden obtenerse modulando las condiciones de extrusión, así como el tipo de alubia. Se llegó a la conclusión de que las harinas de alubias obtenidas por extrusión pueden utilizarse como nuevos ingredientes en formulaciones alimentarias, con ventajas tanto para los consumidores centrados en alimentos más sanos (por ejemplo, diabéticos, deportistas y niños) como para las industrias deseosas de valorizar sus productos (Cappa et al., 2020).

En cuanto al uso de garbanzos procesados por extrusión termoplástica, en el trabajo de Guldiken et al. (2020), estos autores los mezclaron con cebada en una proporción garbanzo:cebada (60:40) utilizando la metodología de superficie de respuesta (RSM). De esta forma, consideraron la temperatura de la última zona de calentamiento de la extrusora (150-170 °C) y el contenido de humedad (16-20 %) como variables independientes para generar un diseño compuesto central con dureza, índice de expansión, densidad aparente y calidad proteica como parámetros de respuesta. Comprobaron que la expansión era mayor a temperaturas más bajas y humedad más alta para la mezcla (60:40); la densidad aparente disminuía al aumentar la humedad; y la dureza aumentaba a temperaturas más altas y humedades más bajas. La calidad proteínica de las harinas era mayor con contenidos de humedad superiores al 16 %. La extrusión también mejoró la capacidad de hidratación del agua y redujo la viscosidad de las harinas precocidas individuales y mezcladas en comparación con las crudas. Además, la extrusión también mejoró la calidad proteínica del garbanzo y de las mezclas de garbanzo y cebada, pero no de las harinas individuales de cebada.

En el sistema de procesado por extrusión de cizallamiento moderado, utilizado en la producción de pasta de preparación rápida obtenida por extrusión termoplástica, a base de

garbanzos enteros, evaluando los factores de contenido de humedad, temperatura del barril, velocidad del tornillo y caudal de alimentación (controlado por la velocidad de rotación del tornillo de alimentación), en términos de índice de expansión seccional (SEI) y densidad aparente. El valor más bajo del SEI fue del 102 % (humedad del 20 %, temperatura en la última zona de calentamiento a 150°C, velocidad del tornillo de 190 rpm y velocidad del tornillo de alimentación de 65 rpm) y el más alto fue del 137 % (humedad del 23 %, temperatura de la barrica de 160°C, velocidad del tornillo de 170 rpm y velocidad del tornillo de alimentación de 50 rpm). Se demostró que la expansión estaba influida por la humedad y la temperatura, y aumentaba con el incremento de la temperatura para el contenido de humedad del 20 al 23 %, y disminuía a partir de entonces. La densidad aparente disminuyó con el aumento de la humedad del pienso y de la temperatura del extrusor, oscilando entre 79 y 116 kg/m³ para ambas muestras. Los extrudados resultantes tras la molienda pueden utilizarse con éxito para preparar productos instantáneos como la pasta, con buenas características como la densidad aparente y el índice de expansión seccional (Angelova et al., 2021).

2.5. Harinas integrales precocidas sin gluten extrudados usadas en alimentos

En los últimos años ha aumentado el desarrollo de nuevos productos alimentarios obtenidos mediante el procesamiento por extrusión termoplástica, que aplica simultáneamente calor y cizallamiento mecánico. La extrusión se utiliza en la industria alimentaria para producir una gran variedad de productos alimenticios, como alimentos listos para el consumo (por ejemplo, aperitivos), entre otros.

Pessanha et al. (2021) desarrollaron un pan integral utilizando mezclas de harina de mijo perla cruda y extruida, donde evaluaron los parámetros fisicoquímicos en comparación con productos comerciales de pan integral con y sin gluten, presentando este grano en su forma integral como un alimento potencialmente interesante para la producción de panes a ser considerados en la dieta de la población brasileña, en particular para aquellos que sufren de alergia al gluten y diabetes.

En la actualidad, el proceso de extrusión se utiliza para obtener harinas destinadas a sistemas de recubrimiento en alimentos, como los productos fritos empanados, que se consumen ampliamente en todo el mundo. Por ejemplo, se utilizó la extrusión para procesar harina extruida para empanado en dos combinaciones de harina diferentes: la primera estaba compuesta por harina de trigo (Maida, que es una harina blanca utilizada en la India), harina de arroz y judías negras (*Vigna mungo* L.) (7:2:1) y la segunda (8:1:1) respectivamente, en las que el extruido obtenido se molió y tamizó para obtener una harina de tamaño de partícula uniforme.

La harina precocida se utilizó para rebozar pasteles de pescado, tanto en forma de harina extruida como de harina de pan convencional. Los autores comprobaron que las harinas extruidas mostraban resultados comparables a los de las harinas panificables convencionales (Kamalakanth et al., 2013). Otro estudio sobre la producción de productos empanados a base de garbanzos con la adición de harina de linaza evaluó las características microbiológicas, sensoriales y nutricionales. Se desarrollaron una Formulación Estándar (PF), a base de harina de trigo refinada, y una Formulación Experimental (FE), a base de harina de garbanzo y linaza. El uso de la FE dio lugar a niveles más bajos de lípidos totales y saturados, sodio y valor energético, y más altos de proteínas en comparación con la FP, y con 5,6 g de fibra dietética. En conclusión, la mezcla de garbanzos y linaza resultó viable para la elaboración de masa de empanada con valores sensoriales, nutricionales y funcionales añadidos y potencial de mercado (Sousa et al., 2021).

En la producción de pasta fusilli, que se obtuvieron a partir de mezclas de harinas integrales de mijo perla crudas y precocidas por extrusión termoplástica en proporción 1:1, obtuvieron una aceptación global del 66 %, con buenos resultados en cuanto a textura, proteínas, lípidos y fibra. Los autores pudieron concluir que el uso de harina integral precocida de mijo perla por extrusión termoplástica podría ser una alternativa en la elaboración de productos sin gluten con mejores propiedades funcionales (Pessanha et al., 2023). Del mismo modo, en otro estudio, al elaborar pan integral utilizando harina de mijo perla cruda y extrusionada, encontraron que el proceso de extrusión condujo a un aumento de la capacidad antioxidante ($215,2 \pm 1,9 \mu\text{M Trolox/g}$) y de la inhibición enzimática ($96,31 \pm 0,005$) en comparación con el producto elaborado con harina de mijo perla cruda (Pessanha et al., 2021).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

La ejecución de la presente tesis se realizó en la planta IV de investigación y desarrollo de granos, cereales y leguminosas de la Empresa EMBRAPA – AGROINDUSTRIA DE ALIMENTOS que se encuentra ubicada en la Av. Las Américas, 29501 – Guaratiba, Rio de Janeiro, Brasil.



Figure 3. Ubicación y localización del lugar de ejecución.

EMBRAPA - Agroindustria de Alimentos, es un centro temático de la Empresa Brasileña de Investigación Agropecuaria (Embrapa), que trabaja en investigación, desarrollo e innovación agroindustrial de alimentos. Buscando diversificar el uso, mejorar el aprovechamiento de las materias primas agrícolas, así como desarrollar técnicas de procesamiento que permitan ampliar su período de consumo y/o comercialización para garantizar la seguridad y calidad de los productos. También como parte de los objetivos de la empresa es desarrollar tecnologías y transferirlas para añadir valor agregado a los productos, haciendo que el sector agroindustrial sea más competitivo y sostenible.

3.2. Materiales

3.2.1. Materia prima

Los frijoles cariocas (*Phaseolus vulgaris* L.) y los garbanzos (*Cicer arietinum* L.) fueron adquiridos en el comercio local de la ciudad de Campo Grande, Rio de Janeiro, Brasil. En el caso del arroz integral (*Oryza sativa* L.) fue donado por la empresa Granfino y el mijo (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) por la empresa Attosementes.

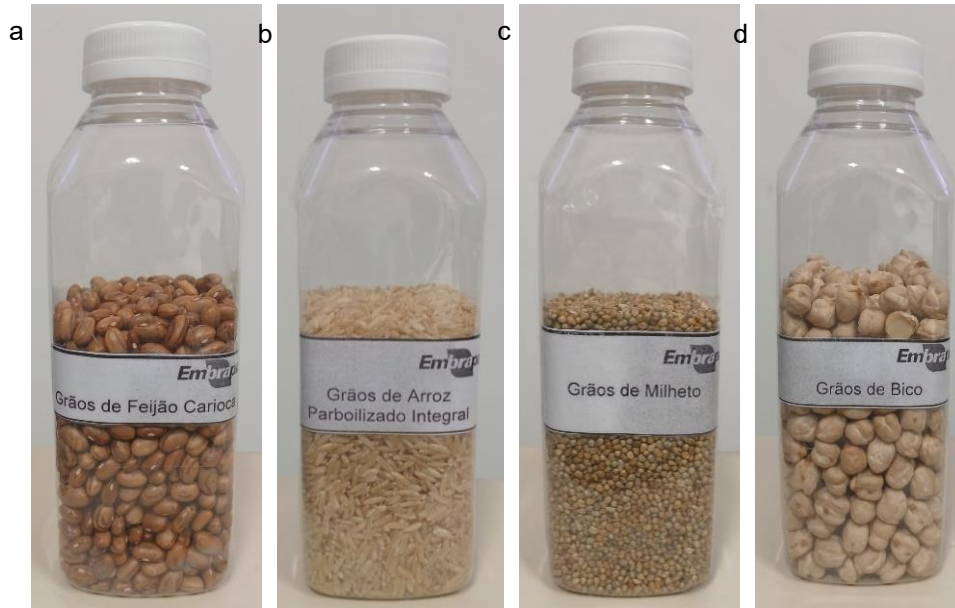


Figure 4. Cereales integrales y legumbres usadas en el presente trabajo, frijol carioca (a), arroz parbolizado (b), mijo perla (c) y garbanzo (d)

3.3. Metodología experimental

3.3.1. Preparación de las harinas crudas

Los granos enteros de arroz, mijo, frijol y garbanzos se molieron por separado utilizando un molino de discos (MD) LM3600 (Perten Instruments AB; Huddinge, Suecia) con apertura ligera N°6 entre discos y, a continuación, con un molino de martillos (MM) LM3100 (Perten Instruments AB, Huddinge, Suecia) equipado con un tamiz de 0,8 mm de apertura para conseguir un tamaño de partícula deseable. Posteriormente se envasarán en recipientes de polietileno y se almacenarán a temperatura ambiente en un lugar fresco y ventilado hasta el proceso de extrusión.

3.3.2. Determinación y ajuste del contenido de humedad

En primer lugar, se determinó la humedad inicial de la materia prima para ajustar el contenido de agua a añadir en cada una de las muestras. Se utilizó el método de secado en estufa a 105 °C (AOAC, 2000).

Los ajustes se realizaron mediante cálculos para la correcta adición de agua en cada parámetro de extrusión establecido según el diseño experimental para cada harina. La cantidad de agua a añadir se calculó mediante la ecuación (2) según:

$$Wa = \frac{((U_f - U_i) * Pa)}{100 - U_f} \quad (2)$$

Donde: Wa es la cantidad de agua a añadir (mL); U_f es la humedad final de la muestra (%); U_i es la humedad inicial de la muestra (%); Pa es el peso de la muestra (g).

Tabla 2. Determinación del flujo de agua para ajuste del contenido de humedad.

Tratamiento	Muestra	Humedad del sólido (%)	Flujo de agua (kg/h)	Humedad del proceso (%)
T1	M1C1	12,10	2,6	30,02
T2	M1C2	12,10	0,7	18,00
T3	M2C1	11,36	2,7	30,04
T4	M2C2	11,36	0,8	18,00
T5	M3C1	11,55	2,6	30,02
T6	M3C2	11,55	0,8	18,03
T7	M4C1	11,88	2,6	30,01
T8	M4C2	11,88	0,8	18,03

C1: 300 rpm y 30 % de humedad; C2: 600 rpm 18 % de humedad; M1, M2, M3 y M4: Formulaciones de harinas mezcladas crudas.

3.3.3. Proceso de extrusión de las harinas

Las harinas se procesaron en una extrusora de doble tornillo Evolum EV25 (Clextal, Firminy, Francia), con un diámetro de tornillo de 25 mm, una relación longitud:diámetro de 40:1 y diez zonas de calentamiento (de la alimentación a la matriz), funcionando a una velocidad de rotación del tornillo de 300 y 600 rpm (dos niveles de respuesta). La velocidad de alimentación de la harina fue controlada mediante un alimentador de doble tornillo modelo GRMD15 (Schenck Process, Darmstadt, Alemania) a 10 kg/h y el proceso se supervisó mediante el software Easy Serve de Schenck Process (Schenck Process, Darmstadt, Alemania). El agua fue adicionada mediante un sistema de inyección, ajustando el caudal de agua (L/h) (según el diseño), entre la primera y la segunda zona de la extrusora a través de una compuerta de 5,25 mm de diámetro interno mediante una bomba dosificadora de pistón Super K PP 6.35 (DKM Clextal Inc., Firminy, Francia) para alcanzar las humedades definidas en el diseño experimental. Para la salida del extruido se utilizó una matriz circular de

6 mm de un solo orificio, seguida de un cabezal de corte de cuatro cuchillas (Vargas-Solorzano et al., 2015).

Al final del procesado, las muestras de extrudados fueron secadas a 50 °C durante aproximadamente 24 h en estufa con circulación de aire, molidas y almacenadas en envases de polietileno, en cámara fría (5 ± 2 °C) hasta el momento de las determinaciones analíticas.

Torque y energía mecánica específica (EME)

Las variables de extrusión, como el torque del motor, la energía mecánica específica (EME), la presión de la boquilla, la velocidad del tornillo, la velocidad de alimentación del agua y la temperatura del módulo, se registraron en un ordenador utilizando el programa informático FITSYS Plus (Clextral Inc., Firminy, Francia). Los datos que se registraron después del proceso de extrusión se recopilaron para obtener una variación mínima del torque y de la EME.

3.3.4. Obtención de la harina extruida

Las muestras extruidas secas fueron molidas en dos etapas: como primera etapa, en un molino de discos (MD) LM3600 (Perten Instruments AB; Huddinge, Suecia) con luz de separación nº 3 entre discos (Ver imagen 6a) y, a continuación, un molino de martillos (MM) LM3100 (Perten Instruments AB, Huddinge, Suecia) equipado con un tamiz de 0,8 mm de abertura, con el fin de alcanzar un tamaño de partícula deseable (Ver imagen 6b). Posterior a la molienda se colocó en bolsas de polietileno para ser almacenados en refrigeración para los posteriores análisis.

3.3.5. Evaluación de las propiedades físicas de las harinas mezcladas

- **Distribución del tamaño de las partículas**

El tamaño de las partículas se determinó utilizando un equipo láser MICROTRAC S3500 (Microtrac Inc., Montgomery Ville, EE.UU.), mediante la técnica de dispersión de la luz. El análisis se realizó por duplicado y en tres ciclos de lectura, utilizando alcohol isopropílico como fluido dispersante (índice de refracción 1,376). La muestra se dispersó en alcohol y se introdujo inmediatamente en el equipo. Para la partícula, se adoptó un índice de refracción de 1,50. Además, se generaron curvas de distribución granulométrica basadas en el acumulado del porcentaje de la muestra, se calcularon los diámetros de las partículas (en μm) correspondientes a los percentiles 10 %, 50 % y 90 % más finos (D10, D50

y D90, respectivamente), y span (Ecuación 1), estos cálculos se utilizaron para caracterizar la granulometría de la harina integral mezclada (DODDS, 2013).

$$Span = \frac{D_{90}-D_{10}}{D_{50}} \quad (1)$$

$D_{[4,3]}$, es el diámetro medio del volumen y $D_{[3,2]}$ es la media de la superficie. Se calcularon según (2) y (3), respectivamente.

$$D_{[4,3]} = \frac{\sum_1^n D_{iV_i}^4}{\sum_1^n D_{iV_i}^3} \dots \quad (2)$$

$$D_{[3,2]} = \frac{\sum_1^n D_{iV_i}^3}{\sum_1^n D_{iV_i}^2} \dots \quad (3)$$

v_i and D_i son la masa de la clase (en %) y el tamaño medio de la clase (en μm), respectivamente.

- **Densidad aparente**

La densidad aparente de partículas (DA) se determinó por cuadruplicado según Vargas-Solórzano et al. (2020), como la masa de muestra no compactada, vertida libremente en una probeta graduada con el nivel superior a 50 cm^3 . El lecho de partículas se obtuvo colocando la probeta graduada bajo la salida de un alimentador volumétrico de un solo tornillo (Brabender, Duisburg, Alemania) y dejando caer 50 g de muestra a una velocidad de 4 kg/h. La velocidad de alimentación (kg/h) se calculó interpolando curvas de velocidad de rotación (rpm) en función de la masa de partículas, recogidas en 1 min.

- **Color**

Los parámetros de color de la superficie se determinarán tomando tres puntos de lectura diferentes por muestra en cápsulas de plástico utilizadas para la determinación de aw. Se utilizará el colorímetro Color Quest XE (Hunterlab, Reston, EE.UU.) con esfera de integración y ángulo de visión de 45° , iluminación d/45 e iluminante D65. Los valores de luminosidad (L^*), componente rojo-verde (a^*) y componente amarillo-azul (b^*) se expresarán en el sistema de color CIELAB.

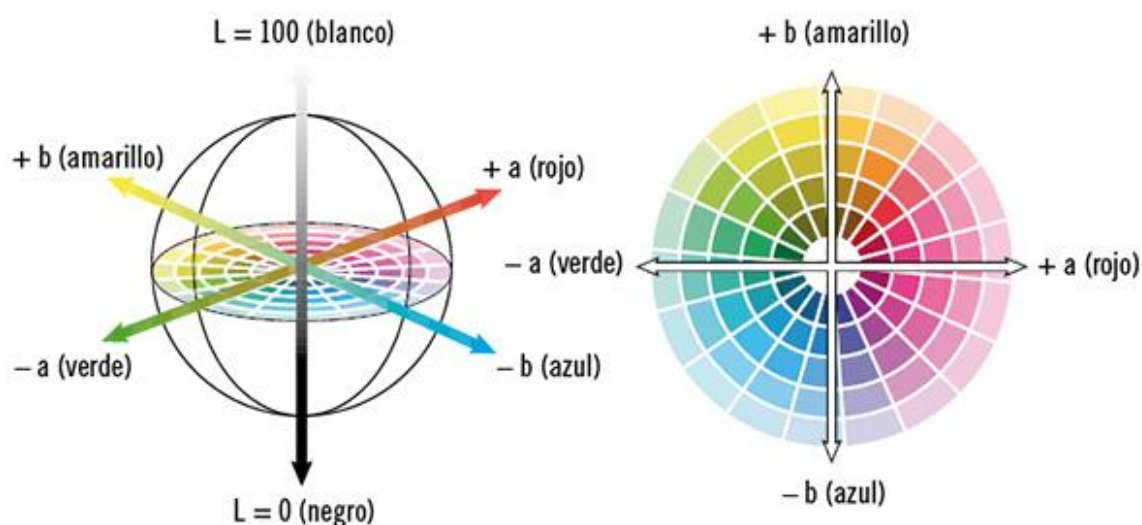


Figure 5. Sistema de color CIELAB.

3.3.6. Evaluación de las propiedades tecno-funcionales de las harinas mezcladas

Índice de absorción de agua (IAA) e índice de solubilidad en agua (ISA)

Los extruidos se molieron utilizando un DM seguido de un molino de martillos (HM) LM3100 (Pertin Instruments AB, Huddinge, Suecia) dotado de una abertura de tamiz de 0,8 mm y luego se tamizaron para obtener partículas de un tamaño comprendido entre 106 y 212 μm (Anexo 1), que se utilizaron para determinar el índice de absorción de agua (IAA) y el índice de solubilidad en agua (ISA), de acuerdo con la metodología descrita por Anderson et al. (1969) con modificaciones. El procedimiento seguido consistió en pesar $1 \pm 0,0005$ g de muestra en un tubo de ensayo, añadir 5 mL de agua desionizada, mezclar durante 20 s en un agitador de vórtice y, a continuación, añadir otros 5 mL de agua desionizada para lavar cualquier partícula adherida a la pared del tubo. Después, la mezcla se mantuvo a $25 \pm 0,5$ °C durante 30 min para permitir la hidratación completa. El gel formado se centrifugó a 9000 rpm ($9961 \times g$) a 25 °C durante 15 min en una centrifugadora Universal 320R (Hettich, Tuttingen, Alemania).

El sobrenadante se vertió cuidadosamente en una placa de evaporación tarada y se secó en una estufa de circulación de aire (WTB Binder, Tuttlinger, Alemania) a 105°C durante 4 h para la medición de sólidos solubles totales. El tubo con gel restante se secó superficialmente con pañuelos faciales y se pesó. Los análisis de ISA y IAA se realizaron por triplicado y se calcularon mediante las ecuaciones (4) y (5), que fueron modificados por Doğan and Karwe (2003).

$$\text{ISA} = (\text{g de materia soluble en agua}) / (\text{g de muestra seca}) \quad (4)$$

$$\text{IAA} = (\text{g de agua absorbida}) / (\text{g de muestra seca} \times (1 - \text{fracción soluble})) \quad (5)$$

Índice de absorción de aceite (IAO)

En el índice de absorción de aceite, el procedimiento seguido según AHN; KIM; NG, (2005), consistió en pesar $0,5 \pm 0,0005$ g de muestra en un tubo de centrifuga de 25ml, añadir 5 mL de aceite vegetal de soja, mezclar durante 20 s en un agitador de vórtice y dejar reposar durante 30 min, para permitir la absorción completa. El gel formado se centrifugó a 9000 rpm ($9961 \times g$) a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 15 min en una centrífuga Universal 320R (Hettich, Tuttingen, Alemania). Los OAI se calcularon mediante las ecuaciones (6).

$$\text{IAO} = (\text{g aceite absorbido}) / (\text{g muestra seca} \times (1 - \text{fracción soluble})) \quad (6)$$

3.3.7. Evaluación de las propiedades reológicas de las harinas mezcladas

Los extruidos se molieron utilizando un DM seguido de un HM provisto de una abertura de tamiz de 0,8 mm y, a continuación, se tamizaron para obtener partículas de un tamaño comprendido entre 106 y 212 μm , que se utilizaron para determinar la viscosidad de la pasta. Se utilizó un Rapid Visco Analyzer serie 4 RVA (Newport Scientific Pty Ltd., Warriewood, Australia) para medir la viscosidad de la pasta de la NEF y EF de acuerdo con la metodología reportada por Comettant-Rabanal et al. (2023). Se colocaron tres gramos de las muestras acondicionadas con ajuste a 14 % de humedad (base húmeda) junto con 25 mL de agua destilada en el portamuestras (vaso de aluminio) del equipo. Las condiciones de ensayo fueron: mezclado a 160 rpm a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 2 min, calentamiento hasta $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ a una velocidad constante de $14\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ y se mantuvo durante 3 y luego se enfrió a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ en 5 min a la misma velocidad, con un tiempo total de 20 min.

