



DOCINADE

Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo
Énfasis en Sistemas de Producción Agrícola

Tesis de Doctorado

Diseño de un alimento funcional enfocado en la reducción de índice glicémico elaborado con maíz y fríjol

Adriana Luzely Mejía Terán

Dra. Carla María Blanco Lizarazo

Directora de Tesis

Dra. Luz Indira Sotelo Díaz

Asesora de Tesis

Dr. Manuel Francisco Polanco Puerta

Asesor de Tesis

Bogotá, Colombia, 2024

MIEMBROS DEL TRIBUNAL EXAMINADOR

Dr. José Pablo Jiménez Madrigal
Representante Dirección de Posgrados TEC

Dr. David Valverde Barquero
Coordinador general DOCINADE

Dra. Carla María Blanco Lizarazo
Directora de tesis

Dra. Luz Indira Sotelo Díaz
Miembro del Comité Asesor

Dr. Manuel Francisco Polanco Puerta
Miembro del Comité Asesor

Tabla de contenido

ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE TABLAS	9
DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD	10
AGRADECIMIENTOS	11
DEDICATORIA	12
GLOSARIO DE ABREVIATURAS	13
RESUMEN	14
ABSTRACT	16
INTRODUCCIÓN	18
OBJETIVOS	24
OBJETIVO GENERAL	24
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
SÍNTESIS	25
CAPÍTULO 1. CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE ALIMENTOS FUNCIONALES BASADOS EN LAS INTERACCIONES ALMIDÓN-PROTEÍNA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA	30
RESUMEN	31
INTRODUCCIÓN	32
MATERIALES Y MÉTODOS	34
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
<i>Formulación de alimentos con altos contenidos de almidón que incorporan proteínas</i>	36
<i>Efecto de variables de procesamiento</i>	37
<i>Consideraciones sobre las propiedades fisicoquímicas y la digestibilidad en el diseño de alimentos funcionales a base de almidón</i>	40
CONCLUSIONES	45
REFERENCIAS	47

CAPÍTULO 2. PRETRATAMIENTOS Y TAMAÑO DE PARTÍCULA SOBRE EL ÍNDICE GLICÉMICO, PROPIEDADES REOLÓGICAS Y FUNCIONALES DE LAS HARINAS DE FRIJOL.	52
RESUMEN	53
1. INTRODUCCIÓN	54
2. MATERIALES Y MÉTODOS	56
2.1. <i>Materiales</i>	56
2.2. <i>Diseño de experimentos</i>	56
2.3. <i>Pretratamientos para la producción de harina.</i>	57
2.4. <i>Caracterización tecnológica de harinas</i>	58
2.4.1. Índice de absorción de agua (IAA) e índice de solubilidad en agua (ISA)	58
2.5. <i>Análisis de propiedades funcionales.</i>	58
2.5.1. Contenido de amilosa/amilopectina	58
2.5.2. Análisis cuantitativo de compuestos fenólicos.	59
2.5.3. Digestión <i>in vitro</i> de almidón y cálculo de fracciones de almidón	59
2.5.4. Índice glicémico estimado (eIG)	59
2.5.5. Propiedades reológicas	60
2.6. <i>Análisis estadístico</i>	60
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	61
3.1. <i>IAA e ISA</i>	61
3.2. <i>Determinación del contenido de amilosa</i>	64
3.3. <i>Compuestos fenólicos</i>	65
3.4. <i>Determinación de fracciones de almidón.</i>	66
3.5. <i>Digestibilidad in vitro del almidón e índice glicémico estimado</i>	67
3.6. <i>Propiedades reológicas</i>	69
3.6.1. Medición de flujo	69
3.6.2. Barrido de deformación	70
3.6.3. Prueba de barrido de frecuencia	73
3.6.4. Rampa de temperatura	74
4. CONCLUSIONES	77
5. REFERENCIAS	79
CAPÍTULO 3. PROPIEDADES TECNOFUNCIONALES Y FISICOQUÍMICAS DE LAS HARINAS DE MAÍZ COMO POTENCIALES INGREDIENTES ALIMENTARIOS.	86
RESUMEN	87

1.	INTRODUCCIÓN	88
2.	MATERIALES Y MÉTODOS	89
2.1.	<i>Diseño de experimentos</i>	89
2.2.	<i>Materiales</i>	90
2.3.	<i>Obtención de las harinas</i>	91
2.4.	<i>Determinación de IAA e ISA</i>	91
2.5.	<i>Determinación del contenido de amilosa/amilopectina</i>	92
2.6.	<i>Digestión in vitro del almidón</i>	92
2.7.	<i>Determinación del índice glicémico estimado (eIG)</i>	92
2.8.	<i>Propiedades tecno-funcionales</i>	93
2.8.1.	Capacidad de retención de agua (CRA)	93
2.8.2.	Propiedades emulsionantes	93
2.8.3.	Capacidad de gelificación	93
2.9.	<i>Caracterización reológica</i>	94
2.10.	<i>Análisis estadístico</i>	94
3.	RESULTADOS	95
3.1.	<i>IAA e ISA</i>	95
3.2.	<i>Determinación del contenido de amilosa</i>	96
3.3.	<i>Digestibilidad del almidón in vitro e índice glicémico estimado</i>	97
3.4.	<i>Análisis de componentes principales</i>	98
3.5.	<i>Propiedades funcionales, CRA, IAE y CMG</i>	99
3.6.	<i>Propiedades reológicas</i>	100
3.6.1.	Medición en flujo.	100
3.6.2.	Barrido de deformación	101
3.6.3.	Prueba de barrido de frecuencia	102
3.6.4.	Rampa de temperatura	103
4.	CONCLUSIONES	105
	REFERENCIAS	106
CAPÍTULO 4. DISEÑO DE UN ALIMENTO FUNCIONAL DE BAJO ÍNDICE GLICÉMICO A PARTIR DE HARINAS COMPUESTAS DE FRIJOL Y MAÍZ FUNDAMENTADO EN SUS PROPIEDADES TECNO-FUNCIONALES		110
	RESUMEN	112
1.	INTRODUCCIÓN	113

2.	MATERIALES Y MÉTODOS	114
2.1.	<i>Materiales</i>	114
2.2.	<i>Diseño de experimentos</i>	115
2.3.	<i>Propiedades tecno-funcionales de las harinas compuestas</i>	115
2.3.1.	Capacidad de retención de agua (CRA)	115
2.3.2.	Propiedades emulsionantes	116
2.3.3.	Capacidad de gelificación	116
2.4.	<i>Caracterización de prototipo de alimento</i>	116
2.4.1.	Estimación del índice Glicémico <i>in vitro</i>	116
2.4.2.	Determinación de aminoácidos	116
2.4.3.	Análisis cuantitativo de compuestos fenólicos	117
2.4.4.	Análisis de textura instrumental	117
2.4.5.	Perfilación sensorial	117
2.5.	<i>Análisis estadístico</i>	118
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	118
3.1.	<i>Propiedades tecno-funcionales de las harinas compuestas</i>	118
3.2.	<i>Diseño del alimento prototipado</i>	120
3.2.2.	Perfil de aminoácidos y polifenoles	123
3.2.3.	Análisis de textura instrumental	125
3.2.4.	Perfil sensorial	126
4.	CONCLUSIONES	127
	REFERENCIAS	129
	DISCUSIÓN GLOBAL	133
	CONCLUSIONES GLOBALES	136
	RECOMENDACIONES	137
	REFERENCIAS	138
	ANEXOS	141

Índice de figuras

Figura 1. (a) enrollamiento helicoidal de la amilosa; (b) estructura química de la amilopectina.	19
Figura 2. Síntesis metodológica del proyecto	27
Figura 1.1. Diagrama de proceso de búsqueda sistemática	35
Figura 2.1. Índice de absorción de agua-IAA (A) e índice de solubilidad en agua-ISA (B) de harinas de frijol, sometidas a los pre-tratamientos: cruda (C), deshidratada (D), remojo + cocción + deshidratación 3 h (RCD3) y remojo + cocción + de deshidratación por 24 h (RCD24).....	62
Figura 2.2 Curvas de digestión del almidón in vitro de las harinas de frijol por diferentes pretratamientos:	67
Figura 2.3. Índice glucémico estimado (eIG) para harinas de frijol, por pretratamientos y tamaño de partícula.	68
Figura 2.4. Comportamiento de flujo de masas de frijol RCD24_G (Gruesa) (Δ) y C (\square), influencia de la velocidad de corte en la curva de viscosidad a 25°C.....	70
Figura 2.5. Barrido de deformación dinámico para R(\square), RCD24_G (Gruesa) (Δ).	71
Figura 2.6. Barrido de frecuencia de muestras de frijol RCD24_G (Gruesa) (Δ) y cruda(\square).	73
Figura 2.7. Viscoelasticidad dinámica de las masas RCD24_G (Gruesa) (Δ) y C (\square) durante el ciclo de calentamiento (A) y enfriamiento (B) (25 °C-95 °C-25 °C) a una deformación constante del 2% y una frecuencia de 1 Hz.....	75
Figura 3.1. Índice de absorción de agua-IAA (A) e índice de solubilidad en agua-ISA (B) de las harinas de maíz Advanta (\blacksquare), Leptra (\blacksquare), and Porva (\blacksquare) con diferentes diámetros de partícula.	95
Figura 3.2. Análisis de Componentes Principales. Plano PC1-PC2 (A), plano PC1-PC3 (B), plano PC2-PC3 (C) y matriz de correlación (D).	99
Figura 3.3. Medición de flujo de harina de Advanta entera (Δ), influencia de la velocidad de corte en la curva de viscosidad a 25°C.	101
Figura 3.4. Barrido de deformación dinámico para maíz Advanta.....	102
Figura 3.5. Barrido de frecuencia y viscoelasticidad dinámica de una muestra de maíz Advanta	103
Figura 4.1. Prototipos de galletas a partir de harina compuesta en diferentes proporciones (maíz:frijol): C:B15 (85:15), C:B30 (70:30), C:B45 (55:45), C:B60 (40:60), y galletas control: C (100% maíz) control positivo, W (100% trigo) control negativo.....	121

Figura 4.2. Índice glicémico estimado (eIG) en prototipos de galletas a partir de harina compuesta en diferentes proporciones (maíz:frijol): C:B15 (15:85), C:B30 (30:70), C:B45 (45:55), C:B60 (60:40) y galletas control: C (100% maíz) control positivo, W (100% trigo) control negativo.... 122

Figura 4.3. Perfil de textura, efecto de la incorporación de harina de frijol sobre la dureza de galletas elaboradas con harina de maíz..... 125

Figura 4.4. Análisis cuantitativo descriptivo de prototipos de galletas con harina compuesta de maíz y frijol..... 126

Índice de tablas

Tabla 1.1. Efecto de los tratamientos térmicos sobre las propiedades fisicoquímicas	38
Tabla 1.2. Efectos identificados por la incorporación de proteína en diferentes matrices alimentarias	41
Tabla 2.1. Fracciones de almidón, almidón de digestión rápida (ADR), almidón de digestión lenta (ADL), almidón resistente (AR) y contenidos de amilosa de la harina de frijol.	64
Tabla 2.2. Composición de flavonoides y ácidos fenólicos en las harinas de frijol.	65
Tabla 3.1. Fracciones de almidón, almidón de digestión rápida (ADR), almidón de digestión lenta (ADL), almidón resistente (AR), contenido de amilosa, índice de hidrólisis (IH), índice glucémico estimado (eIG) de harina de maíz.	97
Tabla 4.1. Descriptores sensoriales para análisis cuantitativo descriptivo (QDA) del prototipo de alimento.	118
Tabla 4.2. Propiedades tecno-funcionales de harinas.....	118
Tabla 4.3. Formulación de los prototipos de galletas (g).....	120
Tabla 4.4. Composición química proximal (por 100 g de producto) de galletas elaboradas a partir de harinas compuestas (maíz/frijol).....	121
Tabla 4.5. Perfil de aminoácidos y compuestos fenólicos de las galletas elaboradas a partir de harina compuestas de maíz y frijol C:B45 y C:B60.....	123

Declaración de autenticidad

Yo Adriana Luzely Mejía Terán, estudiante del Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo, declaro que la Tesis Doctoral que presento para su exposición y defensa titulada “*Diseño de un alimento funcional enfocado en la reducción de índice glicémico elaborado con maíz y frijol*” y comité asesor de tesis son el Dra. Carla María Blanco Lizarazo (director de tesis), Dra. Indira Sotelo Díaz (asesora) y Dr. Manuel Francisco Polanco, es original y que todas las fuentes utilizadas para su realización han sido debidamente citadas en el mismo. Este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en esta u otra institución.

Bogotá, Colombia a 26 de agosto de 2024

Adriana Luzely Mejía Terán

Agradecimientos

Es la oportunidad para agradecer y reconocer el gran trabajo de mi Comité Asesor de Tesis. A mi directora, la doctora **Carla Blanco Lizarazo**, una mujer de ciencia a quien admiro profundamente por su capacidad de análisis, su dedicación y la firme convicción que en Colombia es posible hacer investigación y lo demuestra a diario con su trabajo. La doctora Blanco ha guiado esta investigación desde su concepción hasta su culminación, compartiendo generosamente su conocimiento y brindando apoyo constante. Su motivación y disposición en cada etapa del proceso han sido fundamentales para lograr este objetivo. A la doctora **Indira Sotelo**, quien asesoró con una visión holística el proceso investigativo con total disponibilidad. Al doctor **Manuel Francisco Polanco** por compartir su experiencia y como obtentor, permitir usar la nueva variedad de frijol UNAD-Dos Zandú en este estudio. Gracias a todos por brindarme su confianza y amistad, motivándome a cumplir el objetivo investigativo.

Mi agradecimiento al ingeniero Darío Fernando Mejía, por todo su apoyo en la ejecución experimental, con una total disposición y el acompañamiento en la planeación de cada experimento.

Al doctor Eduardo Leyva Mateus por su disposición y acompañamiento en la determinación de las propiedades reológicas de las materias primas utilizadas en este estudio, y por facilitar la infraestructura y equipos del Instituto de Investigaciones en Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México-UNAM.

Como instituciones, este proyecto contó con el apoyo de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia-UNAD, a través del Centro de Investigación de Agricultura y Biotecnología y del programa de mejoramiento de frijol y sus laboratorios. Al Centro de Investigación y Desarrollo de la Industria Alimentaria Zenú, por su soporte en el análisis de textura instrumental y la perfilación sensorial de los prototipos de galletas. A la Federación Nacional de Cultivadores de Cereales, Leguminosas y Soya-FENALCE especialmente al ingeniero Henry Vargas Zuleta por sus orientaciones, proporcionando las muestras de maíz.

Agradezco al equipo docente del DOCINADE especialmente al doctor Freddy Muñoz Acosta, quien desde la coordinación del énfasis-SPA acompañó todo mi proceso académico. En general a mis compañeros de la Cohorte 2019 del DOCINADE por el apoyo, las recomendaciones y permitir el intercambio cultural. En general, a todas las personas que de alguna manera me acompañaron durante este proceso.

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a mi familia, quienes han sido mi apoyo moral e incondicional a lo largo de este camino. A mi hijo **Felipe** mi fuerza y mi felicidad infinita, gracias por inspirarme cada día con tu amor y alegría. A **Oscar** mi esposo, quien, siendo un excelente padre, fue un apoyo constante en todo este proceso. A mi querida madre **Amparo**, un pilar fundamental en mi vida, quien me enseñó desde pequeña que la educación es la mejor herramienta de una mujer. A **Justino**, mi padre, quien con su ejemplo me enseñó que *“lo que se empieza se termina”* y a quien le prometí que llegaría hasta el final, sé que desde algún lugar me sigue acompañando y seguramente estará feliz. A mis hermanos: **Darío**, quien me acompañó en las largas jornadas experimentales y siempre me motivó; formamos un equipo imparable, incluso en medio de la pandemia y los numerosos desafíos que tuvimos que resolver para lograr implementar cada experimento, mi total agradecimiento. A mis hermanos **Harvey, Juan y Jenny**, por sus palabras llenas de fe y confianza, que me impulsaron hacia adelante. A mis sobrinos, especialmente **Danny**, por creer en mí y ser una fuente de motivación. Y a todo el resto de familia, por sus palabras de aliento y apoyo. Este logro también es de ustedes, gracias por estar siempre presentes en mi camino. Con cada uno de ustedes, todo es llevadero.

Glosario de abreviaturas

ADL:	Almidón de digestibilidad lenta
ADR:	Almidón de digestibilidad rápida
AR:	Almidón Resistente
C:	Harina de frijol cruda (capítulo 2)
C:	Galletas control 100% maíz (capítulo 4)
C:B15:	Galletas en proporción maíz:frijol (85:15)
C:B30:	Galletas en proporción maíz:frijol (70:30)
C:B45:	Galletas en proporción maíz:frijol (55:45)
C:B60:	Galletas en proporción maíz:frijol (40:60)
CMG:	Concentración mínima de gelificación
CRA:	Capacidad de retención de agua
D:	Pretratamiento de harina, deshidratada
eIG:	Índice glicémico estimado
IAA:	Índice de absorción de agua
ISA:	Índice de solubilidad en agua
IAE	Índice de actividad de emulsificación
NR:	No reportado
PC:	Componentes principales
RCD3:	Pretratamiento harina, remojo + cocción + deshidratación por 3 horas
RCD24:	Pretratamiento harina remojo + cocción + deshidratación por 24 horas
RVE	Región viscoelástica lineal
W:	Galletas control 100% trigo

Resumen

La prevalencia actual de enfermedades crónicas no transmisibles exige la promoción de dietas equilibradas. En consecuencia, materias primas de alto consumo, como el maíz, que tiene un valor cultural, y el frijol, con un alto valor nutricional, juegan un papel fundamental en la seguridad alimentaria y la nutrición, siendo clave en el diseño de nuevos alimentos. Esta investigación tuvo como objetivo desarrollar un alimento funcional a base de maíz y frijol, centrado en la reducción del índice glicémico, fundamentado en las interacciones entre almidón y proteína, así como sus propiedades tecnológicas, fisicoquímicas y sensoriales.

Este estudio se dividió en dos fases, la **primera**, se enfocó en estudiar las harinas de maíz y frijol. Y la **segunda**, en el diseño de un alimento funcional enfocado en la reducción del índice glicémico, a partir de las harinas de estos productos. En la harina de frijol se evaluó el impacto del tamaño de partícula y de tres pretratamientos sobre el índice glicémico: deshidratado (D), remojo seguido de cocción y deshidratación durante 3 horas (RCD3), remojo seguido de cocción y deshidratación durante 24 horas (RCD24), y harina cruda (C). En el caso de la harina de maíz, se evaluaron las propiedades funcionales con diferentes tamaños de partícula en tres cultivares de importancia productiva en Colombia: Advanta, Leptra y Porva.

La metodología de la primera fase abarcó la determinación del índice de absorción de agua (IAA), índice de solubilidad en agua (ISA), el contenido de amilosa, la digestibilidad del almidón, la estimación del índice glicémico (eIG) y propiedades reológicas de las harinas. Complementariamente, se cuantificó la composición fenólica del frijol y se determinaron la capacidad de retención de agua (CRA), el índice de actividad de emulsificación (IAE) y la concentración mínima de gelificación (CMG) del maíz.

Los resultados mostraron que, para la harina de frijol, el IAA se correlaciona negativamente con ISA y amilosa, presentando diferencias estadísticamente significativas entre pretratamientos y tamaños. La liberación de glucosa difirió entre las fracciones finas (125 μm) y gruesas (242 μm), mientras que la fracción gruesa de RCD24, presentó el eIG más bajo (22.8). RCD3 presentó la mayor concentración de flavonoides. RCD24 mostró módulos elásticos/viscosos más altos que C. Las harinas de todos los pre-tratamientos tuvieron un IG bajo con contenidos de polifenoles bioactivos tales como catequina, epicatequina, ácido ferúlico, quercetina. El tratamiento óptimo fue RCD24, particularmente en la fracción gruesa, que mostró potencial para el diseño de alimentos funcionales.

En cuanto a la harina de maíz, los resultados revelaron diferencias en IAA y el ISA, entre los tamaños de partículas de las harinas de Advanta y Leptra, principalmente. Así mismo, se observaron diferencias en el contenido de amilosa entre los cultivares, sin diferencias entre los tamaños de partícula. En particular, no mostraron diferencias en el eIG entre sus fracciones. el cultivar Advanta (174.4 μm) presentó el eIG más bajo (32,21). Otros hallazgos incluyeron CRA de 1.93 g/g, IAE de 40.55 m²/g y CMG de 12%. La caracterización reológica indicó un comportamiento no newtoniano y pseudoplástico. Este estudio presentó una harina de maíz con alto contenido de almidón resistente-AR y bajo índice glicémico con propiedades funcionales.

A partir de los resultados de la primera fase, se seleccionó la fracción gruesa de RCD24 y la harina de maíz Advanta para el diseño del alimento funcional, debido a que presentaron el menor eIG. A partir del análisis de las características tecno-funcionales, se seleccionó la matriz alimentaria y se determinó la formulación para la preparación de una galleta con diferentes proporciones de incorporación de harina (maíz:frijol): 85:15 (C:B15), 70:30 (C:B30), 55:45 (C:B45) y 40:60 (C:B60), tomando como control, la preparación de galletas usando harinas en un 100% de maíz (C) y trigo (W). Las galletas fueron evaluadas en términos de propiedades funcionales (eIG), nutricionales (cuantificación de aminoácidos y compuestos fenólicos) y sensoriales (perfil sensorial y análisis de textura instrumental).

En esta fase, los resultados mostraron que la incorporación de harina de frijol redujo la hidrólisis del almidón, resultando en galletas clasificadas como alimentos de bajo IG (27.58-40.72). En las muestras C:B45 y C:B60 se destacaron los aminoácidos lisina y arginina, así como compuestos fenólicos como catequina, epicatequina, quercetina y ácidos fenólicos, que resistieron el proceso de horneado. La adición de harina de frijol aumentó la dureza de las galletas en comparación con C, mientras que la resistencia a la rotura de C:B45 fue similar a la de W.

Los resultados de la perfilación sensorial indicaron que las muestras C:B45 y C:B60 no mostraron diferencias significativas en los descriptores en comparación con los controles (C-W). Según los parámetros analizados, la adición de hasta un 60% de harina de frijol logró un equilibrio entre las propiedades nutricionales, bioactivas y sensoriales de las galletas. Este estudio ofrece una guía para el desarrollo de una opción alimentaria sin gluten, con bajo índice glicémico y valor nutricional agregado.

Palabras clave

Digestibilidad; compuestos fenólicos; fracciones de almidón; tamaño de partícula; propiedades reológicas.

Abstract

The current prevalence of chronic non-communicable diseases requires the promotion of balanced diets. In this context, highly consumed raw materials, such as corn, which has a cultural value, and beans, with a high nutritional value, play a fundamental role in food security and nutrition, being key in the design of new foods. This research aimed to design a functional food based on corn and beans, focused on reducing the glycemic index, based on the interactions between starch and protein, as well as its technological, physicochemical and sensory properties.