Las lecturas de las propiedades reológicas de la pasta medidas fueron la temperatura de pasta (P_{Tem} , cP), la viscosidad en frío al inicio a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (CV , cP), la viscosidad pico (PV , cP), la viscosidad de valle o fuerza de mantenimiento (TV , cP), la viscosidad de ruptura ($BV = PV - TV$, cP), la viscosidad final (FV , cP) y la viscosidad de retrogradación ($SBV = FV - TV$, cP). Las mediciones se realizaron por duplicado.

3.4. Diseño experimental

Para evaluar el efecto de los factores (formulación y condiciones de extrusión) sobre las características de las harinas extruidas, se usó un diseño completamente aleatorizado con arreglo factorial 4×2 , según el modelo lineal aditivo de la ecuación 1.

$$Y_{ij} = \mu \dots + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ij} \quad (1)$$

Donde:

$i = 1, 2, 3$ y 4 niveles del factor formulaciones de harina (M1, M2, M3 y M4)

$j = 1, 2, 3$ niveles del factor condiciones de extrusión (Sin extruir, Condición 1, Condición 2).

μ = Media global.

α_i = Efecto de la i -ésima formulación.

β_j = Efecto de las j -ésimas condiciones de extrusión.

$(\alpha\beta)_{ij}$ = Efecto de interacción de la i -ésima formulación con la j -ésima condición de extrusión.

ϵ_{ij} = Error experimental

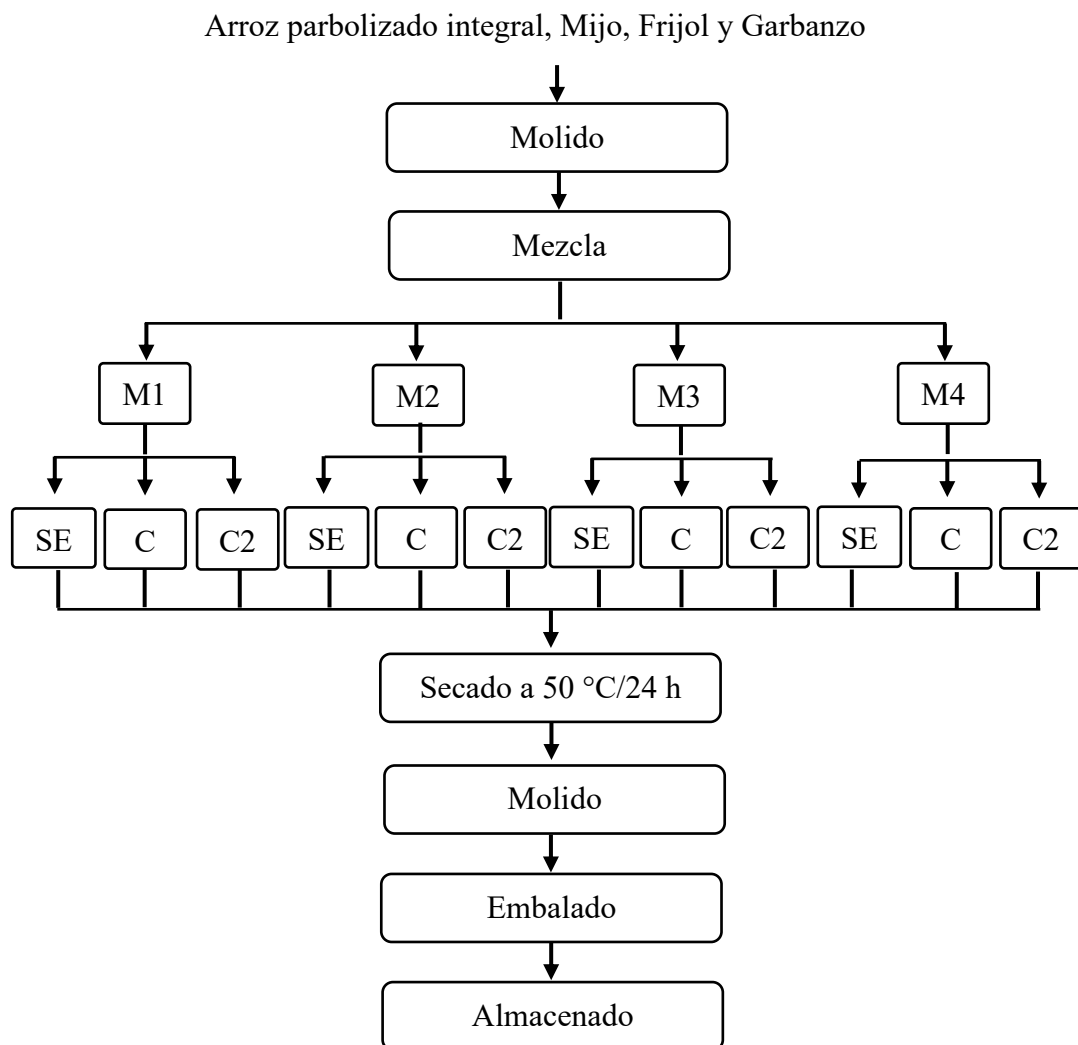


Figure 6. Esquema de la obtención de la harina integral extruida. **M1:** 60/15/10/15, **M2:** 15/60/10/15, **M3:** 15/15/10/60 y **M4:** 30/30/10/30 (Formulaciones con porcentaje de la mezcla de arroz/mijo/Frijol/garbanzo). **SE:** Sin extrusión, **C1:** velocidad de tornillo (300 Rpm) y Humedad (30 %) y **C2:** Velocidad de tornillo (600 Rpm) y Humedad (18 %).

3.5. Análisis estadístico

Todas las mediciones se realizaron por triplicado para cada una de las muestras (tres veces) para ambas etapas. Se calcularon la media y la desviación estándar (DE) de las medias. Los datos se analizaron mediante análisis unidireccional de la varianza (ANOVA) utilizando el software R versión 15.0 para Windows. Todos los valores se presentaron como medias de triplicados \pm DE y se compararon mediante pruebas de escala múltiple TUKEY. Se utilizará un nivel $p < 0,05$ para indicar diferencias.

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. Efecto de las condiciones de extrusión en las variables del sistema del proceso

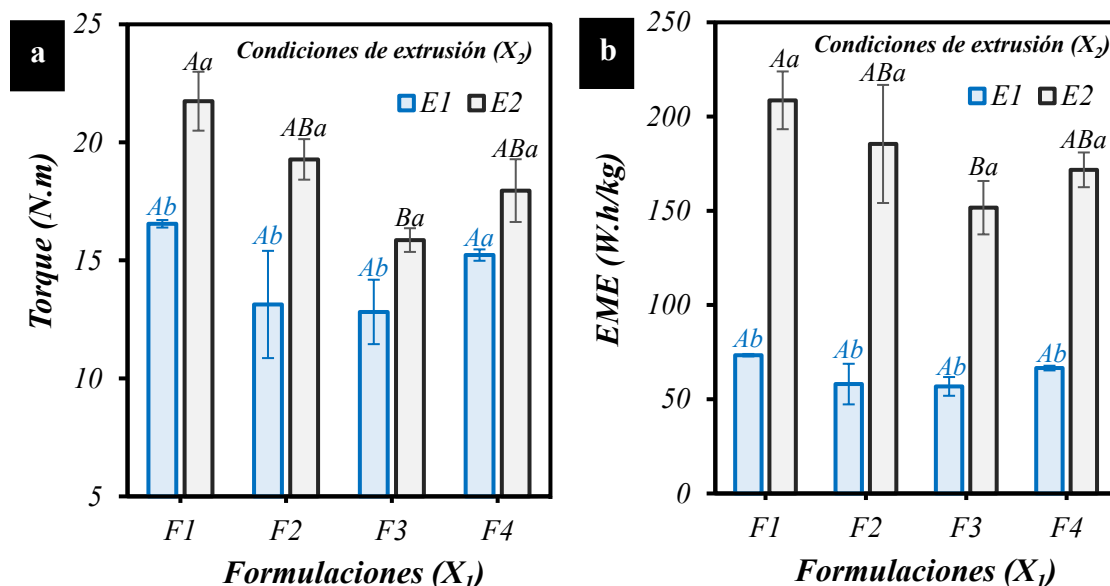
4.1.1. Torque

Durante el proceso de extrusión, con la influencia de los parámetros utilizados en las dos condiciones: C1:(velocidad de tornillo, 300 Rpm y Humedad 30 %) y C2:(Velocidad de tornillo, 600 Rpm y Humedad 18 %), se han encontrado diferencias en los valores de torque ($p < 0,05$). El torque de extrusión es definido como la medida del trabajo a realizar para mover el material de alimentación a través del cilindro y la matriz (Dalbhagat et al., 2019; Yadav et al., 2022). Los valores del torque encontrados con la influencia de la C1 variaron de 12,82 a 16,55 N.m y con la C2 variaron de 15,86 a 21,74 N.m (Fig. 7a). Se observó que, con la influencia de C2 (18 % FM y 600 rpm SS), los valores de par fueron superiores, con respecto a C1 (30 % FM y 300 rpm SS). Por lo tanto, una baja FM y un aumento de SS aumentan el torque, mientras que, con el aumento de FM y baja SS, disminuye. La reducción podría estar asociada con el aumento de la gelatinización del almidón disminuyendo la viscosidad de la masa reduciendo el torque (Kharat et al., 2019; Yadav et al., 2022), y mientras que Jain & Goomer (2023), observaron, que el torque aumentaba con el uso de altas temperaturas y aumento de SS (más de 200 rpm). Además, se observó que los valores de torque aumentaban con un mayor contenido de cereal en la formulación, mientras que con un mayor contenido de legumbres los valores disminuían, en las dos condiciones utilizadas. En otras palabras, la composición de la materia prima tiene un efecto significativo sobre la presión y el torque de la matriz (Yadav et al., 2022). Un bajo contenido de amilosa como el arroz produjo altos valores de torque debido a que el material se vuelve pegajoso, mientras que un alto contenido de amilosa disminuye sus valores (Dalbhagat & Mishra, 2019). Estos valores también podrían verse afectados negativamente en la extrusión de alimentos con alto contenido en lípidos (más del 5-6 %) que dificultan el proceso de extrusión al reducir su deslizamiento dentro del cilindro, disminuyendo así el par de torsión (Dalbhagat et al., 2019; Yadav et al., 2022).

4.1.2. Energía mecánica específica (EME)

La EME está relacionada con la viscosidad de la masa fundida, que afecta directamente a la resistencia al trabajo realizado por los tornillos sobre el material de alimentación (Vargas-Solórzano et al., 2014). Los valores de EME oscilaron entre 56,81 y 73,37 W.h/kg bajo la influencia de C1, y entre 151,64 y 208,6 W.h/kg para C2 (Fig. 7b). Se observa a partir de estos valores que los parámetros utilizados en C1 de alta humedad y baja velocidad

de tornillo obtuvieron valores inferiores a los de C2 con parámetros de baja humedad y alta velocidad de tornillo. Kharat et al. (2019), observaron que con un aumento de la humedad y la temperatura provocó una disminución del EME coincidiendo con Singh and Koksel (2021), mientras que con el uso de mayor velocidad de tornillo y temperatura aumentó el EME coincidiendo con Ali et al. (2017). Además, se encontró el mismo comportamiento observado en los valores de torque, es decir, la EME aumentó con mayor contenido de cereal en la formulación, mientras que con mayor contenido de pulso los valores disminuyeron, en las dos condiciones utilizadas. Entonces podría estar asociado al contenido de almidón en la formulación, ya que la EME es un descriptor cuantitativo de las transformaciones e interacciones moleculares como la conversión del almidón y consecuentemente de las propiedades reológicas de la masa fundida (Carvalho et al., 2010; Oliveira et al., 2017). Mientras que la presencia de un mayor contenido de proteína en M3 (70 % de legumbre), podría haber influido en la reducción de la EME, como se ha demostrado en otros estudios que con la adición de proteína de pescado a los alimentos ricos en almidón como el arroz y un concentrado de proteína (5 - 20 %) en productos extruidos reduce la EME (Alam et al., 2016). También debido a la presencia de partículas finas en la formulación que se calentarían más rápido, alcanzando una temperatura de transición de fusión más rápido que las partículas gruesas, dando una viscosidad más baja y por lo tanto reduciendo el EME (Carvalho et al., 2010).



C1: condición suave; C2: condición severa; M1: Arroz parbolizado integral (60), mijo perla (15), garbanzo (15), judías cariocas (10); M2: Arroz parbolizado integral (15), mijo perla (60), garbanzo (15), judías cariocas (10); M3: Arroz parbolizado integral (15), mijo perla (15), garbanzo (60), judías cariocas (10); M4: Arroz parbolizado integral (30), mijo perla (30), garbanzo (30), judías cariocas (10).

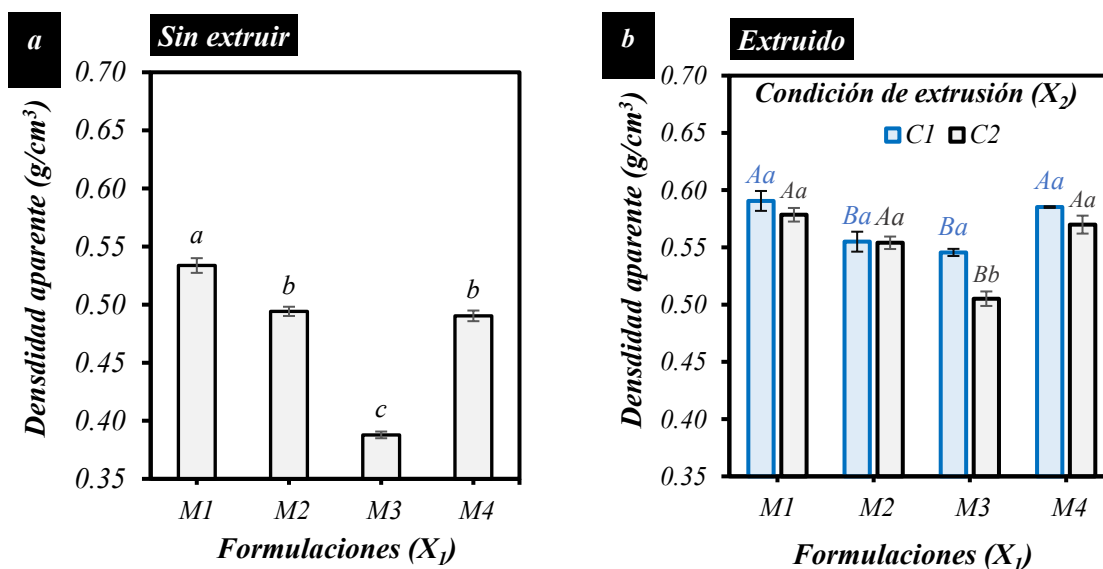
Figura 7. Efecto de las condiciones de extrusión en el torque (a) y la EME (b) en la obtención de harinas precocidas integrales.

4.2. Propiedades físicas de las harinas

4.2.1. Densidad aparente (DA)

Los valores de densidad aparente (DA) variaron de 0,39 a 0,53 g/cm³ para las formulaciones de harinas integrales sin extruir (HC), donde M1 compuesta con mayor contenido de arroz parbolizado de las HC tuvo mayor DA, seguido de la M2 y M4 que presentaron valores similares de DA, mientras que el menor DA de todos se observó en la M3 compuesta por un porcentaje mayor de garbanzo (Figura 8a). La variación de la DA puede atribuirse a las diferencias en el contenido de almidón de las harinas, como lo determinado por Anberbir et al. (2024), en harinas compuestas por teff, mijo perla y trigo sarraceno, así mismo Lagnika et al. (2019), menciona que la DA esta influenciada por el tamaño de partícula y la estructura de los polímeros de almidón. Estos HC pasaron por un proceso de extrusión y molienda del producto extruido para obtener harina mezclada extruida (HE), que presentó valores más altos de DA (Figura 8b). El aumento de la DA puede estar influenciado por las condiciones o parámetros utilizados durante el proceso de extrusión, así como por la composición química de los piensos utilizados, como los de alto contenido en fibra y proteína (Boakye et al., 2023; Pasqualone et al., 2020), que pueden interferir en la elasticidad de la masa y en la gelatinización del almidón (Duguma et al., 2021). Se observó en las HE debido a la influencia de la primera condición (C1), valores similares de DA para M1 y M4, así como para M2 y M3. Del mismo modo, evaluando el efecto de la segunda condición (C2), se encontraron valores de DA similares más altos entre los tratamientos M1, M2 y M4, mientras que se encontró un valor de DA más bajo para M3. Con la influencia de las condiciones de extrusión utilizadas, se observó que, con el aumento de la humedad del alimento, baja velocidad del tornillo y temperatura a 130 °C, la DA aumentó, mientras que, con la disminución de la humedad, aumento de la velocidad del tornillo y temperatura, disminuye, coincidiendo con lo mencionado por Ali et al. (2017). Entretanto, Jabeen et al. (2021) observaron que la composición del alimento y la humedad tienen efecto positivo en la DA, y la velocidad del tornillo y la temperatura del barril tienen efecto negativo. Como lo menciona Awol et al. (2024), que observaron una DA comparativamente alto de 0,58 g/cc para muestras con 17,6 % de soya, velocidad del tornillo de 130 rpm, humedad de alimentación de 11 % y temperatura do barril de 130 °C, mientras que el mínimo fue de 0,20 g/cc para condiciones de extrusión con 5 % soya, velocidad del tornillo de 130 rpm, humedad de alimentación de 10 % y temperatura del barril de 135 °C. Además, Altaf et al. (2021) mencionaron que el mayor contenido de humedad reduce la elasticidad de la masa mediante la plastificación de la masa fundida, lo que reduce la gelatinización y disminuye la expansión, es decir aumenta la DA. Asimismo, Silva et al. (2014)

encontraron que la humedad fue la variable que más influyó en los valores de la densidad con efecto positivo, seguido del contenido del grano y su interacción. Por lo tanto, una mayor composición y humedad de alimentación en el proceso aumentan la DA, mientras que una mayor velocidad del tornillo y temperatura del barril reducen la DA (Jabeen et al., 2021)



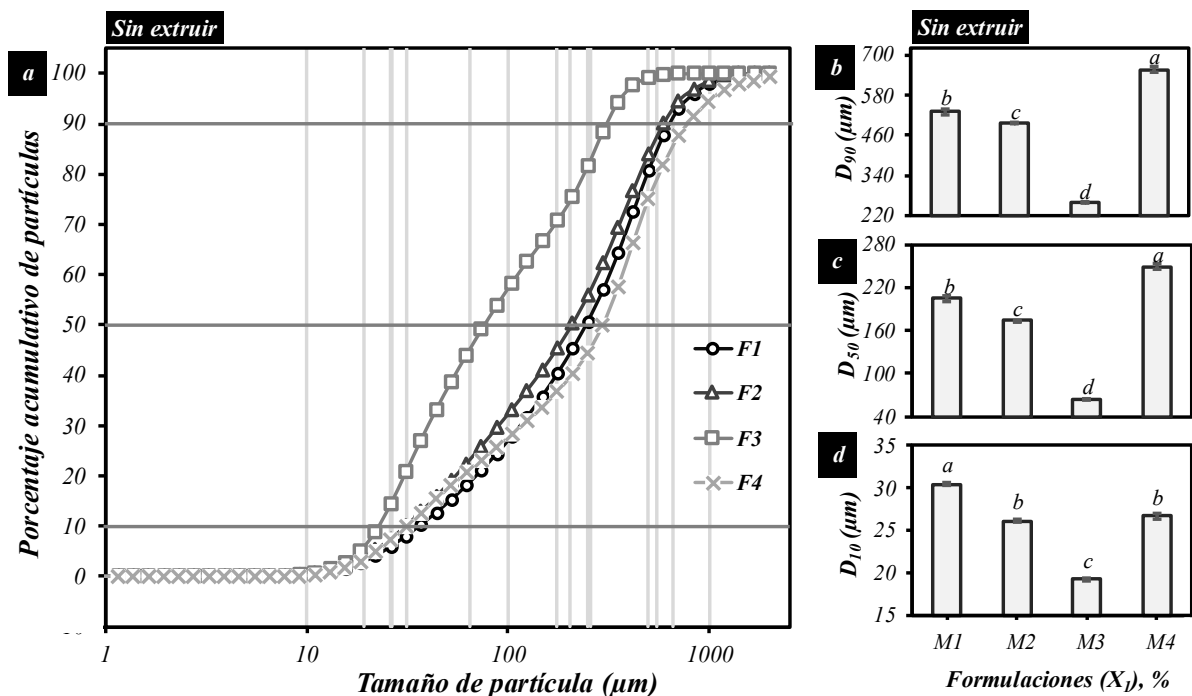
C1: condición suave; C2: condición severa; M1: Arroz parbolizado integral (60), mijo perla (15), garbanzo (15), judías cariocas (10); M2: Arroz parbolizado integral (15), mijo perla (60), garbanzo (15), judías cariocas (10); M3: Arroz parbolizado integral (15), mijo perla (15), garbanzo (60), judías cariocas (10); M4: Arroz parbolizado integral (30), mijo perla (30), garbanzo (30), judías cariocas (10).

Figura 8. Efecto de las condiciones de extrusión en la densidad aparente de las mezclas de harinas de las formulaciones crudas (a) y extruidas (b).