This study was divided into two phases: the first focused on studying the corn and bean flours. And the second included designing a functional food made from corn and beans with a focus on reducing the glycemic index. The effect of particle size and three pretreatments on bean flour was evaluated— drying (D), soaking + cooking + dehydrating for three hours (RCD3), and soaking + cooking + dehydrating for 24 hours (RCD24) and raw flour (R) on the estimated glycemic index (eGI). Functional properties were determined in corn flour with different particle sizes from three cultivars (Advanta, Leptra, and Porva) of productive relevance in Colombia.

The methodology of first phase covered the water absorption index (WAI), water solubility index (WSI), amylose content, starch digestibility, the estimation of the glycemic index (eIG), and the rheological properties of the flours. Complementarily, the phenolic composition of the bean was quantified and the water retention capacity (WRC), emulsification activity index (IAE), and least gelation concentration (CMG) of the corn were determined.

The results showed that, for bean flour, IAA was negatively correlated with ISA and amylose, presenting statistically significant differences between pretreatments and sizes. Glucose release differed between fine (125 μm) and coarse fractions (242 μm). The coarse fraction of RCD24 showed the lowest eGI (22.8). RCD3 had the highest flavonoid concentration. RCD24 displayed higher elastic/viscous moduli than R. Bean flours from all treatments, which had low GI and contained bioactive polyphenols such as catechin, epicatechin, ferulic acid, and quercetin. RCD24 was the optimal treatment, particularly in the coarse fraction, showing potential for functional food design.

In terms of corn flour, the results revealed differences in WAI and WSI. Differences in particle sizes exist between Advanta and Leptra corn flours. Furthermore, differences in amylose content were observed between cultivars, but not in particle sizes. Notably, while Advanta and Leptra did not show differences in eGI and its fractions, Advanta (174.4 μm) demonstrated the lowest eGI at

32.21. Further findings included CRA of 1.93 g/g, IAE of 40.55 m²/g, and CMG of 12%. Additionally, rheological characterization indicated a non-Newtonian and pseudoplastic behavior. This study presented a corn flour with high resistant starch-RS content, low glycemic index, and functional properties.

The results of the first phase led to the selection of the coarse fraction of RCD24 and Advanta corn flour were selected for the design of the functional food, because they presented the lowest eIG. Based on the analysis of the techno-functional characteristics, from these flours, a cookie was designed using these flours with different proportions of maize beans: 85:15 (C:B15), 70:30 (C:B30), 55:45 (C:B45), and 40:60 (C:B60); as a control, cookies were prepared with 100% maize (C) and wheat (W) flours. The cookies were evaluated in terms of functional properties (eGI), nutritional (quantification of amino acids and phenolic compounds), and sensory (sensory profile and texture).

In this phase, the results showed that the incorporation of bean flour reduced the hydrolysis of starch, and cookies classified as low-eIG foods (27.58-40.72) were obtained. C:B45 and C:B60 highlighted the amino acids lysine and arginine. Phenolic compounds that resisted baking, such as catechin, epicatechin, quercetin, and phenolic acids, were identified. The incorporation of beans increased the hardness concerning C, and the breaking resistance of C:B45 was like W.

The results of sensory profiling showed that C:B45 and C:B60 did not present significant differences in the descriptors compared to the controls (C-W). According to the parameters analyzed, the inclusion of up to 60% bean flour represented a balance between the nutritional, bioactive, and sensory properties of the cookies. This study can guide the design of a low-glycemic-index food alternative that is gluten-free and has added nutritional value.

Keywords

Digestibility; phenolic compounds; starch fractions; particle size; rheological properties.

Introducción

A nivel mundial, los deficientes hábitos alimenticios en conjunto con estilos de vida sedentarios y el consumo de alimentos con altos contenidos de azúcar, han incrementado los problemas de salud en la población. Situación que se refleja en la prevalencia de enfermedades no transmisibles como sobrepeso, obesidad y diabetes tipo II, entre otras afectaciones, impactando directamente el desarrollo social y económico de un país, generando además altos costos en los sistemas de salud pública (Augustin *et al.*, 2015). En Colombia, el panorama no es alentador, de acuerdo con la Encuesta Nacional de la Situación Nutricional - ENSIN en el año 2015 se reportó una prevalencia del 54.2% de inseguridad alimentaria, registrando que, el 37.7% de jóvenes y adultos tienen sobrepeso y el 18.7% sufren de algún grado de obesidad (MinSalud, 2015). Ante esta problemática, diferentes estudios epidemiológicos han presentado evidencia científica en la que se respalda que la nutrición es una alternativa de prevención y control de muchas enfermedades, planteando un gran reto para la industria agroalimentaria. En la actualidad, es cada vez más evidente patrones que modelan y dan un carácter especial a las tendencias de consumo con productos que ofrezcan características funcionales, en las que toma fuerza la salud y el autocuidado.

En los últimos años, Colombia ha orientado esfuerzos en la búsqueda de estrategias que ofrezcan soluciones adaptables a la dieta actual, incorporando productos regionales de reconocida calidad nutricional y con disponibilidad permanente a nivel local tales como el maíz (*Zea mays*) y el frijol (*Phaseolus vulgaris*), usados en toda la geografía nacional y que tienen una dimensión social y cultural de consumo con productos característicos de cada zona, que a su vez generan ingresos y son fuente de empleo.

Bajo este panorama crece el interés por el diseño de alimentos funcionales, entre ellos, los alimentos de bajo índice glicémico (IG) y su papel potencial en la reducción del riesgo de dichas enfermedades (Pellegrini *et al.*, 2020), para los cuales se ha desarrollado una escala específica que sirve como herramienta de clasificación y referencia, especialmente útil para pacientes diabéticos, y se establece en función del efecto en el nivel de glucosa en sangre que tiene un alimento después de su consumo; clasificando a los alimentos como de bajo (≤ 55), medio (56–69) y alto (≥ 70) índice glicémico (Augustin *et al.*, 2015). De igual manera, los estudios han demostrado que la composición y microestructura del alimento, el perfil de almidón, la presencia

de metabolitos secundarios, la interacción de los componentes, así como el procesamiento son factores que contribuyen al IG de un alimento (Mondal *et al.*, 2024).

Dentro de las macromoléculas de mayor importancia en los alimentos, el almidón es uno de los principales carbohidratos consumidos en la dieta humana que, hidrolizado por el tracto digestivo, es absorbido como monosacáridos cumpliendo diferentes funciones nutricionales dependiendo de su naturaleza química, de su susceptibilidad a la α -amilasa e influye en la tasa de liberación de glucosa y la absorción en el tracto gastrointestinal (Mann *et al.*, 2007).

Desde el punto de vista químico, el almidón está compuesto por dos polisacáridos similares: la amilosa y la amilopectina (ver Figura 1). La amilosa se caracteriza por una cadena lineal de unidades glucosídicas, que puede oscilar entre 200 y 2500 unidades. Por otro lado, la amilopectina presenta una estructura ramificada, donde las ramas están unidas mediante enlaces α (1-6) que se intercalan aproximadamente cada 10 unidades lineales de glucosa (Amaya, 2024). La proporción de amilosa en el almidón puede afectar significativamente las propiedades tecnológicas del producto, como la resistencia al cizallamiento, el hinchamiento de los gránulos de almidón y la resistencia a la digestión enzimática (Kunyanee & Luangsakul, 2022).

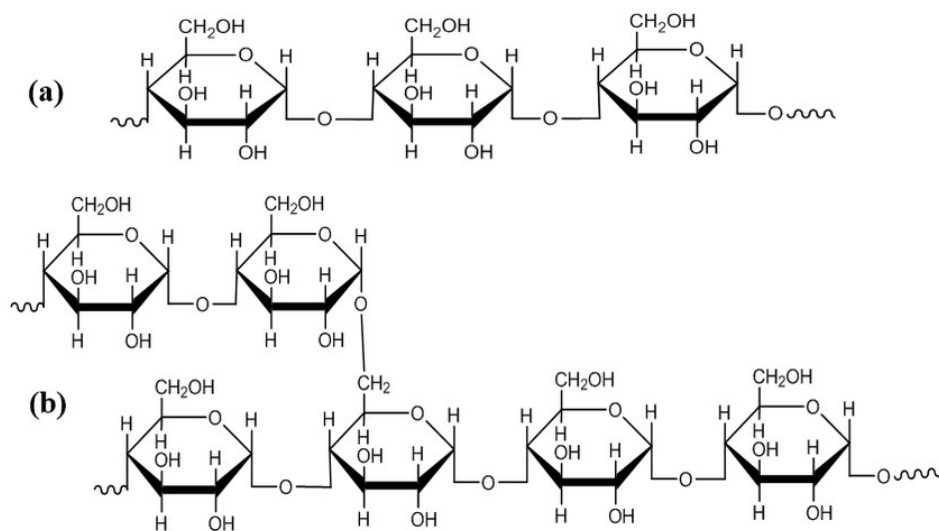


Figura 1. (a) enrollamiento helicoidal de la amilosa; (b) estructura química de la amilopectina.

Adicionalmente, con base en la tasa de digestibilidad el almidón se ha clasificado en tres categorías: digestión rápida (ADR), digestión lenta (ADL) y resistente (AR). Las fracciones de ADR y ADL se digieren en el intestino delgado a diferentes velocidades, la fracción AR hace parte de las moléculas clasificadas como fibra dietaria, las cuales no se degradan enzimáticamente en el intestino delgado, pero se fermentan en el intestino grueso actuando como sustrato energético de la microbiota colónica, lo que favorece la producción de ácidos grasos de cadena corta, permite mantener la integridad y función del epitelio intestinal. El ADR ha asociado con una creciente incidencia de síndrome metabólico como son la obesidad y la diabetes, por ello, el ADL y AR son deseables en los alimentos para prevenir y controlar dichas complicaciones (Obadi *et al.*, 2020).

Es así, como evaluar los factores que influyen en la digestibilidad de las fracciones de almidón y el impacto en el IG en productos básicos y catalogados como materias primas que aportan en la seguridad alimentaria, se constituye en una oportunidad destacada para avanzar en el mejor aprovechamiento de sus propiedades.

Nutricionalmente, el frijol es una fuente rica en proteínas, minerales, vitaminas, altos contenidos de fibra dietaria, almidón resistente y fitoquímicos bioactivos, que han sido asociados con efectos benéficos en la salud humana (Roasa *et al.*, 2021). Las propiedades nutricionales de las leguminosas son reconocidas a nivel mundial, en el 2016 la FAO declaró el Año Internacional de las leguminosas, promoviendo el uso y la investigación en aplicaciones alimentarias. Por su parte el maíz, es una de las mayores fuentes de energía, vitamina B, minerales y fibra dietaria, destacándose además por su disponibilidad, accesibilidad, facilidad de uso y transformación (Dongmo *et al.*, 2020).

La conversión de los granos de estos alimentos en harinas, potencian su aplicación en alimentos procesados con ventajas asociadas a mayor tiempo de conservación, propiedades organolépticas deseables y mejoramiento en la calidad nutricional y funcional. Así mismo, se favorecen las condiciones de manipulación, almacenamiento y transporte (Naiker *et al.*, 2020; Rosa-Millán *et al.*, 2019; Tian *et al.*, 2021).