4.2.2. Distribución del tamaño de partícula

Los valores obtenidos del análisis de distribución del tamaño de partículas (Particle size distribution: PSD), de las HC indican la existencia de diferencias entre cada formulación ($p \leq 0,05$). La diferencia en el tamaño de partícula juega un papel importante en las propiedades funcionales, fisicoquímicas, de adsorción, hidratación y superficiales (Azeem et al., 2021), convirtiéndose en un análisis esencial para la formulación de diferentes tipos de productos, ya que con mayor número de partículas pequeñas en la harina resulta en una masa menos extensible y menos fluida, debido a la alta absorción de agua (Mamat et al., 2020). La amplitud de la PSD se muestra mediante los valores de D10, D50 y D90 (Fig. 9b, 9c y 9d). Donde los valores de D10 variaron de 19,22 a 30,4 μm , de D50 variaron de 64,21 a 249,27 μm y de D90 variaron de 259 a 656,93 μm . Se observó que, en las HC, los mayores tamaños de partícula se encontraron en las formulaciones con mayor contenido de cereales (M1, M2 y M4), y con más partículas pequeñas en M3 (70 % de legumbres), como se muestra en la curva

acumulada de partículas donde M3 se desplaza hacia la izquierda, respecto a las otras formulaciones (Fig. 9a), y su amplitud de distribución fue menos amplia que las partículas mayores, como observado por Carvalho et al. (2010), en harina de maíz. La diferencia de tamaño podría atribuirse al mayor contenido de almidón en las formulaciones aumentando el tamaño de partícula, como observaron Liu et al. (2024) cuando añadieron harina de patata morada mezclada con harina de arroz para formular una harina compuesta como materia prima para el desarrollo de nuevos productos. Mientras tanto, en los valores del diámetro de la media volumétrica $D_{[4,3]}$ de los HC (Fig. 10a), se encontró un diámetro mayor para M4, valores similares entre M1 y M2, y un diámetro menor en M3. El mismo comportamiento se observó también para los valores de media superficial $D_{[3,2]}$ (Fig. 10b).

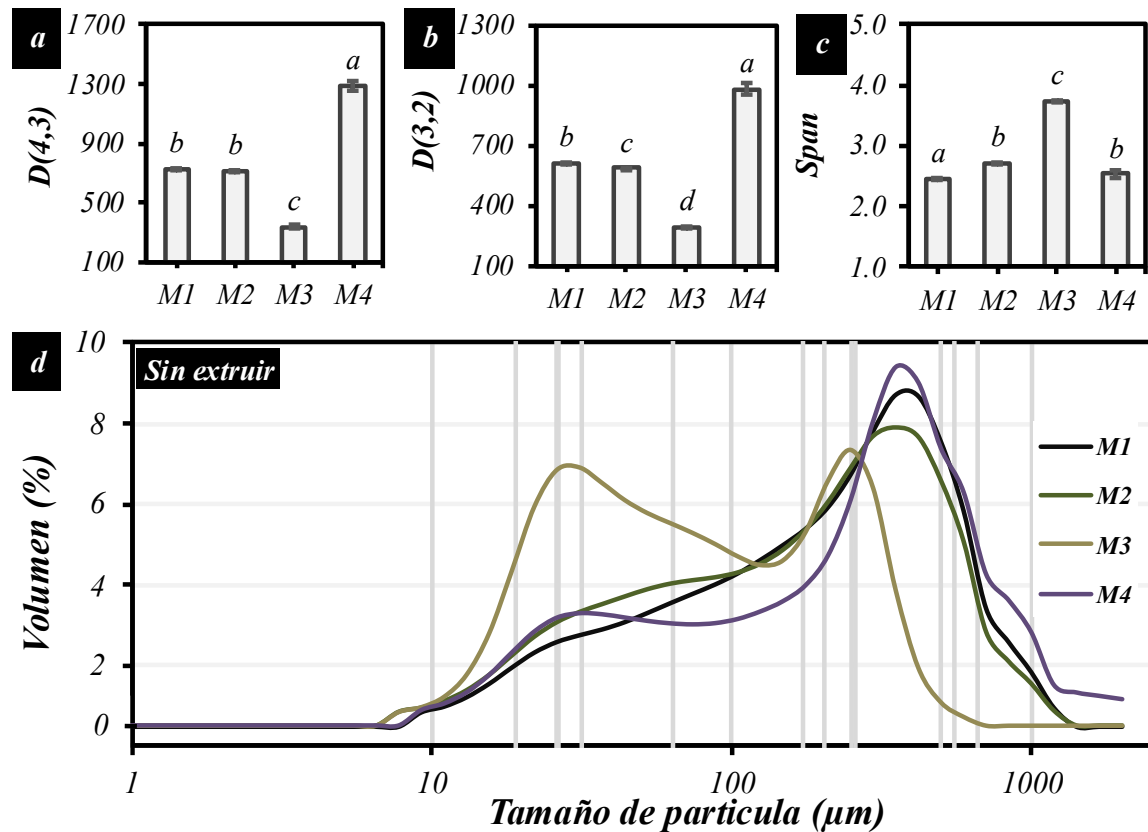


M1: Arroz parbolizado integral (60), mijo perla (15), garbanzo (15), judías cariocas (10); M2: Arroz parbolizado integral (15), mijo perla (60), garbanzo (15), judías cariocas (10); M3: Arroz parbolizado integral (15), mijo perla (15), garbanzo (60), judías cariocas (10); M4: Arroz parbolizado integral (30), mijo perla (30), garbanzo (30), judías cariocas (10).

Figura 9. Curvas de distribución del tamaño de las partículas de harina integral mezclada no extruida (a), diámetro de partícula grande D_{90} (b), diámetro de partícula intermedio D_{50} (c) y diámetro de partícula pequeña D_{10} (d).

La uniformidad de la PSD de la HC fue evaluada por el parámetro Span (Fig. 10c), encontrándose valores entre 2 y 3, donde un menor valor indica una distribución más homogénea de las partículas (Liu et al., 2024). La homogeneidad se observa para las formulaciones con mayor contenido de cereal en las formulaciones obteniendo valores más

homogéneos, mientras que el M3 con mayor contenido de legumbres obtuvo el mayor valor de Span, siendo menos homogéneo. Al respecto, Liu et al. (2024) mencionan que encontraron un impacto significativo con la incorporación de harina de papa morada en una mezcla compuesta con harina de arroz, mejorando la homogeneidad de la PSD.



M1: Arroz parbolizado integral (60), mijo perla (15), garbanzo (15), judías cariocas (10); M2: Arroz parbolizado integral (15), mijo perla (60), garbanzo (15), judías cariocas (10); M3: Arroz parbolizado integral (15), mijo perla (15), garbanzo (60), judías cariocas (10); M4: Arroz parbolizado integral (30), mijo perla (30), garbanzo (30), judías cariocas (10).

Figura 10. Valores de media volumétrica $D[4,3]$ (a), media superficial $D[3,2]$ (b), de Span (c) y de las curvas de porcentaje en volumen de la distribución del tamaño de partículas (d).

Los valores obtenidos del análisis de PSD de las HE indican diferencias entre las distintas formulaciones y las condiciones de extrusión ($p \leq 0,05$). La amplitud de la PSD se muestra con los valores de D_{10} , D_{50} y D_{90} (Fig. 11b, 11c, 11d). Dichos valores con la influencia de C1 para D_{10} variaron de 22,32 a 33,5 μm , para D_{50} variaron de 106,83 a 139,47 μm y D_{90} variaron de 229,02 a 287,03 μm . Mientras que con la influencia de C2 para D_{10} varió de 27,47 a 48,63 μm , para D_{50} de 109,8 a 182,92 μm y para D_{90} de 234,1 a 329,25 μm . Se observó que, con la influencia de C1, M1 presentó partículas de mayor tamaño, como se muestra en la curva de porcentaje acumulado de partículas, que se desplazó hacia la derecha, mientras que las partículas de menor tamaño se desplazaron hacia la izquierda en las otras

formulaciones. Mientras que, con la influencia de C2, M4 presentó partículas de mayor tamaño, como se muestra en la curva de porcentaje acumulado de partículas, se desplaza hacia la derecha (Figura 11a), y los restos de formulaciones a la izquierda indican tamaños más pequeños (Cristiano et al., 2019). Mientras tanto, en los valores de D media volumétrica (4,3) y D media superficial (3,2) de HE con la influencia de C1, se observaron valores altos similares entre M1 y M3, y valores más bajos similares entre M2 y M4. Mientras que con la influencia de C2, se observaron valores más altos similares para M3 y M4, y valores más bajos similares para M1 y M2, respectivamente. Los valores de span mostraron menor homogeneidad en la PSD, con la influencia de C1 en la M3 (>2), que los demás. Mientras que con C2 menor homogeneidad para M2 y M3 (>1,9), y partículas más homogéneas para M1 y M4. Al respecto, los estudios describen que una PSD variable se debe a los efectos de la dureza, al tipo de proceso, tipo de molienda o técnica (Raza et al., 2019).

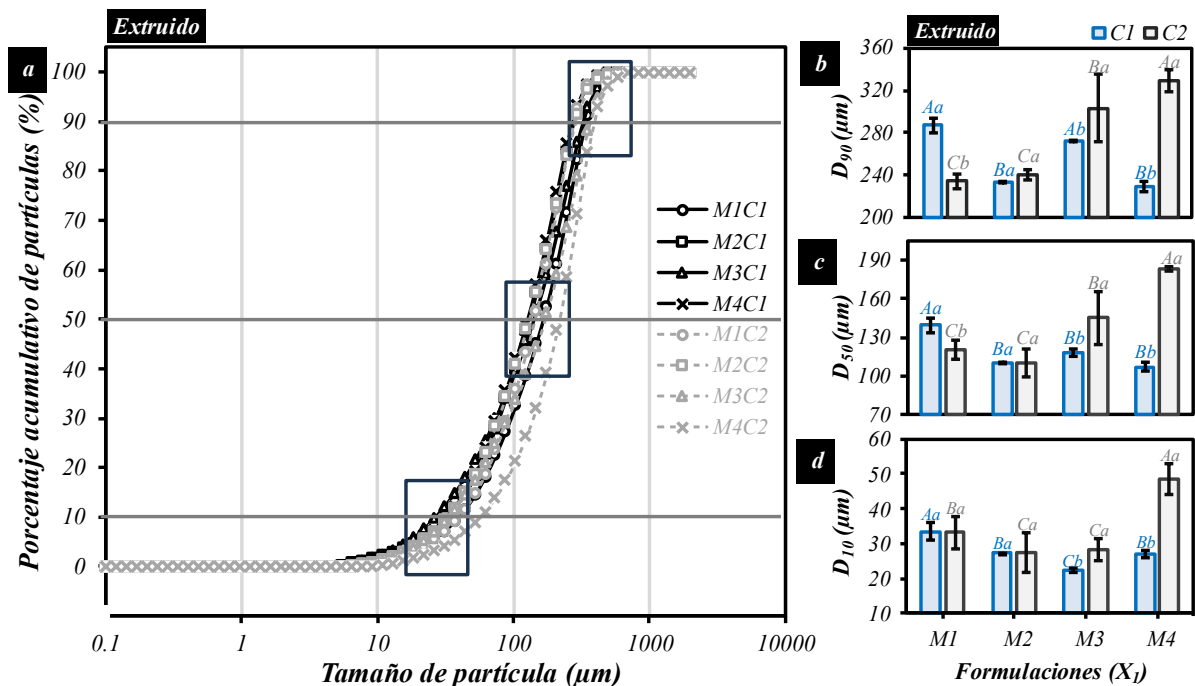
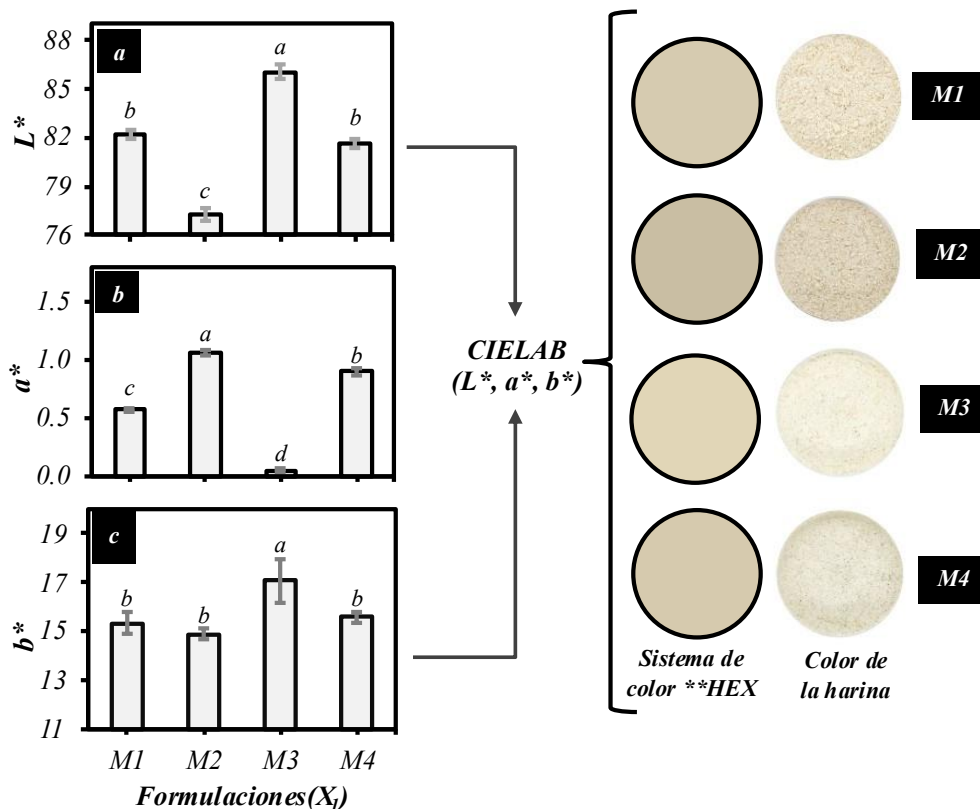


Figura 11. Curvas de distribución del tamaño de las partículas de la harina integral mezclada extruida (a), diámetro de las partículas grandes D90 (b), diámetro de las partículas intermedias D50 (c) y diámetro de las partículas pequeñas D10 (d).

C1: condición suave; C2: condición severa; M1: Arroz parbolizado integral (60), mijo perla (15), garbanzo (15), judías cariocas (10); M2: Arroz parbolizado integral (15), mijo perla (60), garbanzo (15), judías cariocas (10); M3: Arroz parbolizado integral (15), mijo perla (15), garbanzo (60), judías cariocas (10); M4: Arroz parbolizado integral (30), mijo perla (30), garbanzo (30), judías cariocas (10).

4.2.3. Color en la harina mezclada

El color puede determinarse mediante medición, utilizando el sistema CIELAB con valores de luminosidad (L^*) y coordenadas de cromaticidad (a^* y b^*), valores que van de 0 a 100 (de oscuro a claro), de rojo a verde (+a y -a) y de amarillo a azul (+b y -b) (Boakye et al., 2023). Para los valores L^* , a^* y b^* , se encontraron diferencias en las HC ($p < 0,05$) (Anexo 20). Se observó que, en los valores de L^* , la M3 mostró mayor claridad (86,05), debido al contenido de garbanzo (60 %), seguida de valores similares para M1 (82,2) y M4 (81,7), y menor claridad para M2 (77,29), compuesto por mijo perla (60 %). Para los valores de a^* fueron positivos, es decir, coloración con tendencia al rojo. Un valor de 1,06 para la M2, seguido de 0,90 para la M4, de 0,57 para la M1 y de 0,05 para la M3. Por último, el parámetro b^* mostró valores positivos, encontrando mayor amarillez para la M3 (17,05) y valores similares para M4 (15,57), M1 (15,32) y M2 (14,87). El aumento del contenido de garbanzos en la formulación aumenta el brillo (L^*) y el amarilleamiento (+ b^*), mientras que el aumento del contenido de mijo disminuye el brillo y el amarilleamiento, pero aumenta el enrojecimiento de la formulación (figura 15).



** Conversión del color CIELAB al sistema de colores hexadecimal.

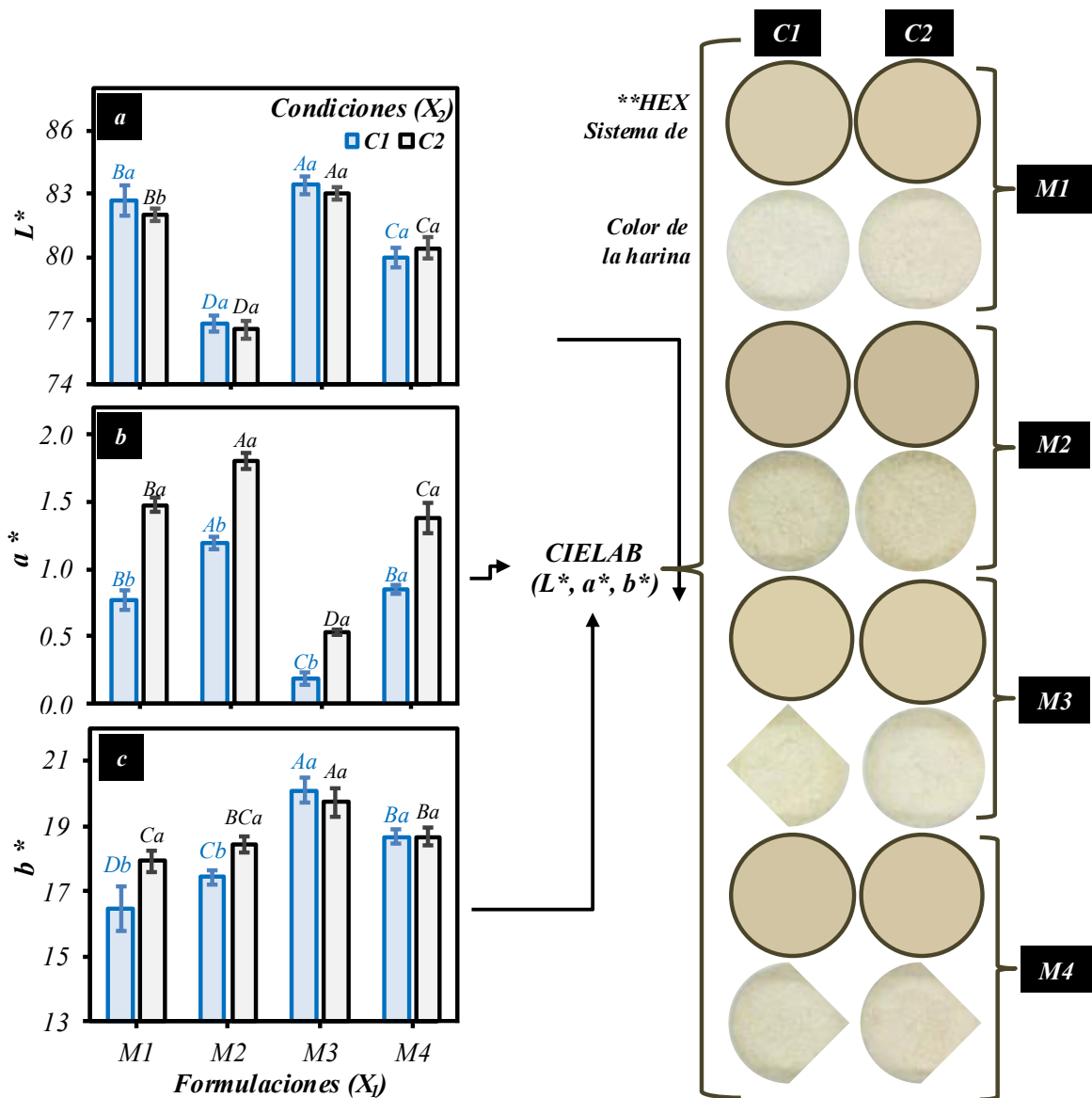
M1: Arroz parbolizado integral (60), mijo perla (15), garbanzo (15), judías cariocas (10); M2: Arroz parbolizado integral (15), mijo perla (60), garbanzo (15), judías cariocas (10); M3: Arroz parbolizado integral (15), mijo perla (15), garbanzo (60), judías cariocas (10); M4: Arroz parbolizado integral (30), mijo perla (30), garbanzo (30), judías cariocas (10).

Figura 12. Parámetros de color de las harinas mixtas crudas, L^* (a), a^* (b), b^* (c).

Después del proceso de extrusión, se determinaron los parámetros CIELAB influenciados por las dos condiciones empleadas (Figura 13). Con la C1, se encontró que la M3 (83,41) mostró un mayor valor de L^* , seguido por la M1 (82,7), la M4 (80,0) y un valor bajo para la M2 (76,85). Para los valores de a^* , se observa que fue mayor para la M2 (1,19), seguido de valores estadísticamente similares para la M4 (0,85) y la M1 (0,77) y por último el valor más bajo para la M3 (0,19). Para los valores de b^* , se observa un agrupamiento de altos valores similares en un primer bloque que reúne a la M3 (20,09) y a la M4 (18,66), y en un segundo bloque, que reúne valores menores para la M2 (17,44) y la M1 (16,44). Con la C2, se encontró que la M3 (83,01) mostró un mayor valor de luminosidad L^* , seguido de la M1 (82,01), la M4 (80,44) y el valor más bajo para la M2 (76,55). Para los valores de a^* , se observa que fue mayor para la M2 (1,8), seguido de valores estadísticamente similares para la M4 (1,48) y la M1 (1,38) y un valor más bajo para la M3 (0,53). Para los valores de b^* , se observa que la M3 (19,71) mostró un mayor valor, seguido de valores estadísticamente similares para la M4 (18,67) y la M2 (18,43), y un menor valor para la M1 (17,93).

Durante el proceso de extrusión, el uso de altas temperaturas provoca cierto grado de cocción en los alimentos. Este efecto depende de los parámetros aplicados, que influyen directamente en las modificaciones de color del producto final. La comparación del cambio de color antes y después del proceso de extrusión ayuda a determinar el impacto de la cocción de los ingredientes del producto (Alam et al., 2016). Se observó que L^* no se vio afectado por las condiciones de extrusión. Por otro lado, con la influencia de C2, los valores de a^* aumentaron en cada formulación con respecto a C1, y las condiciones influyeron en b^* aumentando el amarilleamiento en M3 y M4 debido al contenido de garbanzo. Es decir, la HE tras la extrusión mantiene el brillo y aumenta ligeramente el amarilleamiento, con un mayor enrojecimiento, influido por la harina de garbanzo y de mijo perla en la formulación. Además, el contenido de harina de mijo perla en la formulación disminuye el brillo y aumenta el enrojecimiento de la harina. En este sentido, Alam et al. (2016), investigaron los cambios de color en la extrusión de sémola de maíz, utilizando el sistema de color CIELab, encontrando que L^* y la cromaticidad a^* , dependían principalmente de la temperatura del barril, la humedad del alimento y la velocidad de alimentación, mientras que la cromaticidad b^* dependía ligeramente de las variables de extrusión. Por lo tanto, el cambio de color se ve afectado principalmente por la composición de la formulación y las condiciones del proceso de extrusión (Dalbhat et al., 2019). Además, se sabe que durante el proceso de extrusión se producen algunas reacciones que afectan el color del extruido, como el pardeamiento no enzimático (por ejemplo, reacción de Maillard y caramelización) (Dalbhat et al., 2019) y la degradación de pigmentos

(Dalbhat & Mishra, 2019). Y qué condiciones de baja humedad con alta temperatura potencian la reacción de Maillard que cambia el color del producto, mientras que a mayor humedad el efecto de la alta temperatura es menos significativo, también la velocidad del tornillo afecta negativamente ya que influye en el tiempo de residencia (Dalbhat et al., 2019). Por otro lado, Allai et al. (2023) observaron que el proceso de extrusión con un aumento de la humedad y de la temperatura del barril provocaba una reducción de L^* y un aumento de a^* y b^* .



** Conversión del color CIELAB al sistema de colores hexadecimal.

C1: condición suave; C2: condición severa; M1: Arroz parbolizado integral (60), mijo perla (15), garbanzo (15), judías cariocas (10); M2: Arroz parbolizado integral (15), mijo perla (60), garbanzo (15), judías cariocas (10); M3: Arroz parbolizado integral (15), mijo perla (15), garbanzo (60), judías cariocas (10); M4: Arroz parbolizado integral (30), mijo perla (30), garbanzo (30), judías cariocas (10).

Figura 13. Color en la harina mezclada extruida, L^* (a), a^* (b) y b^* (c).

El cambio de color total (ΔE), que se observa comparando el efecto de las condiciones de extrusión usadas en la obtención de harinas extruidas con las harinas no extruidas, en su mayoría obtuvieron valores mayores a 2, solo para la M1 influenciada bajo la C2 obtuvo un valor menor (1,55) por el efecto de la severidad de los parámetros de extrusión usados donde el brillo disminuyó en comparación con el valor de la harina no extruida. El efecto de los parámetros de extrusión y la aplicación de diversas materias primas sobre el color de los productos extruidos fue objeto de numerosas investigaciones en las que el cambio de color se atribuyó a las diversas reacciones que incluyen básicamente la reacción de Maillard, la caramelización, la hidrólisis y la degradación de pigmentos (Jozinović et al., 2016). (Muñoz-Pabon et al., 2022) encontraron valores superiores a 6 en extruidos a base de harina de arroz, maíz, almidón de maíz y proteína de quinua tratada. (Jozinović et al., 2016) mencionan que la diferencia de color superior a 3 es percibida por la mayoría de la población y si la diferencia de color es superior a 6, está claro que los colores pertenecen a diferentes grupos de color.

4.3. Propiedades tecno-funcionales de las harinas

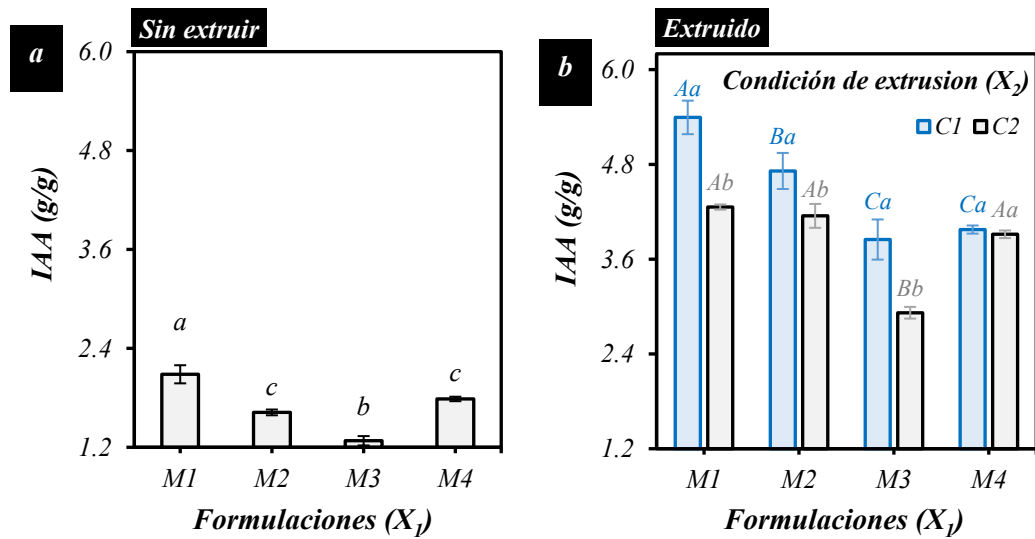
4.3.1. Índice de absorción de agua

Los valores del índice de absorción de agua (IAA) para el HC en el anexo 17. Se observa que en las HC varió de 1,28 a 2,09 g/g ($p < 0,05$). Donde M1 obtuvo el valor más alto, seguido de valores similares para M2 y M4, y un valor más bajo para M3. El IAA se define como la capacidad de la harina para absorber agua e hincharse dando una consistencia y rendimiento deseables en el producto final (Anberbir et al., 2024). Dentro de los carbohidratos, la presencia de almidón en la harina hace que se hinche en dispersión acuosa y se gelatinice en tratamiento de alto calor (Jain & Goomer, 2023). Los cereales y las legumbres contienen las mayores cantidades de hidratos de carbono y proteínas en comparación con otros grupos de alimentos (Jain & Goomer, 2023). Se observó que cuanto mayor era el porcentaje de cereales en la formulación, mayores eran los valores de IAA, lo que significa que la presencia de fibra y almidón en la formulación podría haber afectado positivamente al IAA (Figura 12a). En este sentido, algunos estudios mencionan que la presencia de fibra y almidón en la composición del pienso también conlleva una mayor hidratación (Allai et al., 2023), así como características superficiales, área superficial y microestructura de las partículas (Liu et al., 2024). Por otro lado, los bajos valores de IAA observados en M3 podrían haber estado influidos por un mayor contenido proteico en la formulación cuyo contenido en leguminosas era más elevado (garbanzo y frijol - 70 %), coincidiendo con lo mencionado por Kiosseoglou et al. (2021), quienes encontraron valores tan bajos como 0.6 y tan altos como 4,9 g/g para aislados o concentrados

proteicos obtenidos de leguminosas como garbanzo, guisante, judía o lenteja, indicando que dependiendo del tipo de leguminosa o variedad influye en la IAA. Asimismo, la absorción de agua depende de la disponibilidad de grupos hidrofílicos y de la capacidad de deformación del gel, donde los resultados revelaron que en la harina de trigo integral la capacidad de formación de gel del almidón fue determinante en la IAA que la presencia de compuestos hidrofílicos como las fibras (Oliveira et al., 2017).

Durante la evaluación de la influencia de las condiciones de extrusión utilizadas (C1 y C2) sobre la HE, se encontraron diferencias ($p < 0,01$) (Anexo 17). Se observó que los valores de IAA con C1 variaron de 3,85 a 5,39 g/g y con C2 variaron de 2,92 a 4,26 g/g. Observando que con la extrusión los valores de IAA en HE aumentaron en comparación con HC (Figura 12b), coincidiendo con Oliveira et al. (2017) que mencionan que durante la extrusión de harina integral de trigo y harina de maíz. Con la influencia de la C1 los valores de IAA fueron superiores a los de la C2. El aumento del contenido de humedad en el proceso aumenta el IAA de los extrudados (Altaf et al., 2021), induciendo un efecto plastificante que retrasa el cizallamiento, reduciendo la gelatinización y la degradación del almidón (Dalbhagat & Mishra, 2019). Además, se observa que cuando se disminuye el contenido de leguminosas y se aumenta el contenido de cereales en la formulación, los valores de IAA aumentan atribuyendo a la presencia de almidón coincidiendo con (Dalbhagat & Mishra, 2019) quienes mencionaron que, con mayor contenido de amilosa, presentó mayores valores de IAA. Mientras que con el aumento de legumbre en la formulación disminuye, coincidiendo con lo reportado por Altaf et al. (2021), encontrando que, en extrudados a base de arroz y garbanzo, el IAA disminuyó con el aumento de garbanzo en la mezcla. Por otro lado, estudios han demostrado que existen interacciones entre el almidón y la proteína vegetal, que aumentan la capacidad de absorción y retención de agua (Sotelo-Díaz et al., 2023).

Y durante la evaluación del efecto de las dos condiciones de extrusión (C1 y C2) en las HE para cada formulación, se encontraron diferencias ($p < 0,05$) para los valores de IAA. Donde los valores de IAA con la C1 y la C2 fueron estadísticamente diferentes para la M1, M2 y M3, observando que esos valores de IAA con la C2 fueron superiores a los de la C1. El incremento del contenido de humedad en el proceso, incrementa el IAA de los extruidos (Altaf et al., 2021). Mientras tanto, en la M4 se encontraron valores similares de IAA entre las dos condiciones usadas, que podría atribuirse a la composición de la proporción usada en esta formulación.



C1: condición suave; C2: condición severa; M1: Arroz parbolizado integral (60), mijo perla (15), garbanzo (15), judías cariocas (10); M2: Arroz parbolizado integral (15), mijo perla (60), garbanzo (15), judías cariocas (10); M3: Arroz parbolizado integral (15), mijo perla (15), garbanzo (60), judías cariocas (10); M4: Arroz parbolizado integral (30), mijo perla (30), garbanzo (30), judías cariocas (10).

Figura 14. Índice de absorción de agua de las harinas mezcladas no extruidas (a) y harinas mezcladas extruidas (b).

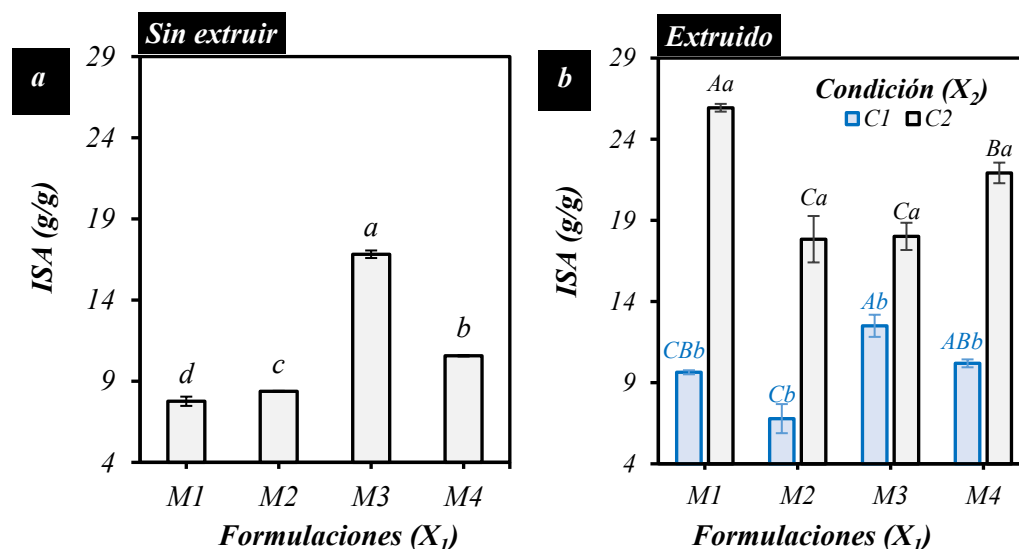
4.3.2. Índice de solubilidad en agua

La solubilidad de la harina es una de las propiedades funcionales que suelen determinarse durante el desarrollo y las pruebas de una nueva harina o compuesto de harina (Awuchi et al., 2019). Los valores obtenidos del ISA para las HC se presentan en el anexo 18, existiendo diferencia altamente significativa entre ellos ($p < 0,01$). La media de los valores de ISA de la M3 (16,82 %), compuesta con un porcentaje mayor de garbanzo fue el valor más alto, seguido por la M4 (10,57 %) compuesta por la mistura de los tres granos en igual proporción, seguido también por la M2 (8,37 %) compuesta por mijo perla en mayor porcentaje y un valor menor para la M1 (7,76 %) compuesta por arroz parbolizado en mayor porcentaje en la harina compuesta. Los valores más altos de ISA se observan en las formulaciones que contenían mayores porcentajes de garbanzo (fig. 13a), se podría atribuir a la presencia de proteínas solubles presentes en esta harina. La solubilidad en agua de una harina es un indicador crítico de la degradación de los componentes moleculares, el cual mide la cantidad de componentes solubles liberados de proteínas y otras moléculas (Anberbir et al., 2024). Así como también factores como el contenido de almidón y su estructura cristalina, lípidos y el tamaño de partículas.

Durante la evaluación de la influencia de las condiciones de extrusión utilizadas (C1 y C2), se observó que sus valores de ISA aumentaron. Se observa que con C1

varió de 6,78 a 12,5 %, y para C2 varió de 17,84 a 25,94 %. La influencia de los parámetros utilizados en C2; los valores fueron muy superiores a C1. El uso de una humedad elevada y una velocidad de tornillo baja en C1 M2 obtuvo el valor más bajo, cuya composición es más elevada con el mijo perla, mientras que los valores aumentaron para las demás formulaciones. Estos valores podrían atribuirse a la presencia de proteínas solubles, almidón degradado y a los parámetros de extrusión utilizados, como la elevada humedad del pienso (30 %) y la baja velocidad del tornillo (300 rpm). Mientras que el uso de baja humedad y alta velocidad de tornillo en C2 muestra que, con el aumento de harina de arroz en la formulación, los valores de ISA aumentan, lo que puede atribuirse a la presencia de almidón degradado. La cocción por extrusión a baja humedad provoca una mayor fragmentación del almidón, y también facilita la formación de moléculas solubles en agua (Jabeen et al., 2021), ya que un alto contenido de humedad produce un bajo ISA, plastificando el material de extrusión, reduciendo los fenómenos de fricción y consiguiendo un efecto protector sobre los constituyentes de la harina (Pasqualone et al., 2020), y también mejora la gelatinización del almidón e inhibe la desnaturalización de las proteínas y la degradación del almidón (Jabeen et al., 2021), y también mejora la gelatinización del almidón e inhibe la desnaturalización de las proteínas y la degradación del almidón (Jabeen et al., 2021). Downs et al. (2023), mencionaron que los altos valores de solubilidad están generalmente asociados con la degradación del almidón, observando que el aumento de la velocidad del tornillo aumenta el ISA, coincidiendo con Jabeen et al. (2021), donde una mayor velocidad del tornillo conduce a una rápida degradación de los gránulos de almidón, reduciendo su peso molecular y aumentando el ISA. Asimismo, Pasqualone et al. (2020) observaron que el ISA aumenta con el incremento de la temperatura y la velocidad del tornillo, ya que condiciones termomecánicas más severas conducen a un mayor grado de dextrinización y que en condiciones menos severas o de alto contenido lipídico forman complejos con la amilosa, reduciendo la degradación del almidón. Entonces podemos afirmar lo mencionado por Sharma et al. (2017), quienes observaron que los parámetros utilizados como la humedad del alimento y la velocidad del tornillo tuvieron un efecto significativo en el ISA de los extrudados. Además, la influencia de la composición del pienso también es de importancia, y que podría afectar a los valores de ISA, donde los valores más bajos se pueden atribuir a un menor contenido de almidón, un mayor contenido de proteína (Awol et al., 2024; Downs et al., 2023), desnaturalización de la proteína, y la formación de enlaces cruzados entre el almidón y la proteína en los extrudados (Dalbhagat & Mishra, 2019; Downs et al., 2023). Por ejemplo, en la producción de snacks, se mezclaron harinas de mijo (20 %), frijol (16 %), arroz (10 %) y soja (16 %); los parámetros de extrusión utilizados fueron temperatura (190 – 275 °C),

velocidad del tornillo (60 - 110 rpm) y humedad de la harina (31,5 %), en una extrusora de un solo tornillo. Donde los valores de ISA no se vieron afectados por la interacción de los factores, no coincidiendo con otros estudios, ya que este efecto podría atribuirse a los ingredientes utilizados, y la influencia de la extrusión dependía de la composición química de las materias primas (Srinivas JR, 2014).



C1: condición suave; C2: condición severa; M1: Arroz parbolizado integral (60), mijo perla (15), garbanzo (15), judías cariocas (10); M2: Arroz parbolizado integral (15), mijo perla (60), garbanzo (15), judías cariocas (10); M3: Arroz parbolizado integral (15), mijo perla (15), garbanzo (60), judías cariocas (10); M4: Arroz parbolizado integral (30), mijo perla (30), garbanzo (30), judías cariocas (10).

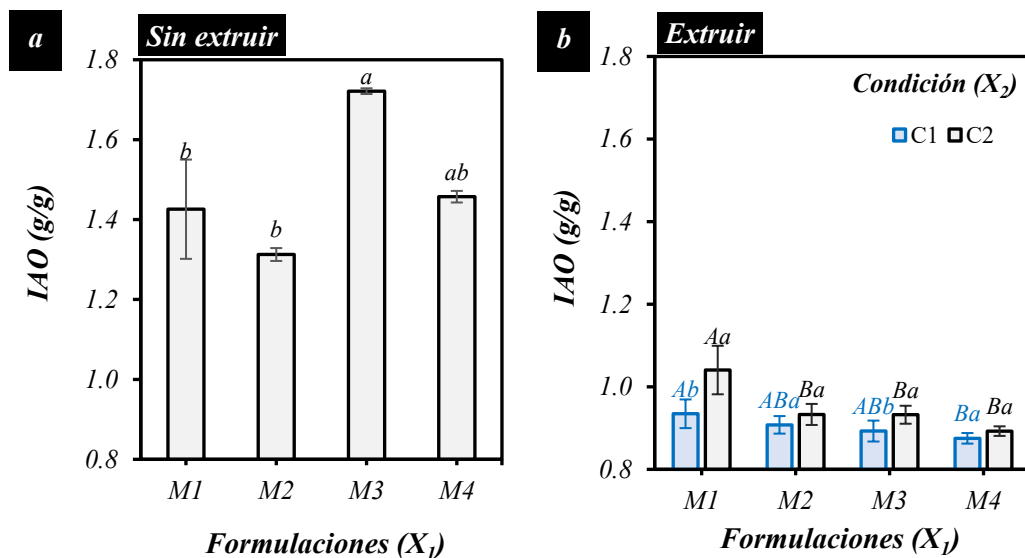
Figura 15. Índice de solubilidad en agua de las harinas mezcladas no extruidas (a) y harinas mezcladas extruidas (b).

4.3.3. Índice de absorción de aceite

Los valores del índice de absorción de aceite de las harinas mixtas extruidas y no extruidas de granos de cereales integrales y legumbres se muestran en el anexo 19. Entre los valores obtenidos para el IAO de las HC se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0,05$), donde la M3 (1,72 g/g) compuesta con un contenido mayor de garbanzo (60 %) obtuvo el mayor valor, seguido de la M4 (1,46 g/g) cuyo valor fue estadísticamente similar al valor de la formulación anterior, continuando con la M1 (1,43 g/g) que presenta valores medios similares a la M2 (1,31 g/g), y este último obtuvo el menor valor. Los valores altos de IAO se podría atribuir a un elevado contenido de proteínas en la formulación, donde la presencia de mayor porcentaje de harina de legumbres, incremento los valores de IAO, mientras con el decremento de su contenido se obtuvo valores bajos (fig. 14a). En otros estudios sugirieron que la capacidad de la proteína para unirse a la grasa depende de sus cadenas laterales no polares, el cual

contribuye a una mayor IAO (Ahn et al., 2005; Shevkani et al., 2019). Asimismo, (Zhu et al., 2024) mencionan que el IAO de las proteínas está determinado por la proporción de aminoácidos hidrofílicos e hidrofóbicos en las superficies de las partículas proteicas. Además, dicho aumento podría estar relacionado con la disminución de su densidad aparente (Ahn et al., 2005).

Durante el proceso de extrusión se evaluaron el efecto de dos condiciones (C1 y C2) y los valores de IAO disminuyeron para las formulaciones de las HE (Fig. 14b). Donde el efecto de la primera condición (C1) en las formulaciones de las HE tuvo diferencia significativa ($p < 0.05$), la M1 (0.93 g/g) obtuvo el mayor valor, a su vez siendo estadísticamente similar a la M2 (0.91 g/g) y la M3 (0.89 g/g), y estos dos últimos estadísticamente similar a la M4 (0.88 g/g) que obtuvo el valor más bajo de IAO. Mientras tanto para el efecto de la segunda condición (C2) también se encontró diferencia significativa ($p < 0.05$), donde el valor más alto lo obtuvo la M1 (1.04 g/g), seguido de valores estadísticamente similares entre la M2 (0.93 g/g), la M3 (0.93 g/g) y la M4 (0.89 g/g), así mismo, este último obtuvo el valor más bajo de índice de absorción de oleo.



C1: condición suave; C2: condición severa; M1: Arroz parbolizado integral (60), mijo perla (15), garbanzo (15), judías cariocas (10); M2: Arroz parbolizado integral (15), mijo perla (60), garbanzo (15), judías cariocas (10); M3: Arroz parbolizado integral (15), mijo perla (15), garbanzo (60), judías cariocas (10); M4: Arroz parbolizado integral (30), mijo perla (30), garbanzo (30), judías cariocas (10).