No obstante, las leguminosas contienen factores anti-nutricionales (tanino, ácido fítico y tripsina) que pueden inhibir la absorción de ciertos nutrientes, disminuyendo su digestibilidad y biodisponibilidad; por otro lado, contienen lectinas que pueden ser tóxicas y causar malestares fisiológicos (Bessada *et al.*, 2019; Tas & Shah, 2021). En consecuencia, para inactivar o reducir el efecto antinutricional se emplea una combinación de pre-tratamientos térmicos o mecánicos

de las semillas enteras tales como remojo, cocción, tostado, deshidratado, previos a la molienda (Choe *et al.*, 2022a; Kamalasundari *et al.*, 2019). Sin embargo, los pre-tratamientos pueden promover interacciones físicas entre el almidón y las proteínas a escala molecular, que se correlacionan con las fracciones nutricionales de almidón, el índice de hidrólisis, la digestibilidad, y como consecuencia, el índice glicémico (Chávez-Murillo *et al.*, 2018; Naiker *et al.*, 2020). Así mismo, el diámetro de partícula de las harinas, influyen también en la digestibilidad del almidón (Guo *et al.*, 2018; Choe *et al.*, 2022b; Lin & Fernández-Fraguas, 2020).

De otra parte, existe una dicotomía respecto al uso del maíz y sus derivados, atribuible a sus altos contenidos de almidón (65%), lo cual lo ha clasificado como alimentos de alto índice glicémico y que, por exceso de su ingesta, puede provocar efectos adversos para la salud, principalmente en poblaciones afectadas con enfermedades relacionadas con la absorción de la glucosa en la sangre (Caballero-Rothar *et al.*, 2022a).

Bajo el contexto del consumo de alimentos autóctonos de Latinoamérica, donde existe una alta relevancia industrial del maíz, y con el alto potencial de la harina de frijol, se requiere estudiar los componentes con alta participación en la dieta como son los carbohidratos y las proteínas, así como las interacciones que se pueden generar entre ellos (Bravo-Núñez *et al.*, 2019). Estas macromoléculas aportan en el valor nutricional, son claves en el procesamiento, así como son responsables de la función tecnológica y estructural de los alimentos (Huerta-Abrego *et al.*, 2010).

En adición a esto, las condiciones de los pre-tratamientos y de las operaciones unitarias de procesamiento influyen en los valores eIG, lo cual implica ampliar el estudio de estas interacciones para la obtención de productos con características funcionales. Por lo tanto, esta investigación se basó en el análisis del efecto de diferentes tamaños de partícula y tres pre-tratamientos en el grano, que incluyeron remojo, cocción y secado, en comparación con harinas crudas de frijol y tres cultivares de maíz, sobre el índice glicémico estimado y las propiedades tecnológicas de las harinas de frijol. Igualmente, se evaluó el impacto de los pretratamientos en la composición y concentración de compuestos fenólicos en la harina de frijol.

En este estudio se seleccionaron los cultivares de maíz Advanta 9339, Leptra 30F35 y Porva, y la variedad de frijol UNAD-Dos Zandú en función de sus rasgos distintivos y aportes específicos de interés comercial sembrados en Colombia, lo cual fue validado en consulta con expertos de la Federación Nacional de Cultivadores de Cereales, Leguminosas y Soya-FENALCE. Las

muestras de Advanta y Leptra fueron suministradas por FENALCE, (Tolima, Colombia) y la harina cruda comercial de maíz amarillo Porva fue adquirida en una tienda local (Bogotá, Colombia).

La selección del maíz Híbrido Advanta 9339 para este investigación se fundamentó en su potencial productivo, evidenciado por la uniformidad de la mazorca, llenado óptimo y un mayor número diferencial de hileras, indicando una mayor producción de grano por planta, los granos se caracterizan por un **color anaranjado y buena dureza**, características de interés industrial, lo cual respalda su elección en este experimento.

Por su parte, la variedad Leptra se seleccionó por su potencial productivo, destacando por su densidad de siembra, precocidad en la cosecha y un peso específico del grano significativo, a nivel industrial es de interés por el **tamaño del grano**. El 13% de la superficie nacional, se encuentra cultivada con este híbrido. En general, los dos híbridos prometen contribuciones significativas para la producción, cada uno aportando fortalezas particulares en adaptabilidad, potencial productivo y manejo del cultivo. Como control se selección una harina cruda comercial obtenida de la variedad de maíz Porva, la cual cuenta con características de adaptabilidad a las condiciones de la Sabana de Bogotá y de relevancia en el mercado.

La variedad UNAD Dos Zandú, proporcionada por el Centro de Investigación de Agricultura y Biotecnología-CIAB la Universidad Nacional a Distancia-UNAD con sede en Risaralda, Colombia, es un material obtenido de un proceso de fitomejoramiento, a partir del cruce recíproco de las variedades ICA Quimbaya y Cargamanto. Como control, en la fase inicial se seleccionó la variedad comercial Cargamanto.

Este frijol de porte arbustivo se caracteriza por la adaptabilidad altitudinal en clima medio y frío moderado, reflejada en un mejor rendimiento y manteniendo la uniformidad, estabilidad, altos niveles de tolerancia a enfermedades, con vainas largas, grano grande y ovalados que ha recibido aceptación entre los productores y consumidores haciéndola diferencial respecto a los productos comerciales (Polanco *et al.*, 2023).

En este contexto, el proyecto de investigación se centró en la formulación de una matriz alimentaria con el objetivo de diseñar un alimento funcional enfocado a la reducción del índice glicémico. Para ello, se optimizó la composición de la harina de maíz mediante la incorporación de diferentes proporciones de harina de frijol, lo cual podría ayudar a disminuir el índice glicémico en alimentos a base de almidón, fundamentado en la relación entre la estructura de sus componentes y su función. Como vehículo alimentario para este estudio se elaboraron galletas,

un producto de consumo habitual en todas las edades y de alta demanda en la industria alimentaria. Las galletas fueron evaluadas en términos de propiedades funcionales, sensoriales y de textura.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar un alimento funcional elaborado a partir de maíz y frijol enfocado en la reducción del índice glicémico estimado, fundamentado en las interacciones entre almidón proteína y las propiedades tecnológicas, fisicoquímicas y sensoriales.

Objetivos específicos

- Evaluar las propiedades tecnológicas y el índice glicémico en harinas de frijol con diferentes tamaños de partículas y tres pretratamientos (remojo, cocción y deshidratación) en comparación con harina de frijol cruda.
- Determinar las propiedades funcionales, fracciones de almidón e índice glicémico de la harina de maíz obtenida con diferentes tamaños de partícula de tres cultivares de relevancia productiva en Colombia.
- Diseñar un alimento de bajo índice glicémico a través de la combinación óptima de maíz y frijol mediante la relación de sus características reológicas y sus propiedades funcionales.

Síntesis

A. Estructura de documento de tesis

La presente tesis, se encuentra estructurada en formato compendio de artículos científicos compuesta por cuatro capítulos, cada capítulo corresponde a un artículo publicado o en proceso de publicación en revista indexada. Al final del documento se plantean conclusiones globales y recomendaciones generales, derivadas del análisis de los resultados obtenidos por objetivo que pueden guiar el diseño de un alimento de bajo índice glicémico, con valor nutricional agregado como alternativa en dietas focalizadas.

En el capítulo 1 se abordan las consideraciones clave en el diseño de alimentos funcionales a base de almidón, centrándose en su interacción con la proteína. Se presenta una revisión sistemática de alimentos formulados con altos contenidos de almidón que incorporan proteínas, y se analiza el impacto de las variables del proceso y las propiedades fisicoquímicas y de digestibilidad en el diseño de distintas matrices alimentarias. Esta revisión concluye que las características de los productos alimenticios que contienen almidón y proteína dependen tanto de la naturaleza física y química de las materias primas como de las interacciones entre los componentes en la matriz alimentaria y los fenómenos que ocurren durante el procesamiento.

En el capítulo 2 se hace un análisis del efecto del pretratamiento y tamaño de partícula sobre el índice glicémico, propiedades reológicas y funcionales de las harinas de frijol. Este capítulo se enmarca dentro objetivo específico uno el cual fue evaluar las propiedades tecnológicas y el índice glicémico en harinas de frijol con diferentes tamaños de partículas y tres pretratamientos (remojo, cocción y deshidratación) en comparación con harina de frijol cruda. Para ello, se evaluaron las propiedades tecnológicas de harinas de frijol con diferentes tamaños de partícula y tres pre-tratamientos y se analizaron los índices de absorción (IAA) y solubilidad (ISA), contenido de amilosa/amilopectina, tasa de digestibilidad de almidón, índice glicémico estimado (eIG) y cuantificación de los compuestos fenólicos.

En el capítulo 3 se presenta el estudio de la evaluación del impacto de los cultivares colombianos de maíz (Advanta, Leptra y Porva) y los diferentes tamaños de partícula de las harinas sobre las propiedades tecno-funcionales, el índice glicémico estimado (eIG) y el comportamiento reológico para determinar su idoneidad como potencial ingrediente alimentario. Este capítulo se enfoca en dar respuesta al objetivo específico dos dirigido a “determinar las propiedades funcionales, fracciones de almidón e índice glicémico de la harina de maíz obtenida con diferentes tamaños

de partícula de tres cultivares de relevancia productiva en Colombia”. La metodología abarcó tres fases: 1) Evaluación del Índice de Absorción de Agua (IAA) y del Índice de Solubilidad en Agua (ISA) para tres cultivares colombianos de maíz a través de cinco diámetros de partícula, 2) Determinación del eIG y cuantificación de amilosa para las harinas seleccionadas de la primera fase, 3) Evaluación de la Capacidad de Retención de Agua (CRA), capacidad de emulsión y gelificación, así como propiedades reológicas.

En el capítulo 4 se plantea el diseño de prototipo tipo galletas como alimento funcional enfocado en la reducción del índice glicémico. Este capítulo se enmarca para dar cumplimiento al objetivo específico tres “diseñar un alimento de bajo índice glicémico a través de la combinación óptima de maíz y frijol mediante la relación de sus características reológicas y sus propiedades funcionales”. En una primera fase se evaluaron las propiedades tecno-funcionales de las harinas compuestas y acorde con los resultados, se seleccionó la matriz alimentaria. Posteriormente, para el diseño del prototipado del alimento, se evaluaron cuatro porcentajes de incorporación de harina de frijol (% m/m) en función de la participación total de harina compuesta (maíz:frijol): 85:15 (C:B15), 70:30 (C:B30), 55:45 (C:B45) y 40:60 (C:B60), se utilizó como control positivo un prototipo diseñado con harina 100% de maíz (C) y como control negativo se utilizó harina 100% de trigo (W). Las galletas fueron evaluadas en términos de propiedades funcionales, sensoriales y de textura.

Como complemento a lo anterior descrito, en la figura 1 se presenta la síntesis metodológica del proyecto.