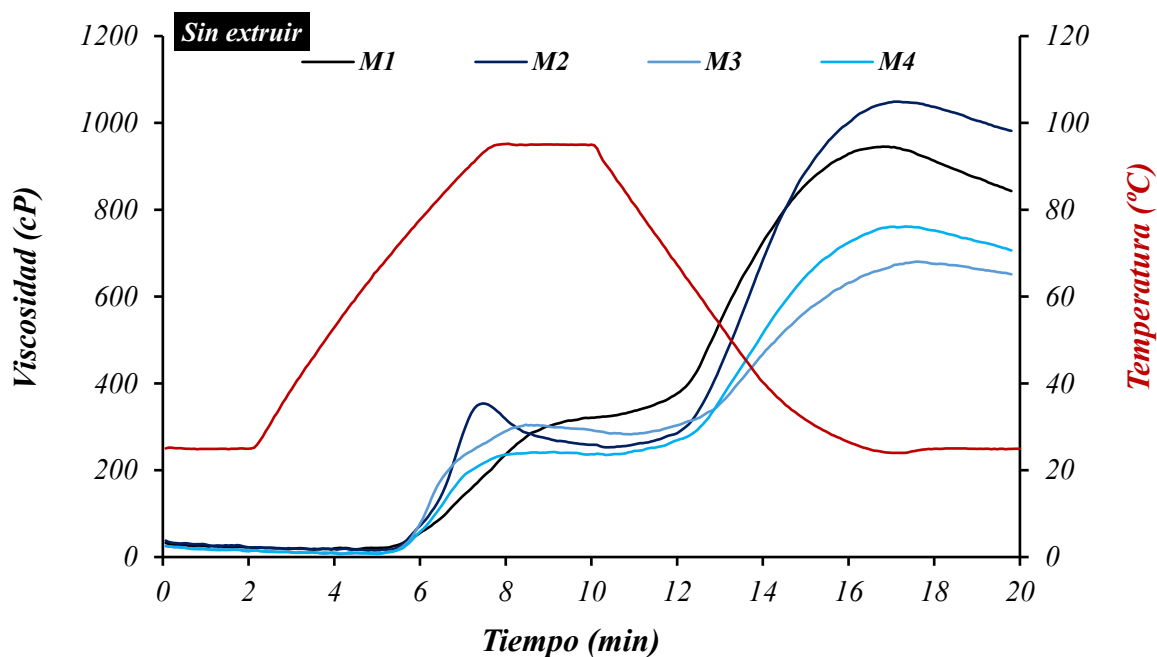
Figura 16. Índice de absorción de aceite en las formulaciones de las harinas crudas (a) y extruidas (b).

La influencia de C1 varió de 0,88 a 0,93 g/g, y C2 varió de 0,89 a 1,04 g/g. Se puede observar que la M1 con mayor porcentaje de arroz vaporizado tuvo un mayor valor

de OAI bajo el efecto de las dos condiciones, con respecto a las demás. Además, se observa que los valores de OAI obtenidos en C2 fueron ligeramente superiores a los de C1. Esto podría estar influenciado por el uso de baja humedad, alta velocidad de tornillo y alta temperatura constante de 130°C, coincidiendo con Lazou and Krokida (2010), quienes mencionan que el OAI disminuye con el aumento de la humedad, debido a que el grado de cocción de los extrudados disminuye. Así mismo, Sobowale et al. (2021), encontraron que los valores de OAI aumentaban al disminuir la humedad del alimento (Sobowale et al., 2021). Por otro lado, los estudios mencionan que el OAI está influenciado por el tamaño de partícula, la cantidad de fibra, almidón y proteína en el polvo, así como también está relacionado con la presencia de proteína hidrofóbica que es útil en la unión de lípidos (Raza et al., 2019).

4.4. Propiedades reológicas de las harinas

Los perfiles de las propiedades de pasta de las harinas mixtas no extruidas (figura 17) mostraron ausencia de viscosidad en frío para todas las formulaciones, así como la formación de picos de viscosidad en la M1, la M3 y la M4 durante la etapa de calentamiento. Sin embargo, se observó un pico de viscosidad de menor intensidad en la M2, que contiene mayor porcentaje de mijo perla en su formulación. Se observa también que durante la etapa de enfriamiento se incrementó la viscosidad, donde la M2 alcanzó valores más altos, seguida de la M1, la M4 y la M3. Kahraman et al. (2018) encontraron que, con el enfriamiento, se reordenan las moléculas de almidón, que provocan un incremento de la viscosidad. Concordando con Anberbir et al. (2024), quienes mencionaron que la variación podría atribuirse a los efectos cinéticos de enfriamiento de la viscosidad y al reagrupamiento de las moléculas de almidón en las muestras de harina. Asimismo, Muñoz-Pabon et al. (2022) mostraron que después del calentamiento e inicio del enfriamiento la viscosidad disminuyó, y después del enfriamiento la viscosidad de las harinas extruidas aumentó, además encontraron que la viscosidad fue mayor en las harinas no extruidas, que las extruidas en la obtención de extruidos a base de maíz, arroz, almidón de maíz y proteína de quinua. Además, se observaron que las formulaciones compuestas con harina de garbanzo, no se formaron de picos de viscosidad y obtuvieron los valores más bajos de viscosidad final durante el enfriamiento con respecto a las demás, al respecto Kahraman et al. (2018) mencionaron que en las formulaciones con la mezcla de harina de arroz con harinas tratadas de garbanzo, mostraron valores bajos para los picos de viscosidad y la viscosidad final, atribuyendo principalmente a la composición de la harina de garbanzo, que podría producir un gel de menor resistencia ralentizando la retrogradación de la pasta.

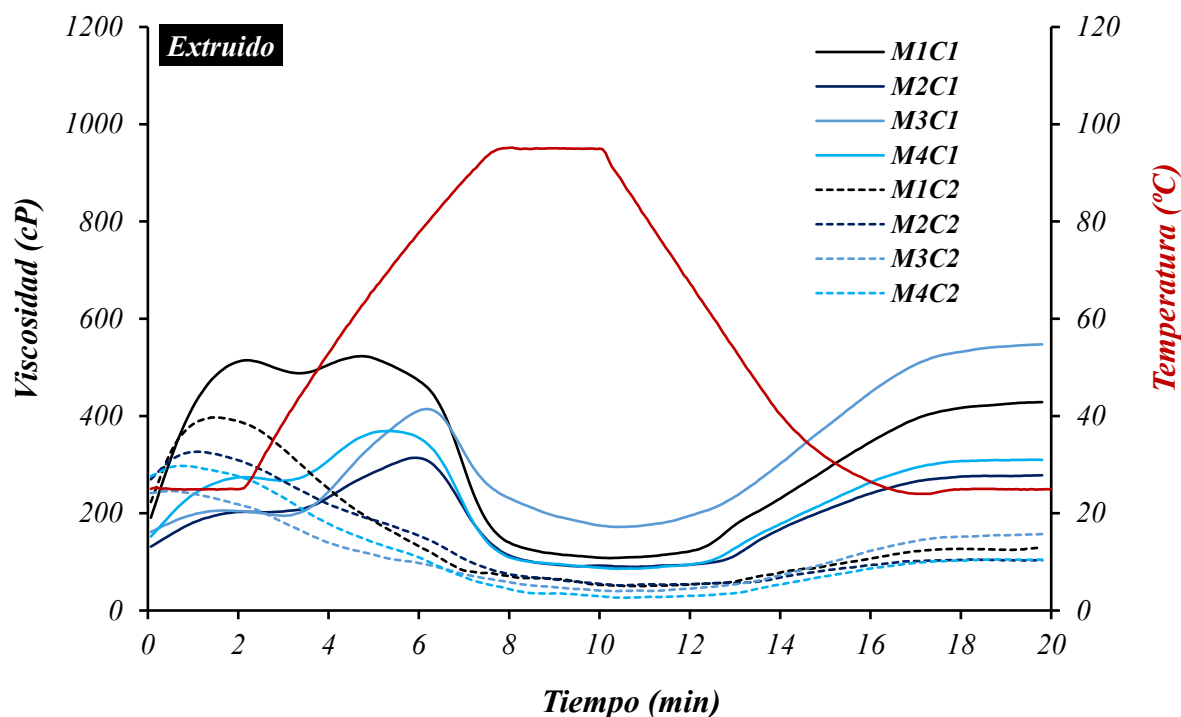


C1: condición suave; C2: condición severa; M1: Arroz parbolizado integral (60), mijo perla (15), garbanzo (15), judías cariocas (10); M2: Arroz parbolizado integral (15), mijo perla (60), garbanzo (15), judías cariocas (10); M3: Arroz parbolizado integral (15), mijo perla (15), garbanzo (60), judías cariocas (10); M4: Arroz parbolizado integral (30), mijo perla (30), garbanzo (30), judías cariocas (10).

Figura 17. Perfil de las propiedades reológicas en las harinas mezcladas no extruidas.

Después del proceso de extrusión en las HE se observa que bajo la influencia de la primera condición (Fig. 18) mostraron presencia de viscosidad en frío (CV) y la formación de picos de viscosidad (PV) evidenciando una leve fragmentación del almidón. La M1 con más contenido de arroz parbolizado, mostró una viscosidad en frío más alta (506), comparada con las demás formulaciones, seguida de la M4 (273), y continuando con valores estadísticamente similares para la M3 (208,5) y la M2 (202), las cuales presentaron baja viscosidad en frío. Así mismo, se evidencia la formación de picos de viscosidad durante el proceso de calentamiento, donde la M1 (527,5) obtuvo el valor más alto, seguido de la M3 (419,5), la M4 (371) y el pico más bajo por la M2 (318). Esta condición con parámetros de extrusión con alto contenido de humedad (30 %), baja velocidad del tornillo (300 rpm) y temperatura constante de 130 °C, fragmentó levemente los gránulos de almidón presentes en las HE. Comettant-Rabanal et al. (2023) encontraron que la presencia de picos de viscosidad en las harinas precocidas por extrusión usando humedad relativamente alta (27 %), velocidad de tornillo de 200 rpm y temperatura de 70°C, indicaba que los gránulos de almidón mantenían parte de su estructura granular con capacidad de absorber agua. Así mismo, se observa que, durante la etapa de

enfriamiento, hay un aumento de la viscosidad, pudiendo atribuirse a un leve daño a los gránulos de almidón. Entretanto, Muñoz-Pabon et al. (2022) mencionan que la extrusión con parámetros con humedad de 27 %, temperatura de 140°C y velocidad de tornillo de 200 rpm, causó menor daño al almidón presente y que su tendencia a la retrogradación es menor, dándose una reasociación entre las moléculas de amilosa con la formación de gel y conduciendo a un aumento de la viscosidad durante el enfriamiento en las harinas precocidas.



C1: condición suave; C2: condición severa; M1: Arroz parbolizado integral (60), mijo perla (15), garbanzo (15), judías cariocas (10); M2: Arroz parbolizado integral (15), mijo perla (60), garbanzo (15), judías cariocas (10); M3: Arroz parbolizado integral (15), mijo perla (15), garbanzo (60), judías cariocas (10); M4: Arroz parbolizado integral (30), mijo perla (30), garbanzo (30), judías cariocas (10).

Figura 18. Perfil de las propiedades reológicas de las harinas mezcladas extruidas bajo las dos condiciones de extrusión.

Las HE que estuvieron bajo la influencia de la segunda condición (Fig. 18) mostraron viscosidad en frío (CV) y ausencia de picos de viscosidad (PV). M1 con más contenido de arroz parbolizado, mostró viscosidad en frío más alta (401), comparada con las demás formulaciones, seguida de valores estadísticamente similares para M2 (329.5) y M4 (301.5), y por último, la M3 (250.5), con la viscosidad más baja. La ausencia de la formación de picos de viscosidad durante el proceso de calentamiento muestra que los granos de almidón fueron severamente dañados. La disminución del pico de viscosidad después de la extrusión está relacionada con un aumento significativo del daño al almidón, provocando disminución de la viscosidad (Jozinović et al., 2016). Asimismo, se tiene una disminución de la viscosidad en

el inicio y durante la etapa de enfriamiento, tras el enfriamiento tuvo un ligero incremento. Durante el enfriamiento se produce una reasociación de las moléculas de amilosa, formándose gel, conduciendo a un aumento de la viscosidad de los extrudados (Jozinović et al., 2016).

4.5. Contenido de polifenoles totales y propiedades antioxidantes de las harinas

4.5.1. Contenido de polifenoles totales (CPT)

La cuantificación de los polifenoles totales (CPT) se muestra en la Tabla 5. Se observa que entre los granos enteros y las legumbres utilizados en las formulaciones, los valores más altos de TPC correspondieron al frijol carioca con 508,35 mg GAE/100 g y al mijo perla con 296,42 mg GAE/100 g. Se observó que estos granos enteros de cereales y legumbres son los que aportan el mayor contenido de compuestos fenólicos a las formulaciones. En este sentido, Patil and Kaur (2018) mencionan que los cereales integrales y legumbres son fuentes perfectas de compuestos biológicamente activos, como fenólicos y flavonoides que han demostrado tener efectos beneficiosos para la salud. Dentro de las formulaciones, en las HC el TPC varió de 102,5 a 284,9 mg GAE/100 g. Observándose que el valor más alto correspondió a la M2, con mayor porcentaje de mijo perla en su formulación, que, tras el proceso de extrusión, se redujo a 273 mg GAE/100 g con la C1, y a 238 mg GAE/100 g con la C2. La variación y disposición de los compuestos fenólicos en las formulaciones pueden atribuirse a diferencias en las condiciones de extrusión empleadas, así como a la diferencia en el tamaño de las partículas que facilitan su extracción (Zhang et al., 2018). Altan et al. (2009) mencionan que la alta temperatura empleada en la extrusión puede alterar la estructura molecular de los compuestos fenólicos, reduciendo su reactividad química o su extracción, produciendo pérdida de su propiedad antioxidante.

4.5.2. Capacidad antioxidante ABTS+ y DPPH

El mayor valor de TPC encontrado en la M2, en comparación con las otras formulaciones crudas (tabla 5), nos permitió determinar una mayor actividad antioxidante, con valores de 13,2 $\mu\text{mol TE/g}$ en ABTS+ y 9,94 $\mu\text{mol TE/g}$ en DPPH. Que, tras el proceso de extrusión, esos valores con la C1 se redujeron a 11,62 $\mu\text{mol TE/g}$ en ABTS+, a 5,76 $\mu\text{mol TE/g}$ DPPH y con la C2, a 10,92 $\mu\text{mol TE/g}$ en ABTS+ y a 5,29 $\mu\text{mol TE/g}$ DPPH. La influencia de los parámetros empleados en las condiciones de extrusión redujo la propiedad antioxidante. Al respecto Altan et al. (2009), mencionan que la desventaja de los antioxidantes naturales es su baja resistencia a altas temperaturas, y que el calentamiento a más de 80°C, destruye sus propiedades antioxidantes, atribuido a la evaporación como descomposición a temperaturas

elevadas. Asimismo, Patil and Kaur (2018) mencionan en un estudio realizado con arroz integral que el aumento de la temperatura en la extrusión disminuyó el contenido fenólico total y la actividad antioxidante.

Tabla 3. Contenido de polifenoles totales (CPT), actividad antioxidante (ABTS+ y DPPH), en las harinas integrales de cereales y legumbres, harina integral mezclada no extrusionada y extrusionada.

Muestra	Condición	TPC	ABTS+	DPPH
PR	RF	19,37 ± 1,01 ^d	1,86 ± 0,10 ^d	-
PM	RF	296,42 ± 4,64 ^b	6,98 ± 0,15 ^b	-
CP	RF	60,25 ± 1,78 ^c	3,06 ± 0,15 ^c	-
CB	RF	508,35 ± 7,59 ^a	18,43 ± 0,14 ^a	-
M1	SE	102,53 ± 1,52 ^c	4,39 ± 0,39 ^c	-
M2	SE	284,91 ± 20,22 ^a	13,20 ± 1,00 ^a	9,94 ± 0,75 ^a
M3	SE	139,85 ± 6,59 ^b	4,19 ± 0,05 ^c	-
M4	SE	134,00 ± 2,11 ^b	5,51 ± 0,09 ^b	-
M2	C1	273,00 ± 11,11 ^a	11,62 ± 0,60 ^a	5,76 ± 0,44 ^b
M2	C2	238,31 ± 15,23 ^b	10,92 ± 0,23 ^b	5,29 ± 0,68 ^b

PR: Arroz parbolizado integral; PM: Mijo perla; CP: garbanzo; CB: judías cariocas; RF: harina cruda; SE: sin extruir; C1:300 r.p.m. 30%H°; C2: 600 r.p.m.18%H°; M1: Arroz parbolizado integral (60), mijo perla (15), garbanzo (15), judías cariocas (10); M2: Arroz parbolizado integral (15), mijo perla (60), garbanzo (15), judías cariocas (10); M3: Arroz parbolizado integral (15), mijo perla (15), garbanzo (60), judías cariocas (10); M4: Arroz parbolizado integral (30), mijo perla (30), garbanzo (30), judías cariocas (10); CTP, contenido total de polifenoles;

V. CONCLUSIONES

- En la obtención de las harinas integrales precocidas, los valores de torque con la C2 (18 % de humedad y 600 rpm de velocidad del tornillo) fueron superiores a la C1 (30 % de humedad y 300 rpm de velocidad del tornillo). La energía mecánica específica (EME) fue inferior en la C1 que en la C2.
- La densidad aparente (DA) varió de 0,39 a 0,53 g/cm³ en las formulaciones de harinas crudas (HC), donde la M1 (mayor contenido de arroz parbolizado integral) tuvo el mayor valor, seguido de valores similares en la M2 y la M4 con el menor valor en M3 (mayor porcentaje de garbanzo). En las harinas extruidas, la influencia de las condiciones de extrusión (C1 y C2) sobre los valores de la DA en las M1, M2 y M4 en las dos condiciones fue estadísticamente igual. Mientras que, con la M3 (mayor porcentaje de garbanzo), los valores de DA en C1 fueron superiores a C2. En la evaluación de la distribución del tamaño de partículas de las HC, los mayores tamaños se encontraron en las formulaciones con mayor contenido de cereales (M1, M2 y M4) y partículas más pequeñas en la M3 (70 % de legumbres). Y para las harinas extruidas se observó que, con influencia de la C1, presentaron partículas de mayores tamaños con la M1, mientras que, con influencia de la C2, en la M4. En la determinación del color, la cocción por extrusión produjo cambios en el color de la harina, reduciendo los valores de luminosidad (L*) y aumentando los de cromaticidad (a* y b*), indicando oscurecimiento de las harinas tras el proceso de extrusión.
- El índice de absorción de agua (IAA) y el índice de solubilidad en agua (ISA), aumentaron tras el proceso de extrusión, con algunas excepciones en C1 con el ISA. Mientras que el índice de absorción de aceite (IAO), tuvo una reducción significativa con la influencia de las condiciones usadas tras la extrusión.
- En el análisis del perfil de viscosidad de pasta (RVA) de las harinas crudas y extruidas obtenidas con las condiciones de extrusión suave y severa, observándose una reducción de los valores de viscosidad tras el proceso de extrusión, y mayor daño en los gránulos de almidón con la C2.
- En el contenido de polifenoles totales (CPT) y las propiedades antioxidantes (ABTS y DPPH) de las harinas mezcladas sin extruir y en las harinas precocidas obtenidas por condiciones de extrusión suave y severa, el mijo y la alubia carioca aportaron compuestos fenólicos a M2, obteniendo mayor contenido de polifenoles totales y actividad antioxidante, cuyos valores se redujeron mínimamente tras la extrusión.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

Realizar la optimización de la combinación de harina de cereales integrales (mijo perla) y legumbres como una alternativa de consumos de harinas libres de gluten, basándose en la función del contenido fenólico que pueden aportar tanto el mijo perla como el frijol pinto (carioca).

Realizar estudios de cocción por extrusión con temperaturas inferiores a 130 °C, debido a la pérdida de las propiedades antioxidantes por influencia del uso de elevadas temperaturas, sugiriéndose como estrategia para la producción de harina precocida con mayor contenido fenólico, actividad antioxidante y potenciales beneficios para la salud.

Aplicación de la harina precocida obtenida en la elaboración de productos de panificación, uso como ingrediente, usándolo como harina para empanado o uso en la producción de Nuggets.

Evaluar la estabilidad y la vida útil como ingrediente para la elaboración de diferentes productos.

Evaluar el efecto del proceso de extrusión sobre la digestibilidad de los almidones y proteínas.

Evaluar la solubilidad proteica para ser usada en sistemas alimentarios como productos de panificación y bebidas.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AOAC (2000) Official Methods of Analysis. 17th Edition, The Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg, MD, USA.
- Alam, M. S., Kaur, J., Khaira, H., & Gupta, K. (2016). Extrusion and Extruded Products: Changes in Quality Attributes as Affected by Extrusion Process Parameters: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(3), 445-473. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.779568>
- Alemayehu, H., Emire, S. A., & Henry, C. (2019). Effects of extrusion process parameters on the quality properties of ready-to-eat pulse-based snacks. *Cogent Food & Agriculture*, 5(1), 1641903-1641903. <https://doi.org/10.1080/23311932.2019.1641903>
- Ali, S., Singh, B., & Sharma, S. (2017). Development of high-quality weaning food based on maize and chickpea by twin-screw extrusion process for low-income populations. *Journal of Food Process Engineering*, 40(3), e12500. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jfpe.12500>
- Allai, F. M., Junaid, P. M., Azad, Z. R. A. A., Gul, K., Dar, B. N., Siddiqui, S. A., & Manuel Loenzo, J. (2023). Impact of moisture content on microstructural, thermal, and techno-functional characteristics of extruded whole-grain-based breakfast cereal enriched with Indian horse chestnut flour. *Food Chemistry: X*, 20, 100959. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100959>
- Altaf, U., Hussain, S. Z., Qadri, T., Iftikhar, F., Naseer, B., & Rather, A. H. (2021). Investigation on mild extrusion cooking for development of snacks using rice and chickpea flour blends. *Journal of Food Science and Technology*, 58(3), 1143-1155. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04628-7>
- Altan, A., McCarthy, K. L., & Maskan, M. (2009). Effect of extrusion process on antioxidant activity, total phenolics and β -glucan content of extrudates developed from barley-fruit and vegetable by-products. *International Journal of Food Science & Technology*, 44(6), 1263-1271. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2009.01956.x>
- Alves, J., Rodrigues, A., Moro, K., Boeira, C., Londero, P., & Rosa, C. J. I. F. R. J. (2019). Chemical characterization, bioactive compounds, and functional technological properties of flour from two cultivars of landrace common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). 26(2).