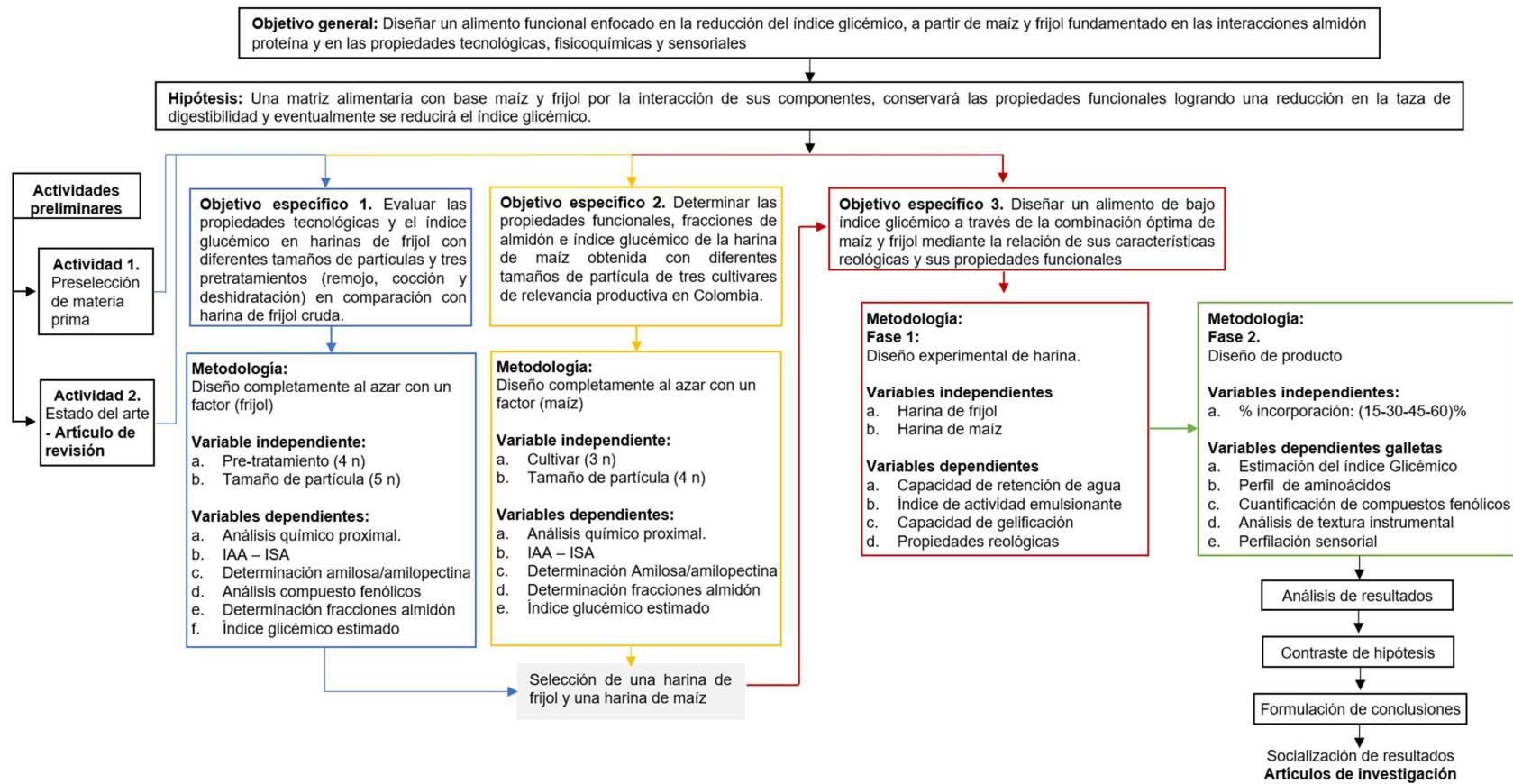


Figura 2. Síntesis metodológica del proyecto

B. Lista de Publicaciones

Como resultados de investigación de este trabajo de tesis se han desarrollado las siguientes publicaciones:

Artículo publicado, versión original en idioma inglés, el cual se presenta en el anexo 1:

- I. Mejía Terán, A., & Blanco-Lizarazo, C. M. (2021). Considerations for functional food design based on starch-protein interactions: a systematic review. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 72(8), 1009-1018. <https://doi.org/10.1155/2024/6336837>

Artículo publicado, versión original en idioma inglés, el cual se presenta en el anexo 2:

- II. Mejía-Terán, A., Blanco-Lizarazo, C. M., Leiva Mateus, J. E., Sotelo-Díaz, I., Mejía Terán, D., & Geffroy, E. (2024). Pretreatments and Particle Size on the Glycemic Index and Rheological and Functional Food Properties of Bean Flours. *International Journal of Food Science*, 2024. <https://doi.org/10.1155/2024/6336837>

Artículo publicado, versión original en idioma inglés, el cual se presenta en el anexo 3:

- III. Mejía-Terán, A., Blanco-Lizarazo, C. M., Leiva Mateus, E., & Sotelo-Díaz, I. (2024). Techno-functional and physicochemical properties of corn flours as potential food ingredients. *Applied Food Research*, 4(1). <https://doi.org/10.1016/j.afres.2024.100427>

Artículo finalizado, versión original en idioma inglés en proceso de sometimiento, el cual se presenta en el anexo 4:

- IV. Mejía Terán, A., & Blanco-Lizarazo, C. M. (2024). Design of a low glycemic index functional food from bean and corn composite flours based on their techno-functional properties

C. Eventos y socialización de resultados

- V. Mejía Terán, A., y Polanco Puerta, M., (13 y 14 de mayo, 2021). *Estudio funcional y caracterización fisicoquímica de frijol variedad UNAD-DOS ZANDU para ser incorporado en una matriz alimentaria* [Ponencia oral]. II Simposio Internacional y V Simposio Nacional de Desarrollo Rural, Agroecología y Sostenibilidad: Agroecología y Sostenibilidad: Movimientos Sociales para la consolidación de la Soberanía Alimentaria. Bogotá, Colombia. Anexo 5.

Libro de Memorias

- VI. Vinasco Guzmán, M. C., Cabrera Otálora, M. I., Montenegro Gómez, S. P. ., & Méndez Pedroza, N. M. . (2021). II Simposio Internacional y V Simposio Nacional de Desarrollo Rural, Agroecología y Sostenibilidad: Agroecología y Sostenibilidad: Movimientos Sociales para la consolidación de la Soberanía Alimentaria. *Memorias*, 172-177.
- <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/memorias/article/view/5491>
- VII. Mejía Terán, A., y Polanco Puerta, M., (9 -11 de noviembre, 2022). Frijol UNAD-dos Zandu, ingrediente alternativo para el Desarrollo de alimentos de bajo índice glucémico [Ponencia oral]. Congreso Internacional de Ciencias Agrarias y Ambientales. "Una mirada integral a la Seguridad Alimentaria en el contexto mundial. Bogotá, Colombia. Anexo 6.

Capítulo 1. Consideraciones para el diseño de alimentos funcionales basados en las interacciones almidón-proteína: una revisión sistemática

Adriana Mejía Terán, Carla María Blanco-Lizarazo

International Journal of Food Sciences and Nutrition

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/09637486.2021.1905784>

Resumen

El objetivo de esta revisión sistemática fue discutir las consideraciones en el diseño de alimentos a base de almidones a partir de las interacciones con proteínas, en función de sus efectos funcionales, tecnológicos y nutricionales.

Para esto, se realizó una búsqueda sistemática en Scopus y Pubmed de artículos publicados en inglés sin exclusión material por fecha, ubicación o autor. Los resultados mostraron que la incorporación de proteína puede disminuir la gelatinización, la gelificación y la viscosidad de matrices alimentarias, así como reduce la hidrólisis y la tasa digestibilidad del almidón. Además, se encontró influencia de otros componentes como los compuestos fenólicos. En conclusión, para el diseño de alimentos se puede modular la tasa de digestibilidad del almidón a través de la interacción con proteínas, las cuales también modifican las propiedades tecnológicas, estructurales y nutricionales, en función de la naturaleza fisicoquímica de los ingredientes, el porcentaje de incorporación de la proteína y las condiciones de procesamiento.

Palabras clave: digestibilidad; almidón resistente; polisacárido; digestión; matriz alimentaria.

Introducción

Los deficientes hábitos alimenticios en conjunto a factores como el estilo de vida, comportamientos sedentarios y el consumo en grandes cantidades de alimentos poco saludables, han incrementado la prevalencia de enfermedades crónicas no transmisibles como la obesidad, el sobrepeso y la diabetes tipo 2 a nivel mundial (Augustin *et al.*, 2015). La Organización Mundial de la Salud reportó que en 2016 alrededor del 39% de las personas adultas tenía sobrepeso y el 13% obesidad, evidenciando un desequilibrio entre la ingesta de alimento y el gasto energético, lo cual representa un riesgo para la salud (WHO, 2017). En Colombia, la Encuesta Nacional de la Situación Nutricional, reportó que el 24,4% de niños en edad escolar, el 17,9% de adolescentes y 56,5% de la población adulta presentaron sobrepeso (ICBF Instituto Colombiano de Bienestar Familiar, 2016). Por lo tanto, diversos entes gubernamentales alrededor del mundo se han enfocado en promover hábitos de vida saludable focalizados en la alimentación.

En consecuencia, gana especial importancia el estudio de los macro y micronutrientes especialmente los de alta participación en la dieta como los carbohidratos y las proteínas, así como sus interacciones los cuales son esenciales para el desarrollo de alimentos funcionales que impliquen un correcto equilibrio entre valor nutricional, función tecnológica y estructural de los alimentos (Huerta-Abrego *et al.* 2010; Bravo-Núñez *et al.* 2019; Yang *et al.* 2019).

El almidón es uno de los principales carbohidratos consumidos en la dieta humana, el cual al ser hidrolizado por el tracto digestivo, es absorbido como monosacáridos, cumpliendo diferentes funciones nutricionales dependiendo de su naturaleza química, factor que depende de su susceptibilidad a la α -amilasa e influye en la tasa de liberación de glucosa y la absorción en el tracto gastrointestinal (Mann *et al.*, 2007; Fernandes *et al.*, 2021). Según el índice de digestibilidad, el almidón ha sido clasificados en tres categorías: Almidón de digestibilidad rápida (ADR), Almidón de digestibilidad lenta (ADL) y Almidón Resistente (AR). El ADR y el ADL se digieren en el intestino delgado a diferentes velocidades. El almidón resistente (AR) no se digiere ni se absorbe en el intestino delgado debido a que no se hidroliza después de 120 min.

Según su resistencia a la digestibilidad, AR se divide en cuatro tipos: AR1 es físicamente inaccesible a la digestión, AR2 describe gránulos de almidón nativo que están protegidos de la digestión por la conformación o estructura del gránulo, AR3 se refiere a materiales no granular derivados del almidón que generalmente se forman durante la retrogradación, y AR4 no se

encuentra en la naturaleza, ha sido modificado químicamente para disminuir su digestibilidad (Nugent 2005).

El AR hace parte de las moléculas clasificadas como fibra dietética, las cuales no se degradan enzimáticamente en el intestino delgado, pero se fermenta en el intestino grueso actuando como sustrato energético de la microbiota colónica, lo que favorece la producción de Ácidos Grasos de Cadena Corta (AGCC) que, a su vez permite mantener la integridad y función del epitelio intestinal.

Asimismo, el consumo de AR se ha asociado con la reducción de la respuesta glicémica posprandial (Englyst *et al.* 1992; Nugent 2005; EFSA 2011). Por otro lado, la ingesta de ADL se ha asociada con un bajo índice Glicémico (IG) debido a que estimula la secreción de incretina que influye en el retraso del vaciado gástrico y aumento de la saciedad (Augustin *et al.* 2015; Gourineni *et al.* 2019).

Por este motivo, ha venido en aumento el interés por el desarrollo de alimentos que incorporen fracciones de SDR y AR, así como estrategias de procesamiento que aumenten la resistencia a la hidrólisis del almidón y reduzcan su velocidad de digestión. De esta manera, las interacciones que se generan al incorporar polisacáridos y proteínas en una matriz alimentaria influyen en la digestibilidad, sus propiedades fisicoquímicas, tecno-funcionales, reológicas, así como, su estabilidad y estructura (Téllez-Morales *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2019).