- Anberbir, S. M., Satheesh, N., Abera, A. A., Kassa, M. G., Tenagashaw, M. W., Asres, D. T., . . . Yehuala, T. F. (2024). Evaluation of nutritional composition, functional and pasting properties of pearl millet, teff, and buckwheat grain composite flour. *Applied Food Research*, 4(1), 100390. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.afres.2024.100390>
- Angelova, T., Goranova, Z., Petrova, T., & Penov, N. (2021). Effect of selected parameters on sectional expansion index and bulk density during the extrusion of chickpea instant semolina. *Food Science and Technology*, 15. <https://doi.org/10.15673/fst.v15i2.2107>
- Arab, E., Helmy, I., & Bareh, G. (2010). Nutritional Evaluation and Functional Properties of Chickpea (*Cicer arietinum* L.) Flour and the Improvement of Spaghetti Produced from its. *Journal of American Science Journal of American Science*, 66, 1055-1072.
- Awol, S. J., Kidane, S. W., & Bultosa, G. (2024). The effect of extrusion condition and blend proportion on the physicochemical and sensory attributes of teff-soybean composite flour gluten free extrudates. *Measurement: Food*, 13, 100120. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.meafoo.2023.100120>
- Azeem, M., Mu, T.-H., & Zhang, M. (2021). Influence of particle size distribution on nutritional composition, microstructural and antioxidant properties of orange and purple-fleshed sweet potato flour. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(4), e15283. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jfpp.15283>
- Bento, J. A. C., Morais, D. K., de Berse, R. S., Bassinello, P. Z., Caliari, M., & Soares Júnior, M. S. (2022). Functional, thermal, and pasting properties of cooked carioca bean (*Phaseolus vulgaris* L.) flours. *Applied Food Research*, 2(1), 100027. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.afres.2021.100027>
- Boakye, P. G., Okyere, A. Y., Bharathi, R., Murai, T., & Annor, G. A. (2023). Physicochemical and nutritional properties of extruded products from cereals of the Triticeae tribe – A review. *Food Chemistry Advances*, 3, 100379. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100379>
- Bouchard, J., Malalgoda, M., Storsley, J., Malunga, L., Netticadan, T., & Thandapilly, S. J. (2022). Health Benefits of Cereal Grain- and Pulse-Derived Proteins. 27(12), 3746. <https://www.mdpi.com/1420-3049/27/12/3746>
- Boye, J., Zare, F., & Pletch, A. (2010). Pulse proteins: Processing, characterization, functional properties and applications in food and feed. *Food Research International*, 43(2), 414-431. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.09.003>

- Broughton, W. J., Hernández, G., Blair, M., Beebe, S., Gepts, P., & Vanderleyden, J. (2003). Beans (*Phaseolus* spp.) – model food legumes. *Plant and Soil*, 252(1), 55-128. <https://doi.org/10.1023/A:1024146710611>
- Cappa, C., Masseroni, L., Ng, P., & Alamprese, C. (2020). Effect of extrusion conditions on the physical and chemical properties of bean powders. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14608>
- Carla Dors, G., Bierhals, V. d. S., & Badiale-Furlong, E. (2011). Parboiled rice: chemical composition and the occurrence of mycotoxins. 31, 172-177. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612011000100025>
- Carvalho, C. W. P., Takeiti, C. Y., Onwulata, C. I., & Pordesimo, L. O. (2010). Relative effect of particle size on the physical properties of corn meal extrudates: Effect of particle size on the extrusion of corn meal. *Journal of Food Engineering*, 98(1), 103-109. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.12.015>
- Choton, S., Gupta, N., Bandral, J. D., Anjum, N., & Choudary, A. (2020). Extrusion technology and its application in food processing: A review. 9, 162-168. <https://doi.org/10.22271/tpi.2020.v9.i2d.4367>
- Ciudad-Mulero, M., Morales, P., Cámara, M., & Fernández-Ruiz, V. (2022). Acceptance of New Formulations of Extruded Gluten Free Snacks Based on Pulse Flours by Spanish Millennial Consumers. 14(5), 3083. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/5/3083>
- Comettant-Rabanal, R., Hidalgo Chávez, D. W., Ascheri, J. L. R., Elías-Peñañiel, C., & Carvalho, C. W. P. (2023). Functionality of pre-cooked whole-grain corn, rice and sorghum flours for gluten-free bread. *International Journal of Food Science & Technology*, 58(11), 5781-5795. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/ijfs.16676>
- Cotacallapa-Sucapuca, M., Vega, E. N., Maievas, H. A., Berrios, J. D. J., Morales, P., Fernández-Ruiz, V., & Cámara, M. (2021). Extrusion Process as an Alternative to Improve Pulses Products Consumption. A Review., 10. <https://doi.org/10.3390/foods10051096>
- Cristiano, M. C., Froiio, F., Costanzo, N., Poerio, A., Lugli, M., Fresta, M., . . . Paolino, D. (2019). Effects of flour mean particle size, size distribution and water content on rheological properties of wheat flour doughs. *European Food Research and Technology*, 245(9), 2053-2062. <https://doi.org/10.1007/s00217-019-03315-y>
- Dalbhat, C. G., Mahato, D. K., & Mishra, H. N. (2019). Effect of extrusion processing on physicochemical, functional and nutritional characteristics of rice and rice-based

- products: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 85, 226-240. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.01.001>
- Dalbhat, C. G., & Mishra, H. N. (2019). Effects of extrusion process conditions on system parameters; physicochemical properties and cooking characteristics of extruded fortified rice kernels. *Journal of Cereal Science*, 89, 102782. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.05.016>
- Dias-Martins, A. M., Pessanha, K. L. F., Pacheco, S., Rodrigues, J. A. S., & Carvalho, C. W. P. (2018). Potential use of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) in Brazil: Food security, processing, health benefits and nutritional products. *Food Research International*, 109, 175-186. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.04.023>
- Ding, J., Hu, H., Yang, J., Wu, T., Sun, X., Fang, Y., & Huang, Q. (2023). Mechanistic study of the impact of germinated brown rice flour on gluten network formation, dough properties and bread quality. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 83, 103217. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103217>
- Doğan, H., & Karwe, M. V. (2003). Physicochemical Properties of Quinoa Extrudates. *Food Science and Technology International*, 9(2), 101-114. <https://doi.org/10.1177/1082013203009002006>
- Downs, B., Skrzypczak, K., Richter, J. K., Krajka, T., Ikuse, M., Bernin, J. B., & Ganjyal, G. M. (2023). Influence of legume-derived proteins with varying solubility on the direct expansion of corn starch during twin-screw extrusion processing. *Journal of Food Science*, 88(10), 4169-4179. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/1750-3841.16730>
- Duguma, H. T., Forsido, S. F., Belachew, T., & Hensel, O. (2021). Changes in Anti-nutritional Factors and Functional Properties of Extruded Composite Flour [Original Research]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.713701>
- Gallagher, E., Gormley, T. R., & Arendt, E. K. (2004). Recent advances in the formulation of gluten-free cereal-based products. *Trends in Food Science & Technology*, 15(3), 143-152. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2003.09.012>
- Guldiken, B., Yovchev, A., Nosworthy, M. G., Stone, A. K., House, J. D., Hood-Niefer, S., & Nickerson, M. T. (2020). Effect of extrusion conditions on the physical properties of desi chickpea-barley extrudates and quality attributes of their resulting flours. *51*, 300-307. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jtxs.12470>
- Jabeen, A., Naik, H. R., Jan, N., Hussain, S. Z., Shafi, F., & Amin, T. (2021). Numerical optimization of process parameters of water chestnut flour incorporated corn-based

- extrudates: Characterizing physicochemical, nutraceutical, and storage stability of the developed product. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(7), e15569. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jfpp.15569>
- Jain, R., & Goomer, S. (2023). Understanding extrusion technology for cereal–pulse blends: A review. *Cogent Food & Agriculture*, 9(1), 2253714. <https://doi.org/10.1080/23311932.2023.2253714>
- Kahraman, G., Harsa, S., Lucisano, M., & Cappa, C. (2018). Physicochemical and rheological properties of rice-based gluten-free blends containing differently treated chickpea flours. *LWT*, 98, 276-282. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.08.040>
- Kamalakanth, K., Bindu, J., Bijith, K., Ravishankar, C., & Gopal, T. (2013). Development and comparison of extruded breading with conventional bread crumbs for coating fish balls. *Indian Journal of Fisheries*, 60, 129-134.
- Kharat, S., Medina-Meza, I. G., Kowalski, R. J., Hosamani, A., C.T, R., Hiregoudar, S., & Ganjyal, G. M. (2019). Extrusion processing characteristics of whole grain flours of select major millets (foxtail, finger, and pearl). *Food and Bioproducts Processing*, 114, 60-71. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fbp.2018.07.002>
- Kiosseoglou, V., Paraskevopoulou, A., & Poojary, M. M. (2021). Chapter 6 - Functional and physicochemical properties of pulse proteins. In B. K. Tiwari, A. Gowen, & B. McKenna (Eds.), *Pulse Foods (Second Edition)* (pp. 113-146). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818184-3.00006-4>
- Kishor, K., David, J., Tiwari, S., Singh, A., & Rai, B. S. J. I. j. o. c. s. (2017). Nutritional composition of chickpea (*Cicer arietinum*) milk. 5(4), 1941-1944.
- Ladjal Ettoumi, Y., & Mohamed, C. (2015). Some physicochemical and functional properties of pea, chickpea and lentil whole flours. *International Food Research Journal*, 22, 987-996.
- Lagnika, C., Houssou, P. A., Dansou, V., Hotegni, A. B., Amoussa, A. M. O., Kpotouhedo, F. Y., . . . Lagnika, L. (2019). Physico-functional and sensory properties of flour and bread made from composite wheat-cassava. *Pakistan Journal of Nutrition*, 18(6), 538-547.
- Lazou, A., & Krokida, M. (2010). Functional properties of corn and corn–lentil extrudates. *Food Research International*, 43(2), 609-616. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.09.017>
- Liu, Y., Shen, W., Jin, W., Li, F., Chen, X., Jia, X., & Cai, H. (2024). Physicochemical characterization of a composite flour: Blending purple sweet potato and rice flours.

- Food Chemistry*, *X*, *22*, 101493.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101493>
- Mamat, H., Masri, N., H., N., Zainol, K., & Akanda, M. J. (2020). Functional properties of composite flour: a review. *4*, 1820-1831. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.4\(6\).419](https://doi.org/10.26656/fr.2017.4(6).419)
- Marinangeli, C. P. F. (2022). The Special Issue on “The Nutritional Value of Pulses and Whole Grains”: A Continued Endeavor to Delineate Their Benefits for Today and Addressing the Challenges of the Future. *14*, 3381. <https://doi.org/10.3390/nu14163381>
- Messina, V., Skylas, D. J., Roberts, T. H., Valtchev, P., Whiteway, C., Li, Z., . . . Kaiser, B. N. (2025). Pulse Proteins: Processing, Nutrition, and Functionality in Foods. *Foods*, *14*(7), 1151.
- Mir, S. A., Bosco, S. J. D., & Shah, M. A. (2019). Technological and nutritional properties of gluten-free snacks based on brown rice and chestnut flour. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, *18*(1), 89-94.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jssas.2017.02.002>
- Muchlisyyah, J., Shamsudin, R., Kadir Basha, R., Shukri, R., How, S., Niranjana, K., & Onwude, D. (2023). Parboiled Rice Processing Method, Rice Quality, Health Benefits, Environment, and Future Perspectives: A Review. *Agriculture*, *13*(7), 1390.
<https://www.mdpi.com/2077-0472/13/7/1390>
- Muñoz-Pabon, K. S., Parra-Polanco, A. S., Roa-Acosta, D. F., Hoyos-Concha, J. L., & Bravo-Gomez, J. E. (2022). Physical and Paste Properties Comparison of Four Snacks Produced by High Protein Quinoa Flour Extrusion Cooking [Original Research]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *6*. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.852224>
- Nagai, N. F., Argel, N. S., & Andrés, S. C. (2022). Physicochemical characterization and functional properties of flours from North-western Argentina bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars. *99*(4), 850-859. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/cche.10541>
- Oli, P., Ward, R., Adhikari, B., & Torley, P. (2014). Parboiled rice: Understanding from a materials science approach. *Journal of Food Engineering*, *124*, 173-183.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.09.010>
- Oliveira, L. C., Barros, J. H. T., Rosell, C. M., & Steel, C. J. (2017). Physical and thermal properties and X-ray diffraction of corn flour systems as affected by whole grain wheat flour and extrusion conditions. *Starch - Stärke*, *69*(9-10), 1600299.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/star.201600299>

- Oomah, B. D., Corbé, A., & Balasubramanian, P. (2010). Antioxidant and Anti-inflammatory Activities of Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Hulls. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58, 8225-8230. <https://doi.org/10.1021/jf1011193>
- Pasqualone, A., Costantini, M., Coldea, T. E., & Summo, C. (2020). Use of Legumes in Extrusion Cooking: A Review. *Foods*, 9(7), 958. <https://www.mdpi.com/2304-8158/9/7/958>
- Patil, S. S., & Kaur, C. (2018). Current trends in extrusion: Development of functional foods and novel ingredients. *Food Science and Technology Research*, 24(1), 23-34.
- Pessanha, K. L. F., Menezes, J. P. d., Silva, A. d. A., Ferreira, M. V. d. S., Takeiti, C. Y., & Carvalho, C. W. P. (2021). Impact of whole millet extruded flour on the physicochemical properties and antihyperglycemic activity of gluten free bread. *147*, 111495. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.111495>
- Pessanha, K. L. F., Santos, M. B., de Grandi Castro Freitas-Sá, D., Takeiti, C. Y., & Carvalho, C. W. P. (2023). Impact of whole millet extruded flour on the physicochemical properties and antihyperglycemic activity of gluten free pasta. *Journal of Food Science and Technology*, 60(6), 1738-1748. <https://doi.org/10.1007/s13197-023-05714-2>
- Pismag, R. Y., Polo, M. P., Hoyos, J. L., Bravo, J. E., & Roa, D. F. (2023). Effect of extrusion cooking on the chemical and nutritional properties of instant flours: a review., *12*, 1356. <https://doi.org/10.12688/f1000research.140748.1>
- Possik, P. A., Finardi Filho, F., Francisco, A. d., & Luiz, M. T. B. (2005). Alimentos sem glúten no controle da doença celíaca. *Nutrire Rev. Soc. Bras. Aliment. Nutr.*, 29(1519-8928), 64-74.
- Qadir, N., & Wani, I. A. (2023). Functional properties, antioxidant activity and in-vitro digestibility characteristics of brown and polished rice flours of Indian temperate region. *Grain & Oil Science and Technology*, 6(1), 43-57. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gaost.2022.12.001>
- Raza, H., Ameer, K., Zaaboul, F., Sharif, H. R., Ali, B., Shoaib, M., . . . Zhang, L. (2019). Effects of ball-milling on physicochemical, thermal and functional properties of extruded chickpea (*Cicer arietinum* L.) powder. *CyTA - Journal of Food*, 17(1), 563-573. <https://doi.org/10.1080/19476337.2019.1617352>
- Rico, D., Cano, A. B., & Martín-Diana, A. B. (2021). Pulse-Cereal Blend Extrusion for Improving the Antioxidant Properties of a Gluten-Free Flour., *26*. <https://doi.org/10.3390/molecules26185578>

- Sharma, C., Singh, B., Hussain, S. Z., & Sharma, S. (2017). Investigation of process and product parameters for physicochemical properties of rice and mung bean (*Vigna radiata*) flour based extruded snacks. *Journal of Food Science and Technology*, *54*(6), 1711-1720. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2606-8>
- Silva, E. M. M. d., Ascheri, J. L. R., Carvalho, C. W. P. d., Takeiti, C. Y., & Berrios, J. d. J. (2014). Physical characteristics of extrudates from corn flour and dehulled carioca bean flour blend. *LWT - Food Science and Technology*, *58*(2), 620-626. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.03.031>
- Singh, B., Singh, J. P., Kaur, A., & Singh, N. (2017). Phenolic composition and antioxidant potential of grain legume seeds: A review. *Food Research International*, *101*, 1-16. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.09.026>
- Singh, R., & Koksel, F. (2021). Effects of particle size distribution and processing conditions on the techno-functional properties of extruded soybean meal. *LWT*, *152*, 112321. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112321>
- Sobowale, S. S., Kewuyemi, Y. O., & Olayanju, A. T. (2021). Process optimization of extrusion variables and effects on some quality and sensory characteristics of extruded snacks from whole pearl millet-based flour. *SN Applied Sciences*, *3*(10), 824. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04808-w>
- Sotelo-Díaz, L. I., Igual, M., Martínez-Monzó, J., & García-Segovia, P. (2023). Techno-Functional Properties of Corn Flour with Cowpea (*Vigna unguiculata*) Powders Obtained by Extrusion. *Foods*, *12*(2), 298. <https://www.mdpi.com/2304-8158/12/2/298>
- Sousa, E., Pessoa, H., Rocha, K., Caldeira, R., Freitas, S., & Rangel Guimarães, R. (2021). Massa de empada sem glúten: Efeito da combinação de grão de bico e farinha de linhaça nas características nutricionais e sensoriais. *Research, Society and Development*, *10*, e11010816971. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i8.16971>
- Srinivas JR, T. A. (2014). Physio-Chemical and Sensory Properties of Protein-Fortified Extruded Breakfast Cereal/Snack Formulated to Combat Protein Malnutrition in Developing Countries. *05*. <https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000359>
- Tiwari, A., & Jha, S. (2017). Extrusion cooking technology: Principal mechanism and effect on direct expanded snacks—An overview. *International Journal of Food Studies*, *6*(1).
- Vargas-Solórzano, J. W., Ascheri, J. L. R., Carvalho, C. W. P., Takeiti, C. Y., & Galdeano, M. C. (2020). Impact of the Pretreatment of Grains on the Interparticle Porosity of Feed Material and the Torque Supplied During the Extrusion of Brown Rice. *Food and Bioprocess Technology*, *13*(1), 88-100. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02379-8>

- Vargas-Solórzano, J. W., Carvalho, C. W. P., Takeiti, C. Y., Ascheri, J. L. R., & Queiroz, V. A. V. (2014). Physicochemical properties of expanded extrudates from colored sorghum genotypes. *Food Research International*, 55, 37-44. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2013.10.023>
- Vieira, N. R. d. A. (2004). Qualidade de grãos e padrões de classificação de arroz. 25(222), 94-100. <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/212774>
- Yadav, G. P., Dalbhagat, C. G., & Mishra, H. N. (2022). Effects of extrusion process parameters on cooking characteristics and physicochemical, textural, thermal, pasting, microstructure, and nutritional properties of millet-based extruded products: A review. *Journal of Food Process Engineering*, 45(9), e14106. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jfpe.14106>
- Yi, C., Qiang, N., Zhu, H., Xiao, Q., & Li, Z. (2022). Extrusion processing: A strategy for improving the functional components, physicochemical properties, and health benefits of whole grains. *160*, 111681. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2022.111681>
- Zhang, R., Khan, S. A., Chi, J., Wei, Z., Zhang, Y., Deng, Y., . . . Zhang, M. (2018). Different effects of extrusion on the phenolic profiles and antioxidant activity in milled fractions of brown rice. *LWT*, 88, 64-70. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.09.042>

ANEXOS

Anexo 1. Proceso de extrusión termoplástica en la extrusora Clextral de doble tornillo.



Imagen 1. Extrusora Clextral para el proceso de extrusión termoplástica.



Imagen 2. Monitoreo y manipulación de los extruidos.

Anexo 2. Proceso de recolección de los extruidos en bandejas metálicas enmalladas para el proceso de secado.



Imagen 04. Recepción de los extruidos en bandejas de metal enmalladas para el secado.



Imagen 05. Secado de los extruidos en estufa con circulación de aire caliente.

Anexo 3. Imágenes de los extruidos por cada tratamiento.**T1****M1 - C1****T2****M1 - C2****T3****M2 - C1****T4****M2 - C2**

T5



M3 - C1

T6



M3 - C2

T7



M4 - C1

T8



M4 - C2

Anexo 4. Proceso de obtención de las harinas extruidas mediante la molienda de los extruidos.

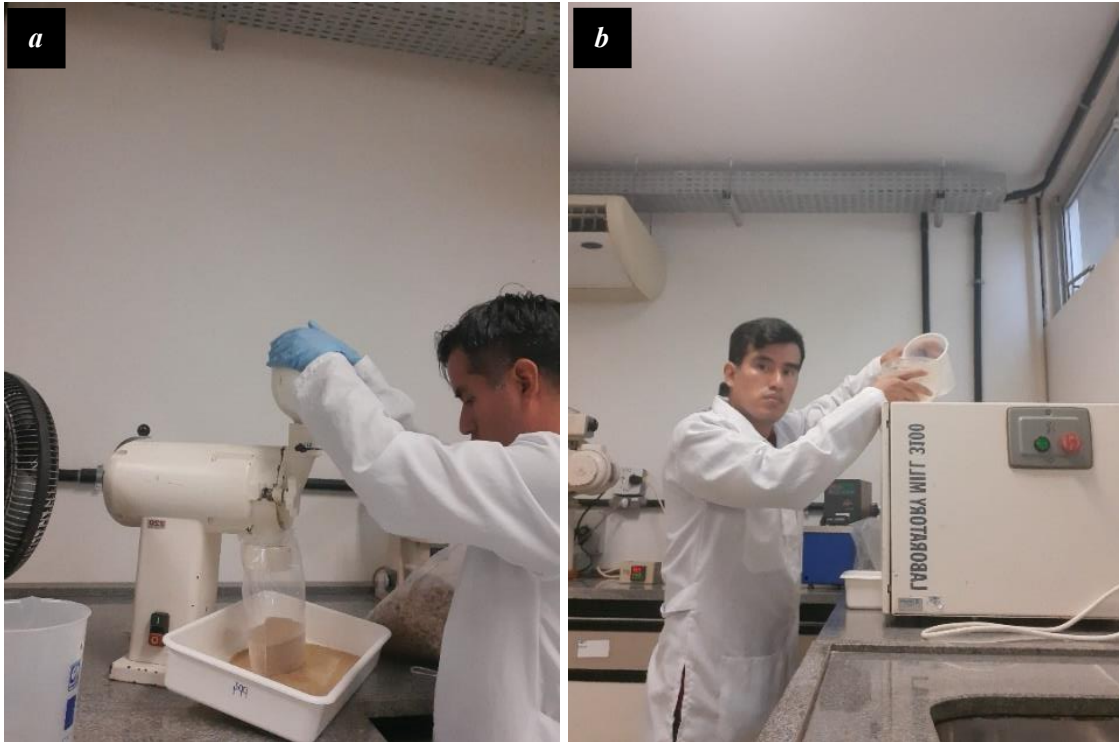


Imagen 06. Molienda de los extruidos en molino de discos (a), molienda en el molino de martillos para obtención de la harina fina (b).

Anexo 5. Determinación de la densidad aparente de las harinas crudas y extruidas mediante dosificación másica.