Adicionalmente, las intervenciones físicas, químicas y enzimáticas enfocadas en retrasar la digestibilidad del almidón tienen efecto en las propiedades funcionales y estructurales de los almidones y sus mezclas, determinando las posibles aplicaciones en sistemas alimentarios (Téllez-Morales *et al.*, 2020). Es consecuencia, podría atribuirse un cambio en las propiedades térmicas de la matriz alimentaria.

De esta manera, las interacciones generadas entre proteína-almidón, así como las variables de proceso y las características propias de las materias primas influyen directamente en la modificación de las propiedades estructurales, tecnológicas funcionales y nutricionales del almidón, las cuales deben ser estudiadas para el diseño de alimentos funcionales (Arribas *et al.*, 2019; Téllez-Morales *et al.*, 2020). Por tanto, el objetivo de este estudio fue realizar una revisión sistemática de literatura disponible que permita analizar las consideraciones más relevantes para el diseño de alimentos funcionales a base de almidones a partir de sus interacciones con proteínas, así como sus efectos a nivel funcional, tecnológico, de digestibilidad y nutricional.

Materiales y métodos

Criterio de selección

Se realizó una búsqueda sistemática entre junio de 2020 y septiembre de 2020, los términos de búsqueda se basaron en palabras clave relacionadas con starch AND protein AND interactions AND functional food, sin exclusiones en cuanto al año de publicación, ubicación geográfica o autores.

Estrategia de búsqueda y selección de estudios

La ecuación de búsqueda fue: starch AND protein AND (interactions OR digestibility)) OR (polyphenolic AND protein AND polysaccharide)) AND (nutritional OR functional AND food)) OR (starch-protein AND interaction). Se excluyeron los artículos de revisión y los relacionados con "Animal" or " Nonhuman or "Animal Feed" or "Animal Food y, sólo se incluyeron documentos escritos en inglés. Las bases de datos consultadas fueron Scopus y PubMed. Dos revisores sistemáticos realizaron la parametrización y extracción de datos. Inicialmente los documentos se seleccionaron analizando títulos y resumen para determinar su relevancia y pertinencia, obteniendo como resultado 93 artículos. Se excluyeron artículos que incorporaban fuentes de fibras, lípidos u otros componentes que, de acuerdo con los estudios, tienen un papel importante en la limitación de la hidrólisis del almidón. La figura 1.1, presenta el diagrama de proceso de revisión sistemática.

Resultados y discusión

Con base en los criterios de búsqueda de inclusión y exclusión se seleccionaron 33 artículos, de los cuales el 78.8% (26/33) se enfocaron a estudiar el efecto de la incorporación de proteína en matrices alimentarias, el 30.3% (10/33) en pasta alimentaria (Bharath Kumar y Prabhasankar, 2015; Cabrera-Chávez *et al.*, 2012; Camelo-Méndez *et al.*, 2017; Flores-Silva *et al.*, 2015; Gallegos-Infante *et al.*, 2010; Giuberti *et al.*, 2015; Kamble *et al.*, 2020; Menon *et al.*, 2016; Rathod y Annapure, 2017; Sofi *et al.*, 2020), el 21.2% (7/33) en productos horneados como pan y galletas (Bourré *et al.*, 2019; Delamare *et al.*, 2020; Dhinda *et al.*, 2012; Dhingra *et al.*, 2012; Giuberti *et al.*, 2018; Jenkins *et al.*, 1987; Świeca *et al.*, 2014), 15.1% (5/33) alimentos complementarios para niños (Ali *et al.*, 2016; Khan *et al.*, 2011; Muoki *et al.*, 2012; Ndagire *et al.*, 2015; Omosebi *et al.*, 2018) y el 6% (2/33) en snacks (Arribas *et al.*, 2019; López-Barón *et al.*, 2018). Las 8 publicaciones restantes evaluaron los efectos sobre las propiedades fisicoquímicas y digestivas en diferentes mezclas de almidón y proteína.

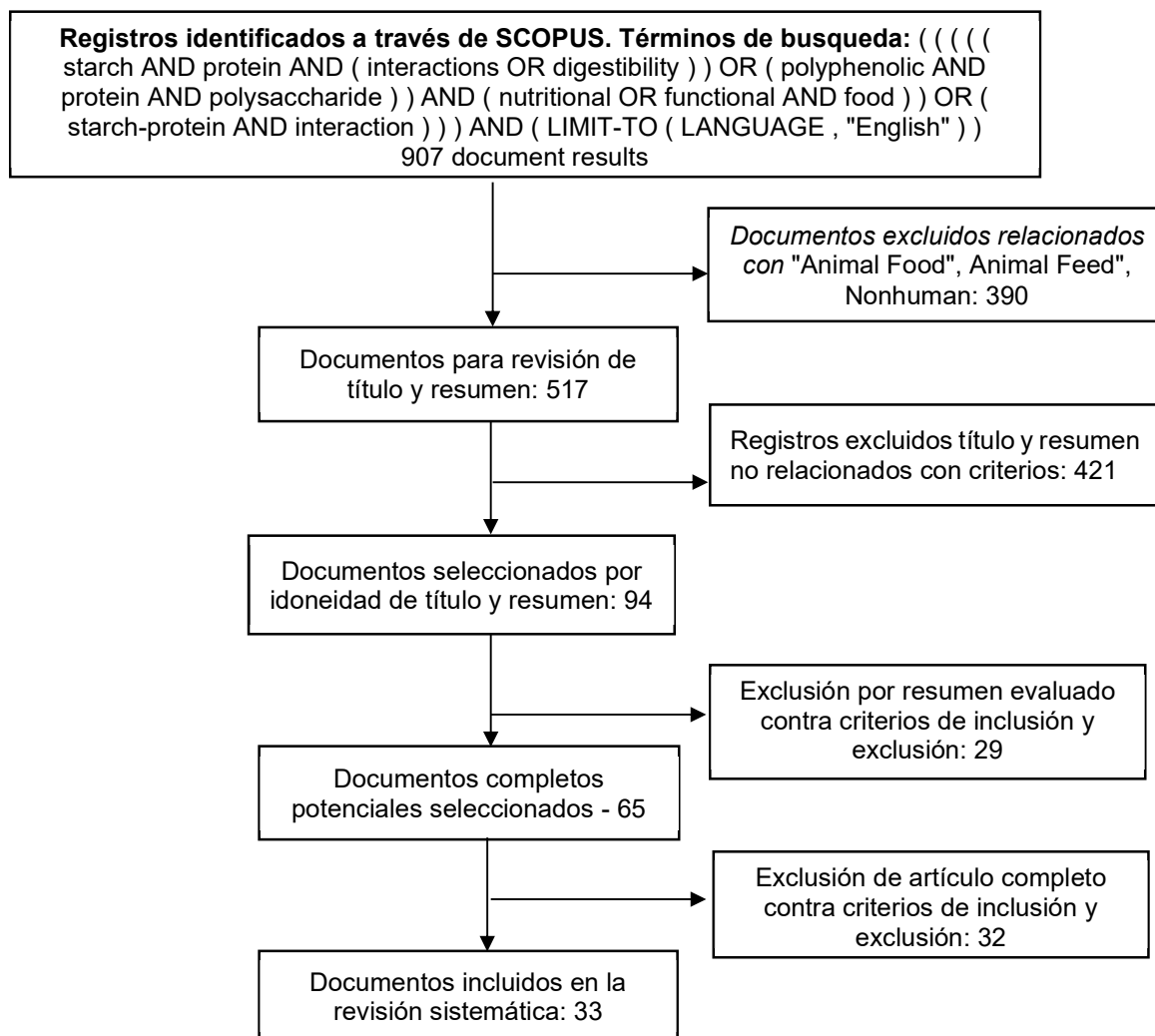


Figura 1.1. Diagrama de proceso de búsqueda sistemática

Asimismo, 11 de los artículos seleccionados aplicaron como tratamiento la extrusión; donde 2 de ellos determinaron las condiciones óptimas de procesamiento para alimentos extruidos evaluando 3 variables, contenido de humedad, temperatura del cilindro y la velocidad del tornillo que causan el efecto de cizallamiento y en consecuencia modificaciones en las propiedades físicas del alimento como densidad aparente, índice de absorción de agua, índice de solubilidad en agua, textura y grado de gelatinización (Rathod y Annapure, 2017, Ali *et al.*, 2016), 2 artículos evaluaron el efecto de la extrusión sobre la digestibilidad y solubilidad de las proteínas (Arribas

et al., 2019; Omosebi *et al.*, 2018) y 2 el efecto sobre las propiedades funcionales de las mezclas de almidón y proteínas (Amaya-Llano *et al.*, 2007; Téllez-Morales *et al.*, 2020).

Formulación de alimentos con altos contenidos de almidón que incorporan proteínas

Respecto al porcentaje de incorporación de proteína en alimentos no se identificó un criterio estandarizado, dado que se reportaron porcentajes de incorporación entre 18 y 40 % en alimentos procesados para niños 2 a 5 años, lo que se fundamentó en necesidades nutricionales (Muoki *et al.*, 2012; Ndagire *et al.*, 2015, Ali *et al.*, 2016; Giuberti *et al.*, 2018;). Basados en la aceptación sensorial, se encontraron estudios en alimentos tipo pasta con incorporación de proteína entre 30 y 40 % (Bharath Kumar y Prabhasankar, 2015; Rathod y Annapure, 2017) y en pasta de arroz, con incorporaron de harina de garbanzo (20%) y proteína aislada (8%) (Sofi *et al.*, 2020). En galletas se encontró un buen balance entre las propiedades y los atributos sensoriales cuando se incorporó 30% de semilla de alfalfa como fuente de proteína (Giuberti *et al.*, 2018). Por otro lado, Delamare *et al.* (2020) encontraron buenos resultados de digestibilidad cuanto reemplazó un 50 % de harina de trigo por una formula rica en proteína, en la cual hubo una reducción aproximada de 60 % sobre el índice de hidrólisis del almidón. En los alimentos tipo pan, se observó que las incorporaciones, en general, son inferiores al 20% (Dhingra y Jood 2002; Swieca *et al.* 2014). En consecuencia, la definición de los porcentajes de proteína se basa en generar un equilibrio adecuado entre calidad tecnológica, atributos sensoriales y nutricionales (Delamare *et al.* 2020).

Diversos autores han descrito que la digestibilidad de los almidones se ve afectada por las interacciones con proteínas (Bharath Kumar y Prabhasankar, 2015; Yang *et al.*, 2019) y otros componentes como los compuestos fenólicos (Camelo-Méndez *et al.*, 2017; Świeca *et al.*, 2014; Xie *et al.*, 2019). Por otra parte, se ha reportado que la incorporación de compuestos bioactivos como al ácido fenólico y las antocianinas en un alimento tienen la capacidad de ralentizar la velocidad y el grado de digestión del almidón, inhibiendo la acción de las enzimas del tracto digestivo como la α -amilasa (Camelo-Méndez *et al.*, 2017; Świeca *et al.*, 2014; Xie *et al.*, 2019). Sin embargo, pueden degradarse o ser inestables en ciertas condiciones de procesamiento y almacenamiento, lo que implica un desafío para su incorporación en alimentos, particularmente en presencia de proteínas.