Imagen 07. Densidad aparente por dosificación másica.

Anexo 6. Acondicionamiento de las harinas mediante tamizado con el equipo ROTAP para uniformizar las partículas a un tamaño de 106 a 212 μm y llevarlas a análisis.



Vista lateral izquierda



Vista lateral derecha

Anexo 7. Determinación de las propiedades tecno-funcionales de las harinas crudas y extruidas.

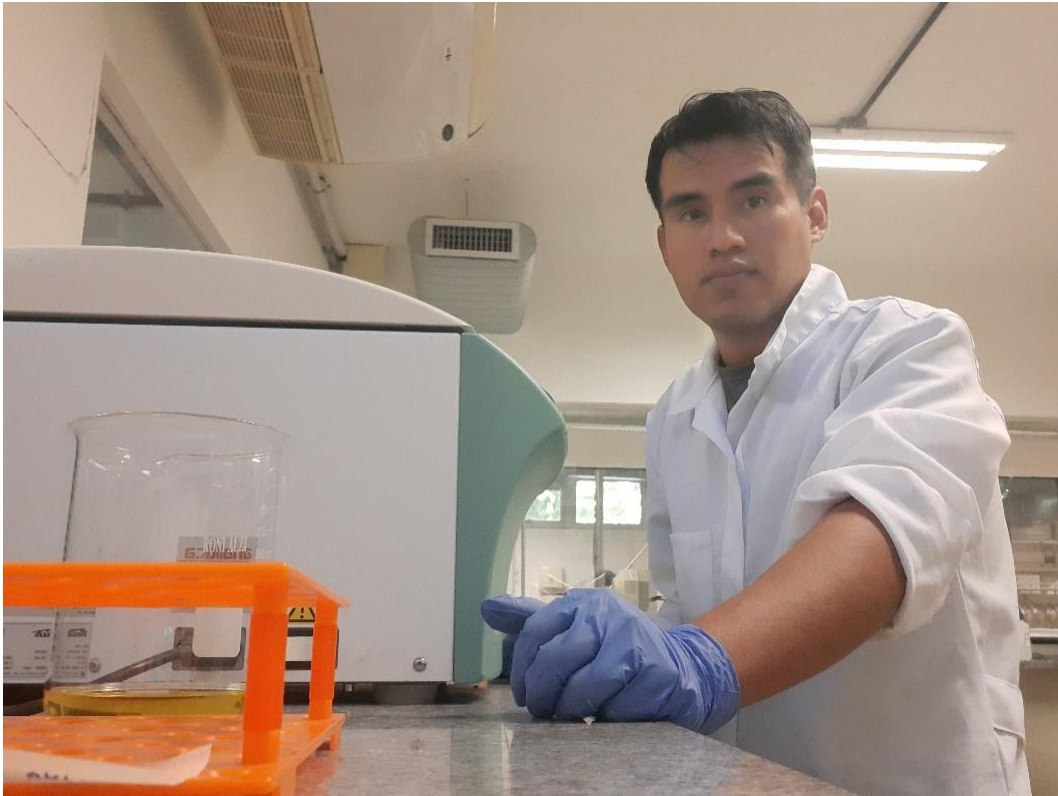


Imagen 08. Determinación de ISA, IAA e IAO por centrifugación.

Anexo 8. Evaluación de las propiedades reológicas de las harinas crudas y extruidas.



Imagen 09. Viscosidad de pasta de las harinas en el Rapid Viscosity Analyser (RVA).

Anexo 9. Efecto de las condiciones de extrusión en el torque generado en el proceso de obtención de las harinas mixtas extruidas.

Formulación	Condición	Torque (KJ)
M1	C1	16,55 ± 0,16Ab
M2	C1	13,13 ± 2,27Ab
M3	C1	12,82 ± 1,37Ab
M4	C1	15,22 ± 0,24Aa
M1	C2	21,74 ± 1,25Aa
M2	C2	19,28 ± 0,86ABa
M3	C2	15,86 ± 0,50Ba
M4	C2	17,96 ± 1,33BAa

M1-M4: Formulaciones con porcentaje de las harinas utilizadas de arroz parbolizado integral, Mijo perla, Garbanzo y Frijoles cariocas (M1: 60/15/15/10; M2: 15/60/15/10; M3: 15/15/60/10 y M4: 30/30/30/10).
C1 = 30 % y 300 rpm; C2 = 18 % y 600 rpm (Humedad del proceso y velocidad de rotación).

Anexo 10. Efecto de las condiciones de extrusión en la energía mecánica específica (EME) generada en el proceso de obtención de las harinas mixtas extruidas.

Formulación	Condición	EME (W.h/kg)
--------------------	------------------	---------------------

M1	C1	$73,37 \pm 0,66Ab$
M2	C1	$58,04 \pm 10,77Ab$
M3	C1	$56,81 \pm 4,98Ab$
M4	C1	$66,53 \pm 1,24Ab$
M1	C2	$208,60 \pm 15,32Aa$
M2	C2	$185,45 \pm 31,32ABa$
M3	C2	$151,64 \pm 14,17Ba$
M4	C2	$171,72 \pm 9,22BAa$

M1-M4: Formulaciones con porcentaje de las harinas utilizadas de arroz parbolizado integral, Mijo perla, Garbanzo y Frijoles cariocas (M1: 60/15/15/10; M2: 15/60/15/10; M3: 15/15/60/10 y M4: 30/30/30/10).
C1 = 30 % y 300 rpm; C2 = 18 % y 600 rpm (Humedad del proceso y velocidad de rotación).

Anexo 11. Determinación de la densidad aparente de las harinas mixtas crudas y extruidas.

Formulación	Condición	Densidad aparente
-------------	-----------	-------------------

M1	SE	$0,53 \pm 0,006a$
M2	SE	$0,49 \pm 0,004b$
M3	SE	$0,39 \pm 0,003c$
M4	SE	$0,49 \pm 0,005b$
M1	C1	$0,59 \pm 0,02Aa$
M2	C1	$0,55 \pm 0,02Ba$
M3	C1	$0,55 \pm 0,01Ba$
M4	C1	$0,59 \pm 0,00Aa$
M1	C2	$0,58 \pm 0,01Aa$
M2	C2	$0,55 \pm 0,01Aa$
M3	C2	$0,51 \pm 0,02Bb$
M4	C2	$0,57 \pm 0,02Aa$

M1-M4: Formulaciones con porcentaje de las harinas utilizadas de arroz parbolizado integral, Mijo perla, Garbanzo y Frijoles cariocas (M1: 60/15/15/10; M2: 15/60/15/10; M3: 15/15/60/10 y M4: 30/30/30/10).

SE: Sin extraer; C1: 30 % y 300 rpm; C2: 18 % y 600 rpm (Humedad del proceso y velocidad de rotación).

Anexo 12. Distribución del tamaño de las partículas de las harinas mixtas crudas y extruidas.

Muestra	Condición	D₁₀	D₅₀	D₉₀	D_(4,3)	D_(3,2)	Span
Sin Extruir							
M1	SE	30,40 ± 0,32a	204,70 ± 6,02b	530,07 ± 12,41b	722,70 ± 7,95b	606,08 ± 9,40b	2,44 ± 0,02c
M2	SE	26,09 ± 0,35b	174,17 ± 0,81c	496,33 ± 2,90c	706,21 ± 10,14b	585,42 ± 6,49b	2,70 ± 0,01b
M3	SE	19,22 ± 0,27c	64,21 ± 0,66d	259,00 ± 4,20d	335,56 ± 15,96c	288,72 ± 10,39c	3,73 ± 0,04a
M4	SE	26,65 ± 0,52b	249,27 ± 6,41a	656,93 ± 14,03a	1289,29 ± 54,39a	979,68 ± 49,75a	2,53 ± 0,12cb
Extruido							
M1	C1	33,5 ± 2,35Aa	139,47 ± 5,76Aa	287,03 ± 6,57Aa	339,73 ± 2,75Aa	293,88 ± 3,98Aa	1,82 ± 0,05Ba
M2	C1	27,22 ± 0,13Ba	110,27 ± 0,59Ba	233,28 ± 1,27Ba	262,62 ± 0,94Ba	231,53 ± 0,93Ba	1,87 ± 0,01Ba
M3	C1	22,32 ± 0,70Cb	118,27 ± 2,83Bb	272,13 ± 1,08Ab	337,50 ± 4,14Ab	288,37 ± 2,44Ab	2,11 ± 0,05Aa
M4	C1	27,04 ± 0,99Bb	106,83 ± 3,35Bb	229,02 ± 4,77Bb	260,66 ± 1,32Bb	228,91 ± 2,65Bb	1,89 ± 0,02Ba
M1	C2	33,22 ± 4,57Ba	120,47 ± 7,09Cb	234,10 ± 6,74Cb	258,91 ± 3,72Bb	229,48 ± 4,25Bb	1,67 ± 0,08Bb
M2	C2	27,47 ± 5,57Ca	109,8 ± 11,07Ca	240,17 ± 5,22Ca	282,01 ± 8,36Ba	244,46 ± 4,00Ba	1,94 ± 0,17Aa
M3	C2	28,08 ± 3,15Ca	145,42 ± 20,53Ba	303,18 ± 32,20Ba	359,83 ± 32,41Aa	312,31 ± 30,07Aa	1,90 ± 0,07Ab
M4	C2	48,63 ± 4,41Aa	182,92 ± 1,50Aa	329,25 ± 10,33Aa	374.63 ± 23.77Aa	328.58 ± 16.95Aa	1.53 ± 0.08Cb

D₁₀, Diámetro de partículas pequeñas; **D₅₀**, Diámetro de partículas medianos; **D₉₀**, Diámetro de partículas mayores; **D_(4,3)**, Diámetro medio volumétrico de partículas; **D_(3,2)**, Diámetro medio superficial de partículas;

M1-M4: Formulaciones con porcentaje de las harinas utilizadas de arroz parbolizado integral, Mijo perla, Garbanzo y Frijoles cariocas (M1: 60/15/15/10; M2: 15/60/15/10; M3: 15/15/60/10 y M4: 30/30/30/10). SE: Sin extruir; C1: 30 % y 300 rpm; C2: 18 % y 600 rpm (Humedad del proceso y velocidad de rotación).

Anexo 13. Determinación del índice de absorción de agua de harinas mixtas no extruidas y harinas extruidas.

Formulación	Extrusión	IAA (g agua/g muestra)
M1	SE	2,09 ± 0,11a
M2	SE	1,62 ± 0,04b
M3	SE	1,28 ± 0,06c
M4	SE	1,79 ± 0,03b
M1	C1	5,39 ± 0,21Aa
M2	C1	4,72 ± 0,23Ba
M3	C1	3,85 ± 0,25Ca
M4	C1	3,97 ± 0,05Ca
M1	C2	4,26 ± 0,03Ab
M2	C2	4,15 ± 0,15Ab
M3	C2	2,92 ± 0,07Bb
M4	C2	3,92 ± 0,05Aa

M1-M4: Formulaciones con porcentaje de las harinas utilizadas de arroz parbolizado integral, Mijo perla, Garbanzo y Frijoles cariocas (M1: 60/15/15/10; M2: 15/60/15/10; M3: 15/15/60/10 y M4: 30/30/30/10).
SE: Sin extruir; C1: 30 % y 300 rpm; C2: 18 % y 600 rpm (Humedad del proceso y velocidad de rotación).

Anexo 14. Determinación del índice de solubilidad en agua de harinas mixtas crudas y extruidas a base de cereales y legumbres.

Formulación	Extrusión	ISA (% de solidos solubles/g de muestra)
M1	SE	7,76 ± 0,16d
M2	SE	8,37 ± 0,02c
M3	SE	16,82 ± 0,13a
M4	SE	10,57 ± 0,03b
M1	C1	9,64 ± 0,12CBb
M2	C1	6,78 ± 0,90Cb
M3	C1	12,50 ± 0,68Ab
M4	C1	10,19 ± 0,24BAb
M1	C2	25,94 ± 0,24Aa
M2	C2	17,84 ± 1,43Ca
M3	C2	18,01 ± 0,84Ca
M4	C2	21,92 ± 0,63Ba

M1-M4: Formulaciones con porcentaje de las harinas utilizadas de arroz parbolizado integral, Mijo perla, Garbanzo y Frijoles cariocas (M1: 60/15/15/10; M2: 15/60/15/10; M3: 15/15/60/10 y M4: 30/30/30/10).
SE: Sin extruir; C1: 30 % y 300 rpm; C2: 18 % y 600 rpm (Humedad del proceso y velocidad de rotación).

Anexo 15. Determinación del índice de absorción de aceite de harinas mixtas crudas y harinas extruidas.

Formulación	Extrusión	Índice de absorción de aceite
M1	SE	1,43 ± 0,12b
M2	SE	1,31 ± 0,02b
M3	SE	1,72 ± 0,01a
M4	SE	1,46 ± 0,02ba
M1	C1	0,93 ± 0,01Ab
M2	C1	0,91 ± 0,01ABa
M3	C1	0,89 ± 0,01ABb
M4	C1	0,88 ± 0,01Ba
M1	C2	1,04 ± 0,02Aa
M2	C2	0,93 ± 0,01Aa
M3	C2	0,93 ± 0,01Ba
M4	C2	0,89 ± 0,00Ba

M1-M4: Formulaciones con porcentaje de las harinas utilizadas de arroz parbolizado integral, Mijo perla, Garbanzo y Frijoles cariocas (M1: 60/15/15/10; M2: 15/60/15/10; M3: 15/15/60/10 y M4: 30/30/30/10).
SE: Sin extruir; C1: 30 % y 300 rpm; C2: 18 % y 600 rpm (Humedad del proceso y velocidad de rotación).

Anexo 16. Determinación del color en el sistema CIELAB de harinas mixtas crudas y harinas extruidas bajo dos condiciones de extrusión.

Formulación	Condición	L*	a*	b*	ΔE
Sin extruir					
M1	SE	82,20 ± 0,30b	0,57 ± 0,02c	15,32 ± 0,45b	-
M2	SE	77,29 ± 0,48c	1,06 ± 0,02a	14,87 ± 0,88b	-
M3	SE	86,05 ± 0,38a	0,05 ± 0,02d	17,05 ± 0,24a	-
M4	SE	81,70 ± 0,28b	0,90 ± 0,03b	15,57 ± 0,22b	-
Primera condición					
M1	C1	82,70 ± 0,74Ba	0,77 ± 0,08Bb	16,46 ± 0,67Db	2,78 ± 0,33Bb
M2	C1	76,85 ± 0,42Da	1,19 ± 0,04Ab	17,44 ± 0,22Cb	3,74 ± 0,19Ab
M3	C1	83,41 ± 0,44Aa	0,19 ± 0,05Cb	20,09 ± 0,36Aa	4,07 ± 0,81Aa
M4	C1	80,00 ± 0,49Ca	0,85 ± 0,03Bb	18,66 ± 0,21Ba	3,42 ± 0,4ABb
Segunda condición					
M1	C2	82,01 ± 0,28Bb	1,48 ± 0,05Ba	17,93 ± 0,33Ca	1,55 ± 0,32Ca
M2	C2	76,55 ± 0,44Da	1,80 ± 0,07Aa	18,43 ± 0,26BCa	2,64 ± 0,27Ba
M3	C2	83,01 ± 0,32Aa	0,53 ± 0,02Da	19,71 ± 0,41Aa	4,03 ± 0,53Aa
M4	C2	80,44 ± 0,51Ca	1,38 ± 0,11Ca	18,67 ± 0,26Ba	3,56 ± 0,34Aa

For each parameter, different letters indicate significant differences at $p < 0.05$

M1-M4: Formulaciones con porcentaje de las harinas utilizadas de arroz parbolizado integral, Mijo perla, Garbanzo y Frijoles cariocas (M1: 60/15/15/10; M2: 15/60/15/10; M3: 15/15/60/10 y M4: 30/30/30/10).

SE: Sin extruir; C1: 30 % y 300 rpm; C2: 18 % y 600 rpm (Humedad del proceso y velocidad de rotación).

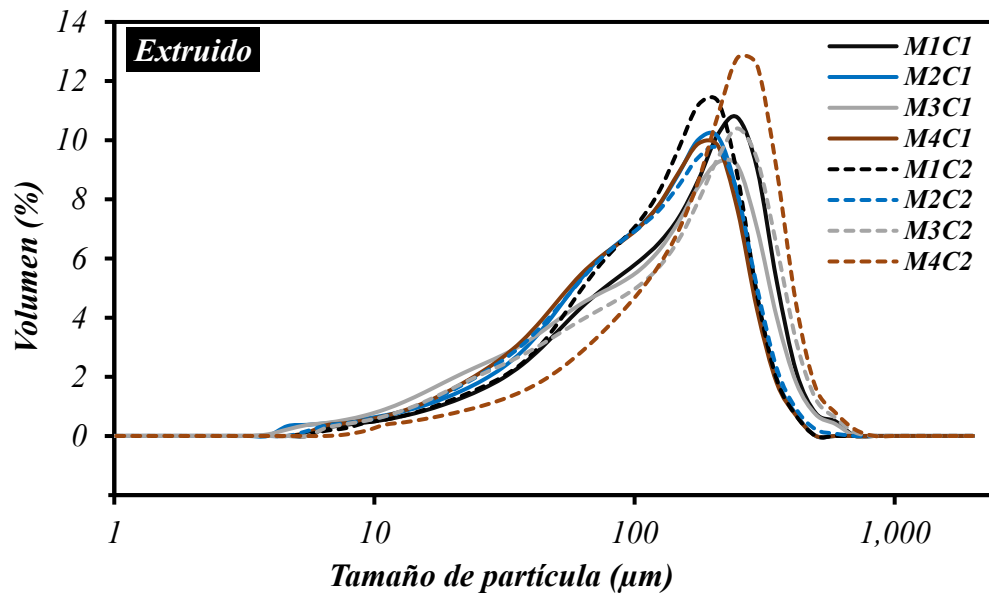
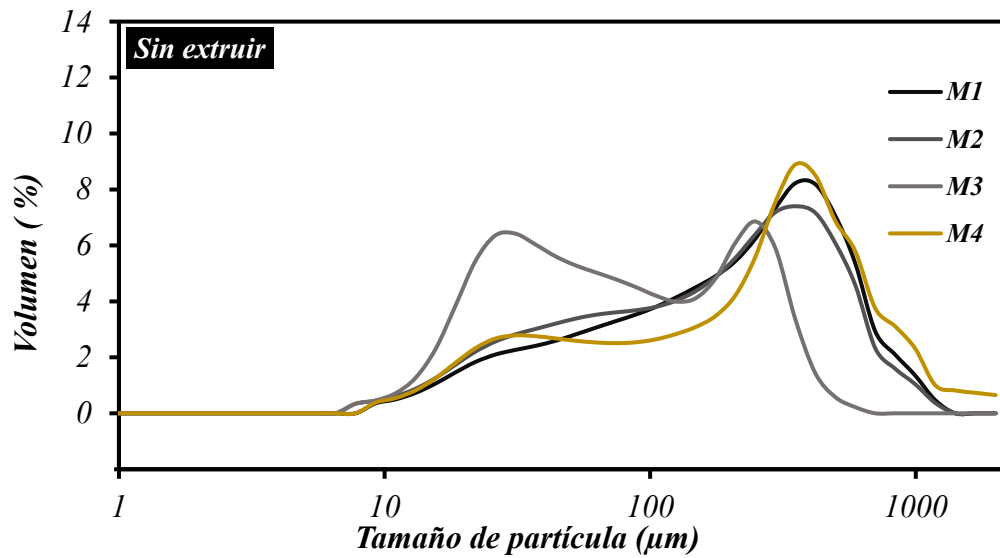
Anexo 17. Propiedades reológicas de las harinas integrales sin extruir y extruidas en dos condiciones de extrusión.

Muestra	Condición	TP	CV	PV	HS	BV	FV	SV
Sin extruir								
M1	SE	72,45 ± 1,55a	32,5 ± 2,50a	321,0 ± 6,00c	319,5 ± 5,50a	1,5 ± 0,5d	843,5 ± 10,5b	524,0 ± 5,0b
M2	SE	73,53 ± 1,13a	37,0 ± 7,00a	354,5 ± 3,50a	251,5 ± 2,50c	103,0 ± 1,0c	981,0 ± 4,0a	729,5 ± 6,5a
M3	SE	75,08 ± 0,42a	27,0 ± 3,00a	307,0 ± 2,00c	280,5 ± 1,50b	26,5 ± 0,5b	650,0 ± 4,0d	369,5 ± 2,5d
M4	SE	75,50 ± 0,00a	27,0 ± 3,00a	244,5 ± 2,50b	233,5 ± 4,50c	11,0 ± 2,0a	705,0 ± 5,0c	471,5 ± 0,5c
Extruido								
M1	C1	25,10 ± 0,00Aa	506,0 ± 5,66Aa	527,5 ± 9,19Aa	105,0 ± 0,00Ba	422,5 ± 9,19Aa	427,5 ± 6,36Ba	322,5 ± 6,36Ba
M2	C1	25,13 ± 0,04Aa	202,0 ± 5,66Cb	318,0 ± 1,41Da	86,0 ± 4,24Ca	232,0 ± 2,83Cb	279,0 ± 7,07Da	193,0 ± 11,31Da
M3	C1	25,10 ± 0,07Aa	208,5 ± 9,19Cb	419,5 ± 10,61Ba	170,0 ± 7,07Aa	249,5 ± 3,54Ca	546,0 ± 1,41Aa	376,0 ± 5,66Aa
M4	C1	25,18 ± 0,04Aa	273,0 ± 1,41Bb	371,0 ± 2,83Ca	82,0 ± 2,83Ca	289,0 ± 0,00Ba	309,0 ± 0,00Ca	227,0 ± 2,83Ca
M1	C2	25,15 ± 0,00Aa	401,5 ± 26,16Ab	393,5 ± 30,41Ab	47,0 ± 0,00Ab	346,5 ± 30,41Ab	127,0 ± 1,41Bb	80,0 ± 1,41Bb
M2	C2	25,18 ± 0,04Aa	329,5 ± 10,61Ba	313,5 ± 2,12Ba	49,0 ± 1,41Ab	264,5 ± 3,54Ba	102,5 ± 3,54Cb	53,5 ± 2,12Cb
M3	C2	25,13 ± 0,04Aa	250,5 ± 7,78Ca	222,0 ± 2,83Cb	36,0 ± 1,41Bb	186,0 ± 4,24Cb	156,0 ± 0,00Ab	120,0 ± 1,41Ab
M4	C2	25,20 ± 0,00Aa	301,5 ± 6,36Ba	280,5 ± 4,95Bb	23,5 ± 2,12Cb	257,0 ± 2,83Bb	104,5 ± 4,95Cb	81,0 ± 2,83Bb

M1-M4: Formulaciones con porcentaje de las harinas utilizadas de arroz parbolizado integral, Mijo perla, Garbanzo y Frijoles cariocas (M1: 60/15/15/10; M2: 15/60/15/10; M3: 15/15/60/10 y M4: 30/30/30/10). SE: Sin extruir; C1: 30 % y 300 rpm; C2: 18 % y 600 rpm (Humedad del proceso y velocidad de rotación).