En este sentido, los resultados encontrados por Ferruzzi *et al.* (2020) acerca de la degradación de compuestos fenólicos en presencia de almidón y proteína después del proceso de digestión indican que los compuestos fenólicos se degradan menos en presencia de almidón respecto a

matrices que contienen proteínas, este fenómeno se puede vincular a la capacidad de los compuestos fenólicos para formar complejos de inclusión de tipo V con almidón, con ácido gálico, catequina y galato de epigallocatequina. Adicionalmente, (Camelo-Méndez *et al.*, 2017) encontraron que la incorporación de polifenoles en un alimento tipo pasta con maíz azul retrasó la velocidad y el grado de digestión del almidón atribuido a la inhibición α -amilasa. Xie *et al.* (2019) evaluaron el efecto de los polifenoles del té (epigallocatequina-EGC y epigallocatequina-3-galato-EGCG) y la adición de gluten sobre las propiedades de digestión del almidón de trigo in vitro. Los resultados plantean que el EGCG (20%, base de almidón) redujo significativamente el grado de digestión de almidón de trigo en un 25 y un 30% en las mezclas crudas y cocidas, lo que indica una fuerte inhibición enzimática causada por EGCG. Sin embargo, en presencia de gluten la reducción fue del 6,6 al 8,5%, fenómeno que se atribuye a la reducción del EGCG efectivo debido a su interacción molecular con el gluten.

Efecto de variables de procesamiento

La temperatura se ha descrito como una de las variables con mayor influencia sobre las propiedades fisicoquímicas, tecnológicas y nutricionales de los alimentos. En la tabla 1.1 se presentan 9 investigaciones entre el 2007 y 2020, que muestran el efecto que tiene diferentes tratamientos térmicos sobre las propiedades fisicoquímicas de las mezclas. Donde, se evidencia de manera consistente que el procesamiento a altas temperaturas entre 70 °C y 192 °C aumentan la absorción del agua y su solubilidad, así como la digestibilidad de proteínas a pesar de generar la disminución de su solubilidad. Por otro lado, pueden aumentar la cantidad de fragmentos del almidón, además de favorecer la desnaturalización de las proteínas y modificar su solubilidad debido a su capacidad para afectar la distribución del agua en la matriz, así como la conformación macromolecular, lo cual influye en las propiedades extensionales de las masas fundidas extruidas (Amaya-Llano *et al.*, 2007; Téllez-Morales *et al.*, 2020). Lu *et al.* (2016) evidenciaron que la incorporación de proteína en una mezcla restringió proporcionalmente la hinchazón de gránulos de almidón durante la cocción, presentando retrogradación lenta de amilopectina. Huerta-Abrego *et al.* (2010) evaluaron los cambios en las propiedades funcionales de tres almidones por interacción con las proteínas del frijol de lima, donde la temperatura de gelatinización de cada mezcla aumentó en comparación con los controles con almidón nativo. Ndagire *et al.* (2015) estudiaron la viscosidad de mezclas a base de frijoles y la compararon con cereales de maíz y mijo encontrando que la viscosidad era significativamente más baja con diferencias significativas en la temperatura de formación pasta. En adición, se ha encontrado que

los tratamientos térmicos pueden afectar las propiedades fisicoquímicas y funcionales debido a la inducción de un cambio en el arreglo molecular interno del gránulo de almidón (Chen *et al.*, 2019).

Tabla 1.1. Efecto de los tratamientos térmicos sobre las propiedades fisicoquímicas

Matriz	Tratamiento	Variable temperatura	Efecto en las propiedades fisicoquímicas	Referencia
Mezclas de CS/WPI	Extrusión	140 °C	↑ índice de absorción de agua	(Téllez-Morales <i>et al.</i> , 2020)
			↑ índice de solubilidad del agua	
Pan	horneado con y sin vapor	120-140-160 °C	↑ densidad aparente	(Bourré <i>et al.</i> , 2019)
			↓ solubilidad de la proteína	
Mezcla de almidón y péptidos	Cocción	60-70-80-90 °C	↓ características de aroma y sabor desagradables	(Chen <i>et al.</i> , 2019)
			↑ proporcional en el contenido de ADR	
Mezcla de harinas	Extrusión	125 °C	↓ contenido de proteínas solubles	(Arribas <i>et al.</i> , 2019)
			↑ agregación de proteínas	
Pasta Alimento instantáneo de destete	Extrusión	70-120 °C	↑ en la digestibilidad in vitro de las proteínas	(Rathod y Annapure, 2017)
			↑ contenido de almidón total	
Pasta Alimento complementario	Extrusión	108 - 192 °C	↓ contenido de almidón resistente	(Ali <i>et al.</i> , 2016)
			↑ gelatinización y digestibilidad in vitro del almidón	
Mezclas de WPC-CS	Extrusión	70-180 °C	↑ digestibilidad in vitro de la proteína	(Amaya-Llano <i>et al.</i> , 2007)
			↓ factor antinutricional inhibidores de tripsina y ácido fítico	
Pasta Alimento complementario	Extrusión	120 °C	↑ índice de solubilidad en agua y el grado de gelatinización.	(Cabrer-Chávez <i>et al.</i> , 2012)
			↓ densidad aparente y el índice de expansión de agua.	
Pasta Alimento complementario	Extrusión	120 °C	↓ solubilidad de la proteína	(Muoki <i>et al.</i> , 2012)
			↑ firmeza del producto final	
Mezclas de WPC-CS	Extrusión	70-180 °C	↑ lisina disponible	(Amaya-Llano <i>et al.</i> , 2007)
			↑ índice de absorción agua en matrices con alta humedad	
Mezclas de WPC-CS	Extrusión	70-180 °C	↓ índice de expansión y la densidad aparente en función del incremento de la temperatura	(Amaya-Llano <i>et al.</i> , 2007)
			↑ desnaturalización de proteínas	
Mezclas de WPC-CS	Extrusión	70-180 °C	↑ índice de solubilidad, mayor efecto en pH ácido	(Amaya-Llano <i>et al.</i> , 2007)

Ali *et al.*, 2016, evaluaron las condiciones óptimas en el proceso de extrusión para la obtención de alimentos instantáneos complementarios para bebés elaborados a base de maíz y frijol mungo; los resultados obtenidos fueron que a mayor velocidad del tornillo se provoca mayores tasas de cizallamiento y fricción, provocando un mayor aporte de energía lo cual facilita la lixiviación de la amilosa y en consecuencia se genera mayor grado de gelatinización. Por su parte el aumento en la humedad del alimento redujo la fricción de la masa con el cuerpo del equipo, en consecuencia, causó menor daño a los gránulos del almidón disminuyendo el índice de solubilidad en agua y la digestibilidad.

Asimismo, Rathod y Annapure (2017) encontraron que la humedad (20%), la velocidad del tornillo (150 rpm) y la temperatura (95 °C) tienen una incidencia directa en la calidad y la reducción de

antinutrientes de los fideos elaborados a partir de arroz y lentejas, así como, un aumento significativo de la digestibilidad de las proteínas y el almidón, a su vez se redujo el tiempo de cocción.

Pellegrini *et al.* (2020) plantearon las estrategias críticas centradas en las condiciones de procesamiento para reducir la digestibilidad del almidón: (i) preservar la estructura granular/cristalina y favorecer la formación de estructuras cristalinas retrogradadas (ii) limitar la movilidad de la matriz amorfa gelatinizada y (iii) mantener o construir barreras para rodear el almidón gelatinizado.

En consecuencia, variables como el corte generan cambios en la estructura del almidón; un bajo cizallamiento en la mezcla, permiten que los gránulos de almidón preserven su estructura y forman una matriz amorfa continua alrededor de los gránulos de almidón que se genera una barrera para las enzimas. Por el contrario, el efecto de alto cizallamiento depende de otras variables como temperatura, duración y contenido de agua, combinado con altas temperaturas en la extrusión favorecen la rotura de los gránulos de almidón, su gelatinización y luego su biodisponibilidad. Por esta razón, en este tipo de procesos, las interacciones almidón-proteína producen cadenas lineales que tienen más probabilidades de retrogradarse.

Así, procesos como la extrusión mejoran la interacción del almidón con las proteínas permitiendo que, simultáneamente, se produzca la gelatinización de almidón y la desnaturalización de la proteína (Cabrera-Chávez *et al.*, 2012). Adicionalmente, Arribas *et al.*, 2019 reportó que la extrusión no modifica el contenido de proteínas. No obstante, aumenta su digestibilidad *in vitro* a pesar de la reducción significativa del contenido de proteína soluble, este fenómeno se puede atribuir al efecto de la temperatura sobre la desnaturalización de las proteínas, además de la formación de agregados y formación de complejos de tipo Maillard. Por otro lado, se reportó que la temperatura de extrusión afecta la inactivación de factores anti- nutricionales termolábiles que se encuentran en las leguminosas y que perjudican la digestibilidad de las proteínas (Omosebi *et al.*, 2018).

Asimismo, en el desarrollo de productos a base de almidones y proteínas, las propiedades del gel se modulan en función al pH del medio. Bravo-Núñez *et al.* (2019) reportaron que el aumento de pH incrementa la capacidad de retención del agua en las mezclas, mientras que el pH ácido disminuye a viscosidad aparente durante el calentamiento y enfriamiento y eleva la temperatura de formación de pasta en una mezcla de maíz con fuentes de proteína de guisante y suero, lo cual se confirmó mediante un análisis microestructural. De esta forma, Amaya-Llano *et al.* (2007)

encontraron que la temperatura y la proporción de proteína tuvieron efectos significativos sobre la densidad aparente de la mezcla, así como la humedad y el pH del alimento tuvieron efectos sobre el índice de expansión.

Consideraciones sobre las propiedades fisicoquímicas y la digestibilidad en el diseño de alimentos funcionales a base de almidón

En la tabla 1.2. se presentan los ingredientes utilizados como fuente de almidón y proteína, el porcentaje de incorporación, así como los efectos en la funcionalidad tecnológica, digestibilidad de la proteína y el almidón, y el valor nutricional. De esta manera, se reportan 15 investigaciones entre 2007 y 2020, los cuales muestran de manera consistente que la interacción con proteínas produce la encapsulación de los almidones por interacciones químicas como puentes de hidrógeno y entrelazamiento con grupos funcionales de los aminoácidos, así como interacciones electrostáticas, lo cual podría relacionarse a la generación de un impedimento estérico en las amilasas produciendo el aumento de las fracciones AR y la disminución de la tasa de liberación de glucosa. Por otro lado, se reportó la afectación de la distribución del agua por interacciones covalentes lo que estaría relacionado al retraso de la gelatinización.

Por esta razón, la inclusión de proteínas en alimentos ricos en almidón es una estrategia crítica para el diseño de productos, la gelatinización del almidón tiene un papel relevante en la microestructura del alimento, relacionada con la conformación del gel de almidón y su accesibilidad a las amilasas, así como en las características sensoriales como la textura.