TP: temperatura de la pasta (°C); CV: viscosidad en frío (cP); PV: viscosidad pico (cP); HS: fuerza de retención (cP); BV: viscosidad de rotura (cP); FV: viscosidad final (cP); SV: viscosidad de retrogradación (cP);

Anexo 18. Curvas de distribución granulométrica de harinas crudas y extruidas mezcladas a partir de harinas integrales y legumbres.



M1: Arroz parbolizado 60 %, mijo perla 15 %, garbanzos 15 %, alubias cariocas 10 %.

M2: Arroz parbolizado 15 %, mijo perla 60 %, garbanzos 15 %, alubias cariocas 10 %.

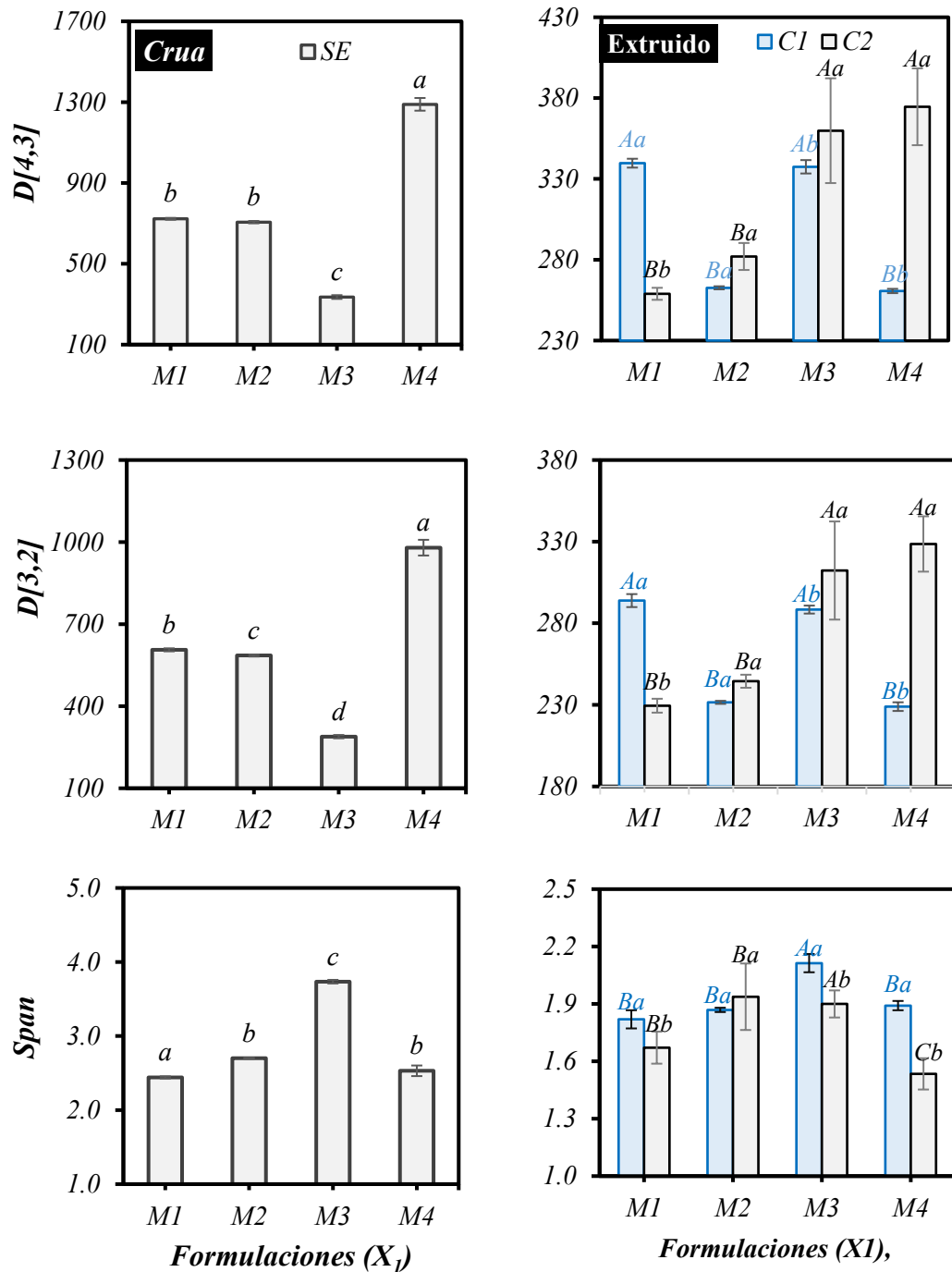
M3: Arroz parbolizado 15 %, mijo perla 15 %, garbanzos 60 %, alubias cariocas 10 %.

M4: Arroz parbolizado 30 %, mijo perla 30 %, garbanzos 30 %, alubias cariocas 10 %.

C1: Primera condición de extrusión (30 % de humedad, 300 rpm de velocidad del tornillo)

C2: Segunda condición de extrusión (18 % de humedad, 600 rpm de velocidad del tornillo)

Anexo 19. Gráficos de distribución granulométrica de los parámetros de volumen medio $D[4,3]$, superficie media $D[3,2]$ y valores de Span de las harinas crudas y extruidas mezcladas a partir de harinas integrales y legumbres.



M1: Arroz parbolizado 60 %, mijo perla 15 %, garbanzos 15 %, alubias cariocas 10 %.

M2: Arroz parbolizado 15 %, mijo perla 60 %, garbanzos 15 %, alubias cariocas 10 %.

M3: Arroz parbolizado 15 %, mijo perla 15 %, garbanzos 60 %, alubias cariocas 10 %.

M4: Arroz parbolizado 30 %, mijo perla 30 %, garbanzos 30 %, alubias cariocas 10 %.

C1: Primera condición de extrusión (30 % de humedad, 300 rpm de velocidad del tornillo)

C2: Segunda condición de extrusión (18 % de humedad, 600 rpm de velocidad del tornillo)

Anexo 20. Análisis de la varianza de los parámetros torque y EME del proceso de extrusión de harinas mixtas extruidas a partir de cereales integrales y legumbres.

variable	Fuente	SQ	Gl	QM	Fcal	Valor-p
Torque	Formulación	47,029	3	15,676	10,976	0,003299
	Extrusión	73,248	1	73,248	51,287	0,000096
	Formulación*Extrusión	8,244	3	2,748	1,924	0,204254
	Residuo	11,426	8	1,428		
	Total	139,947	15			
EME	Formulación	2736,2	3	912,1	4,437	0,040834
	Extrusión	53.513,4	1	53.513,4	260,349	0,000000
	Formulación*Extrusión	1.064,4	3	354,8	1,726	0,238644
	Residuo	1.644,4	8	205,5		
	Total	58.958,3	15			

SQ: suma de cuadrados; GL: grados de libertad; QM: cuadrado medio; Fcal: valor de la prueba F, valor de la probabilidad a un nivel de significación del 5 %.

Anexo 21. Análisis de la varianza de los parámetros de distribución granulométrica de harinas crudas mezcladas a partir de harinas integrales y legumbres.

Respuesta	Fuente	SQ	Gl	QM	Fcal	Valor-p
D10	Formulación	195,270	3	65,090	458,22	0,000000
	Residuo	1,136	8	0,142		
	Total	196,406	11			
D50	Formulación	55976,4	3	18.658,8	950,90	0,000000
	Residuo	157,0	8	19,6		
	Total	56133,4	11			
D90	Formulación	248385	3	82795	878,30	0,000000
	Residuo	754	8	94		
	Total	249140	11			
D[4.3]	Formulación	1393615	3	464538	549,950	0,000000
	Residuo	6758	8	845		
	Total	1400372	11			
D[3.2]	Formulación	721207	3	240402	354,387	0,000000
	Residuo	5427	8	678		
	Total	726634	11			
SPAN	Formulación	3,22111	3	1,07370	239.08	0.000000
	Residuo	0,03593	8	0,00449		
	Total	3,25704	11			

SQ: suma de cuadrados; GL: grados de libertad; QM: cuadrado medio; Fcal: valor de la prueba F, valor de la probabilidad a un nivel de significación del 5 %.

Anexo 22. Análisis de la varianza de los parámetros de distribución granulométrica de las harinas extruidas mezcladas a partir de harinas integrales y legumbres.

Respuesta	Fuente	SQ	Gl	QM	Fcal	Valor-p
D10	Formulación	1191,05	3	397,02	53268.000	0,000000
	Extrusión	560,06	1	560,06	75144.000	0,000000
	Formulación*Extrusión	938,52	3	312,84	41974.000	0,000000
	Residuo	298,13	40	7,45		
	Total	2987,76	47			
D50	Formulación	7447,6	3	2482,5	35,53	0,000000
	Extrusión	5262,6	1	5262,6	75,31	0,000000
	Formulación*Extrusión	15398,4	3	5132,8	73,45	0,000000
	Residuo	2795,2	40	69,9		
	Total	30903,8	47			
D90	Formulación	18337	3	6112	33,90	0,000000
	Extrusión	5449	1	5449	30,22	0,000002
	Formulación*Extrusión	36132	3	12044	66,79	0,000000
	Residuo	7213	40	180		
	Total	67130	47			
D[4.3]	Formulación	37037	3	12346	40.09	0.000000
	Extrusión	4203	1	4203	13.65	0.000659
	Formulación*Extrusión	56978	3	18993	61.67	0.000000
	Residuo	12319	40	308		
	Total	110537	47			
D[3.2]	Formulación	25077	3	8359	40.94	0.000000
	Extrusión	3901	1	3901	19.11	0.000085
	Formulación*Extrusión	40561	3	13520	66.23	0.000000
	Residuo	8166	40	204		
	Total	77706	47			
SPAN	Formulación	0.6821	3	0.2274	64.83	0.000000
	Extrusión	0.3164	1	0.3164	90.22	0.000000
	Formulación*Extrusión	0.2821	3	0.0940	26.81	0.000000
	Residuo	0.1403	40	0.0035		
	Total	1.4209	47			

SQ: suma de cuadrados; GL: grados de libertad; QM: cuadrado medio; Fcal: valor de la prueba F, valor de la probabilidad a un nivel de significación del 5 %.

Anexo 23. Análisis de la varianza de la densidad aparente de harinas mixtas crudas y extrusionadas obtenidas a partir de cereales integrales y legumbres.

Muestra	Fuente	SQ	Gl	QM	Fcal	Valor-p
Crudas	Formulación	0,034886	3	0,011629	182,18	0,000000
	Residuo	0,000511	8	0,000064		
	Total	0,035396	11			
Extruidas	Formulación	0,02565	3	0,00855	34,71	0,000000
	Extrusión	0,00355	1	0,00355	14,41	0,000488
	Formulación*Extrusión	0,00249	3	0,00083	3,37	0,027556
	Residuo	0,00985	40	0,00025		
	Total	0,04155	47			

SQ: suma de cuadrados; GL: grados de libertad; QM: cuadrado medio; Fcal: valor de la prueba F, valor de la probabilidad a un nivel de significación del 5 %.

Anexo 24. Análisis de la varianza del índice de absorción de agua de harinas mixtas crudas y extrusionadas obtenidas a partir de cereales integrales y legumbres.

Muestra	Fuente	SQ	Gl	QM	Fcal	Valor-p
Crudas	Formulación	1,01659	3	0,33886	26,154	0,000174
	Residuo	0,10365	8	0,01296		
	Total	1,12024	11			
Extruidas	Formulación	14,3042	3	4,7681	31,451	0,000000
	Extrusión	4,9616	1	4,9616	32,727	0,000001
	Formulación*Extrusión	2,4564	3	0,8188	5,401	0,003240
	Residuo	6,0642	40	0,1516		
	Total	27,7864	47			

SQ: suma de cuadrados; GL: grados de libertad; QM: cuadrado medio; Fcal: valor de la prueba F, valor de la probabilidad a un nivel de significación del 5 %.

Anexo 25. Análisis de la varianza del índice de solubilidad en agua de harinas mixtas crudas y extrusionadas obtenidas a partir de cereales integrales y legumbres.

Muestra	Fuente	SQ	Gl	QM	Fcal	Valor-p
Crudas	Formulación	154,163	3	51,388	1490,86	0,000000
	Residuo	0,276	8	0,034		
	Total	154,439	11			
Extruidas	Formulación	188,29	3	62,76	18,371	0,000000
	Extrusión	1491,68	1	1491,68	436,640	0,000000
	Formulación*Extrusión	176,00	3	58,67	17,173	0,000000
	Residuo	136,65	40	3,42		
	Total	1992,62	47			

SQ: suma de cuadrados; GL: grados de libertad; QM: cuadrado medio; Fcal: valor de la prueba F, valor de la probabilidad a un nivel de significación del 5 %.

Anexo 26. Análisis de la varianza del índice de absorción de aceite de harinas mixtas crudas y extrusionadas obtenidas a partir de cereales integrales y legumbres.

Muestra	Fuente	SQ	Gl	QM	Fcal	Valor-p
Crudas	Formulación	0,26922	3	0,08974	7,501	0,010345
	Residuo	0,09571	8	0,01196		
	Total	0,36493	11			
Extruidas	Formulación	0,07014	3	0,02338	2,569	0,067734
	Extrusión	0,00113	1	0,00113	0,124	0,726922
	Formulación*Extrusión	0,11081	3	0,03694	4,059	0,013099
	Residuo	0,36398	40	0,00910		
	Total	0,54605	47			

SQ: suma de cuadrados; GL: grados de libertad; QM: cuadrado medio; Fcal: valor de la prueba F, valor de la probabilidad a un nivel de significación del 5 %.

Anexo 27. Análisis de la varianza de las propiedades reológicas de las harinas mixtas crudas.

Respuesta	Fuente	SQ	Gl	QM	Fcal	Valor-p
TP	Formulación	11,92	3	3,97	2,06	0,247675
	Residuo	7,70	8	1,92		
	Total	19,61	11			
CV	Formulación	140,375	3	46,792	1,2776	0,395509
	Residuo	146,500	8	36,625		
	Total	286,875	11			
PV	Formulación	12716,5	3	4238,8	144,92	0,000155
	Residuo	117,0	8	29,3		
	Total	12833,5	11			
HS	Formulación	8457,5	3	2819,2	95,56	0,000353
	Residuo	118,0	8	29,5		
	Total	8575,5	11			
BV	Formulación	12787,00	3	4262,33	1.549,939	0,000001
	Residuo	11,00	8	2,75		
	Total	12798,00	11			
FV	Formulación	132146	3	44049	526,74	0,000012
	Residuo	334	8	84		
	Total	132481	11			
SV	Formulación	137712	3	45904	1244,86	0,000002
	Residuo	148	8	37		
	Total	137860	11			

TP: temperatura de la pasta (°C); CV: Viscosidad en frío (cP); PV: viscosidad pico (cP); HS: fuerza de retención (cP); BV: viscosidad de rotura (cP); FV: viscosidad final (cP); SV: viscosidad de retrogradación (cP); SQ: suma de cuadrados; GL: grados de libertad; QM: cuadrado medio; Fcal: valor de la prueba F, valor de la probabilidad a un nivel de significación del 5 %.

Anexo 28. Análisis de la varianza de las propiedades reológicas de las harinas mixtas extruidas.

Respuesta	Fuente	SQ	Gl	QM	Fcal	Valor-p
TP	Formulación	0,01	3	0,00	4	0,069499
	Extrusión	0,01	1	0,01	5	0,066688
	Formulación*Extrusión	0,00	3	0,00	0	0,915877
	Residuo	0,01	40	0,00		
	Total	0,03	47			
CV	Formulación	118466	3	39489	301,30	0,000000
	Extrusión	2186	1	2186	16,68	0,003517
	Formulación*Extrusión	27567	3	9189	70,11	0,000004
	Residuo	1049	40	131		
	Total	149267	47			
PV	Formulación	58790	3	19597	134,17	0,000000
	Extrusión	45476	1	45476	311,34	0,000000
	Formulación*Extrusión	19697	3	6566	44,95	0,000024
	Residuo	1169	40	146		
	Total	125131	47			
HS	Formulación	5344,69	3	1781,56	168,669	0,000000
	Extrusión	20664,06	1	20664,06	1956,361	0,000000
	Formulación*Extrusión	5447,19	3	1815,73	171,903	0,000000
	Residuo	84,50	40	10,56		
	Total	31540,44	47			
BV	Formulación	63397	3	21132	158,295	0,000000
	Extrusión	4830	1	4830	36,182	0,000318
	Formulación*Extrusión	7058	3	2353	17,624	0,000694
	Residuo	1068	40	134		
	Total	76354	47			
FV	Formulación	64636	3	21545	1310,74	0,000000
	Extrusión	287028	1	287028	17461,78	0,000000
	Formulación*Extrusión	28345	3	9448	574,80	0,000000
	Residuo	131	40	16		
	Total	380140	47			
SV	Formulación	35846,3	3	11948,8	424,84	0,000000
	Extrusión	153664,0	1	153664,0	5463,61	0,000000
	Formulación*Extrusión	11454,5	3	3818,2	135,76	0,000000
	Residuo	225,0	40	28,1		
	Total	201189,8	47			

TP: temperatura de la pasta (°C); CV: Viscosidad en frío (cP); PV: viscosidad pico (cP); HS: fuerza de retención (cP); BV: viscosidad de rotura (cP); FV: viscosidad final (cP); SV: viscosidad de retrogradación (cP); SQ: suma de cuadrados; GL: grados de libertad; QM: cuadrado medio; Fcal: valor de la prueba F, valor de la probabilidad a un nivel de significación del 5 %.

Anexo 28. Análisis de la varianza de los parámetros de color en el sistema CIELAB (L^* , a^* y b^*) de las harinas crudas mezcladas de cereales integrales y leguminosas.

Respuesta	Fuente	SQ	Gl	QM	Fcal	Valor-p
L^*	Formulación	115,71	3	38,57	284,4	0,000000
	Residuo	1,08	8	0,14		
	Total	116,79	11			
a^*	Formulación	1,778825	3	0,592942	393,110	0,000000
	Residuo	0,012067	8	0,001508		
	Total	1,790892	11			
b^*	Formulación	8,062	3	2,687	9,86	0,004598
	Residuo	2,180	8	0,272		
	Total	10,241	11			

SQ: suma de cuadrados; GL: grados de libertad; QM: cuadrado medio; Fcal: valor de la prueba F, valor de la probabilidad a un nivel de significación del 5 %.

L^* : luminosidad; a^* y b^* : cromaticidad

Anexo 29. Análisis de la varianza de los parámetros de color en el sistema CIELAB (L^* , a^* y b^*) de las harinas extruidas mezcladas de cereales integrales y leguminosas.

Respuesta	Fuente	SQ	Gl	QM	Fcal	Valor-p
L^*	Formulación	303,2	3	101,1	449	0,000000
	Extrusión	0,7	1	0,7	3	0,091365
	Formulación*Extrusión	2,1	3	0,7	3	0,039456
	Residuo	9,0	40	0,2		
	Total	315,0	47			
a^*	Formulación	8,23788	3	2,74596	696,46	0,000000
	Extrusión	3,59420	1	3,59420	911,60	0,000000
	Formulación*Extrusión	0,21754	3	0,07251	18,39	0,000000
	Residuo	0,15771	40	0,00394		
	Total	12,20734	47			
b^*	Formulación	47,86	3	15,95	117,1	0,000000
	Extrusión	3,28	1	3,28	24,1	0,000016
	Formulación*Extrusión	6,56	3	2,19	16,0	0,000001
	Residuo	5,45	40	0,14		
	Total	63,15	47			
ΔE	Formulación	22,4601	3	7,4867	39,140	0,000000
	Extrusión	3,7255	1	3,7255	19,477	0,000075
	Formulación*Extrusión	4,4226	3	1,4742	7,707	0,000353
	Residuo	7,6513	40	0,1913		
	Total	38,2595	47			

ΔE : Diferencia de color total; SQ: suma de cuadrados; GL: grados de libertad; QM: cuadrado medio; Fcal: valor de la prueba F, valor de la probabilidad a un nivel de significación del 5 %.

L^* : luminosidad; a^* y b^* : cromaticidad

Anexo 30. Análisis de la varianza de los compuestos fenólicos totales de las harinas de granos de cereales integrales, leguminosas, y de las harinas mezcladas crudas.

Muestra	Fuente	SQ	Gl	QM	Fcal	Valor-p
Harina de Granos	Granos e legumbres	464267,5	3	154755,8	2477,184	0,000000
	Residuo	499,8	8	62,5		
E pulses	Total	464767,3	11			
Harina Crudas	Formulación	17468,8	3	5822,9	109,557	0,000001
	Residuo	425,2	8	53,1		
	Total	17894,0	11			

SQ: suma de cuadrados; GL: grados de libertad; QM: cuadrado medio; Fcal: valor de la prueba F, valor de la probabilidad a un nivel de significación del 5 %.

Anexo 31. Análisis de la varianza de la actividad antioxidante (ABTS+) de las harinas de granos de cereales integrales, de las leguminosas y de las harinas mezcladas crudas.

Muestra	Fuente	SQ	Gl	QM	Fcal	Valor-p
Granos y legumbres	Formulación	12,4603	3	4,1534	26,512	0,000165
	Residuo	1,2533	8	0,1567		
	Total	13,7136	11			
Crudas	Formulación	513,8318	3	171,2773	3083,08	0,000000
	Residuo	0,4444	8	0,0556		
	Total	514,2762	11			

SQ: suma de cuadrados; GL: grados de libertad; QM: cuadrado medio; Fcal: valor de la prueba F, valor de la probabilidad a un nivel de significación del 5 %.