Tabla 1.2. Efectos identificados por la incorporación de proteína en diferentes matrices alimentarias

Ingredientes/Porcentajes de incorporación en base a muestra	Efectos tecnológicos	Efectos sobre la digestibilidad	Referencia
Formulaciones de aislado de proteína de suero: 0-25-50-75-100 en almidón de maíz	-Disminución de la capacidad emulsionante a medida que aumenta la relación WPI -Disminución en el índice de absorción de agua (IAA) a medida que aumenta la concentración de proteína.	-NR	(Téllez-Morales <i>et al.</i> , 2020)
Aislado de proteína de garbanzo: 3-5-8-10%	-Disminución de la gelatinización del almidón.	-Reducción progresiva de ADR y aumento significativo de ADL y AR. -El índice glicémico estimado disminuyó significativamente y aumentó la digestibilidad de las proteínas <i>in vitro</i> .	(Sofía <i>et al.</i> , 2020)
Harina de garbanzos germinados: 7-15-20-30% en harina de arroz Formulaciones de aislado de proteína de suero: 0-2.5-4.5-10% en soluciones de almidón de maíz nativo al 10%.	-Disminución del proceso de gelatinización -Aceleración de la recristalización posterior al almacenamiento en frío.	-Aumento de las fracciones AR y disminución del contenido de ADR	(Yang <i>et al.</i> , 2019)
Péptidos de soja: 5-10-15% en almidón de maíz y patata	-Aumento de la temperatura de formación de la pasta -Disminución del poder de hinchamiento, de la máxima viscosidad aparente.	-Contenido ADR reducido y contenido AR aumentado.	(Chen <i>et al.</i> , 2019)
Formulaciones con 50 % de diferentes fuentes de proteína (guisante, arroz, albúmina de huevo o suero de leche) en almidón de maíz	-Disminución del perfil de viscosidad aparente. -Aumento de la temperatura y del tiempo de formación de la pasta	-NR	(Bravo-Núñez <i>et al.</i> , 2019)
Formulaciones: Mezclas de harinas de arroz (70-55%), frijol (20 o 40%) y algarrobo (5 o 10%)	-NR	-Mayor contenido de almidón resistente	(Arribas <i>et al.</i> , 2019)
Gluten 0-20% y EGC/EGCG: 20% en almidón de trigo	-NR	-Reducción del grado de digestión del almidón en materia prima y para material cocido con la adición de EGCG	(Xie <i>et al.</i> , 2019)
12% de proteína de guisante hidrolizada en harina de Trigo	-NR	-Reducción de la amilólisis en los primeros 40 min de digestión. -Disminución de la digestibilidad del almidón reduciendo la liberación de glucosa en los primeros 90 min	(López-Barón <i>et al.</i> , 2018)
Semillas de alfalfa: 15-30-45% en harina de arroz	-Aumento proporcional de la dureza con la adición de alfalfa. -Aumento de la actividad antioxidante.	-Disminución lineal del índice de hidrólisis del almidón y aumento de ADL y AR	(Giuberti <i>et al.</i> , 2018)
Formulaciones sin gluten con diferentes porcentajes de harinas de plátano verde (12,5-25-37,5%), garbanzo (12,5-25-37,5%) y maíz azul (25-50-75%).	-NR	-Disminución de la hidrólisis del almidón y aumento del contenido de AR de la pasta proporcional a la fracción de FBC. -Disminución del índice glicémico asociado al contenido de antocianinas en FBC.	(Camelo - Méndez <i>et al.</i> , 2017)
Formulaciones de Aislado de proteína de Patata: 0-5-10-15% en Fécula de Patata	-Mejora en la retrogradación de amilopectina durante el enfriamiento -Recristalización de amilopectina facilitada durante el almacenamiento en frío	-Aumento proporcional del contenido de ADL y AR en mezclas cocidas, enfriadas y recalentadas	(Lu <i>et al.</i> , 2016)
Formulaciones judías blancas: 0-20-40% en Arroz	-Incremento lineal del tiempo de cocción y WAC sin afectar la textura.	-Aumento de la fracción de almidón resistente	(Giuberti <i>et al.</i> , 2015)
Judías: 10-20-30% en harina de sémola	-Disminución de la viscosidad máxima. -Disminución de la gelatinización del almidón.	-Reducción de la digestibilidad del almidón in vitro.	(Kumar y Prabhasanka, 2015)

Ingredientes/Porcentajes de incorporación en base a muestra	Efectos tecnológicos	Efectos sobre la digestibilidad	Referencia
Frijol común: 0-15-30-45% en sémola de trigo	-Aumento de las pérdidas por cocción.	-Los valores totales de almidón disminuyeron. -Aumentar la fracción insoluble no digerible.	(Gallegos-Infante <i>et al.</i> , 2010)
Formulaciones de concentrado de proteína de suero WPC: 25-5% en almidón de maíz	-Disminución del índice de expansión, afectando las propiedades extensionales de la masa	-NR	(Amaya-Llano <i>et al.</i> , 2007)

NR: no reportado.

Asimismo, la calidad del almidón se puede evaluar a través de sus propiedades reológicas y térmicas, las interacciones almidón-proteína pueden limitar la hinchazón del almidón aumentando la dilución de este y generando cambios asociados con la gelatinización, gelificación y disminución del perfil de viscosidad (Bravo-Núñez *et al.*, 2019).

Además, la gelatinización del almidón facilita la relación entre enzima y sustrato y la motilidad molecular y estructural.

Por lo tanto, las interacciones entre el almidón y la proteína podrían reducir la biodisponibilidad porque el proceso de gelatinización está restringido por la presencia de proteínas que podrían formar un complejo electrostático con el almidón. Además, las cargas negativas de la amilopectinas son neutralizadas por la carga positiva de la proteína, la presencia de proteínas causa interferencia en la movilidad del agua a los gránulos de almidón resultando una menor interacción almidón- agua. Adicionalmente, podría haber una interacción entre polímeros generando competencia por el agua disponible provocando su redistribución y retrasando el progreso de la gelatinización (Yang *et al.* 2019; Lu *et al.* 2016).

Bharath Kumar y Prabhasankar (2015) estudiaron el perfil del almidón obtenido en un alimento tipo pasta al que se le incorporó frijol, encontrando que la gelatinización del almidón se redujo significativamente del 60 % al 22%, lo cual se puede deber a que un aumento en el contenido de proteína dificulta la gelatinización, con dicho efecto se disminuye la disponibilidad de almidón rápidamente digerible en los alimentos.

Asimismo, se ha reportado que la inclusión de aislado de proteína de suero (WPI) afectó la viscoelasticidad dinámica del gel de almidón de maíz, con el incremento en la concentración de proteína. De este modo, WPI podría prevenir la transposición de amilosa provocando un gel débil de almidón. Durante la cocción, las interacciones proteína-almidón se relacionaron con puentes de hidrógeno cuya cantidad y fuerza de enlace dependen de la cantidad de proteína en el sistema (Yang *et al.*, 2019; Lu *et al.*, 2016).

Chen *et al.*, (2019) reportaron disminución en la viscosidad máxima planteando que los resultados sugieren una mejora en la estabilidad de los gránulos de almidón, probablemente a través de interacciones electrostáticas. Por tanto, la generación de interacciones electrostáticas entre los componentes podrían permitir que el almidón sea más estable y requiera mayor temperatura y tiempo para la formación de pasta (Bravo-Núñez *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2019). Esta propiedad del almidón desempeña una función esencial en la eventual reducción del IG de los alimentos.

Los resultados de los estudios microestructurales indicaron que, con la incorporación de frijoles, los gránulos de almidón fueron cubiertos por la fibra, mejorando la firmeza de la estructura lo cual está correlacionado con los resultados de textura realizados mediante análisis instrumental (Bharath Kumar y Prabhasankar 2015).

De esta manera, las proteínas que se incorporan en una matriz pueden afectar la hidrólisis enzimática del almidón actuando como una barrera física (Giuberti *et al.*, 2018; Lu *et al.*, 2016) o formando estructuras reticuladas (Giuberti *et al.* 2015; Chen *et al.*, 2019). Por otro lado, la encapsulación del almidón permitió la liberación lenta de glucosa en la digestión, lo cual se relacionó con los resultados en la reducción de la digestibilidad tasa del almidón *in vitro* a medida que se incrementó la incorporación de fuentes de proteína (Bharath Kumar y Prabhasankar, 2015; Yang *et al.* 2019; Sofi *et al.* 2020).

Jenkins *et al.* (1987) estudiaron el efecto de la interacción del complejo almidón -proteína en un alimento a base de trigo y encontraron que la presencia de la proteína en la harina blanca produjo una reducción de la tasa de digestibilidad del almidón *in vitro* y tuvo una relación directa con la disminución de la respuesta glicémica *in vivo*, lo cual puede ser relevante en el efecto de los alimentos en el tracto gastrointestinal. Por otra parte, se ha reportado la reducción del índice glicémico estimado en fideos con harina y aislado de proteína de garbanzo, lo cual podría asociarse a que, durante el procesamiento los gránulos de almidón de arroz son atrapados por la proteína del garbanzo formando complejos de entrecruzamiento no digeribles y obstaculizó el acceso de las enzimas digestivas a los gránulos de almidón de arroz (Sofi *et al.*, 2020).

López-Barón *et al.* (2018) encontraron disminución en la digestibilidad *in vitro* en un snack de trigo al que se le incorporó proteínas de guisante nativa e hidrolizada, la cual fue mayor en la proteína hidrolizada debido a que los grupos hidroxilo se podrían formar mediante la interacción de grupos -OH en almidón con residuos polares de proteína de guisante, incluyendo ácido glutámico, ácido aspártico, serina y treonina, así como por la unión a grupos amina y carbonilo de la cadena principal de la proteína. Yang *et al.* (2019) reportaron que las fracciones de almidón AR aumentaron constantemente con la adición de proteínas, lo que se atribuye a que las proteínas envuelven las redes de almidón.

Asimismo, plantearon que los grupos hidroxilo pueden hacer que la amilosa y la amilopectina se orienten en paralelo con la proteína formando una red más extensa de enlaces de hidrógeno, limitando así la accesibilidad del almidón al ataque enzimático. En concordancia con estos resultados, Arribas *et al.* (2019) mostraron que la presencia de las legumbres (algarrobas y frijol)

redujeron el contenido total de almidón, lo que se atribuyó a interacciones electrostáticas y enlaces de hidrógeno que retendrían el carbohidrato dentro de la matriz de proteínas favoreciendo su agregación de proteínas y disminuyendo su accesibilidad a la amilólisis.

Conclusiones

Las características de los productos alimenticios que incorporan almidón y proteína son el resultado de la naturaleza física y química de las materias primas, así como las interacciones de los componentes en la matriz alimentaria y los fenómenos que ocurren durante el procesamiento. Por esto, la incorporación o sustitución parcial del almidón por fuentes de proteína nativa, aisladas o concentradas ha mostrado efectos en la modificación de diversas propiedades fisicoquímicas y reológicas como la disminución en el proceso de gelatinización, el poder de hinchamiento, la viscosidad máxima aparente, y térmicas como la temperatura y tiempo formación de pasta; lo cual afecta las características nutricionales a través de la reducción de la disponibilidad de almidón rápidamente digerible de los alimentos, disminuyendo la tasa de digestibilidad del almidón y eventualmente la reducción del IG de los alimentos. Con relación a la tasa de digestión del almidón, la incorporación de proteínas podría presentar una restricción de los gránulos de almidón a la hidrólisis enzimática. En consecuencia, se puede reducir progresivamente el ADR y aumentar significativamente el ADL y AR afectando la velocidad de digestión del almidón, lo cual se convierte en una alternativa viable en el desarrollo de alimentos funcionales como una opción dietaria funcional para personas con problemas de salud que requieran el consumo de alimentos de bajo índice glicémico y para prevenir o regular problemas de salud asociados al consumo de alimentos ricos en almidón de alta digestibilidad.

Sin embargo, durante el diseño de un alimento funcional resulta relevante analizar el impacto de diversas variables de procesamiento las cuales pueden inducir cambios dentro de los biopolímeros. Donde, se encontró que dentro de los efectos esperados está el diseño de procesos que a pesar de aplicar altas temperaturas no generen una pérdida significativa de la digestibilidad de proteínas controlando el aumento proporcional en el contenido de ADR y reducción del almidón resistente.

Por otra parte, se encontró que la sustitución de almidón por proteína puede generar efectos no deseados como la disminución del índice de expansión, lo que afecta las propiedades extensionales de la masa y disminuye la capacidad emulsionante, así como el aumento de las pérdidas por cocción causadas por la formación de una red del gluten más débil y donde el almidón lixiviado se filtra más fácilmente en la cocción.

Las investigaciones futuras sobre el diseño de un alimento funcional podrían evaluar las interacciones que se generan con otros componentes como fibras, lípidos y compuestos bioactivos, también se debe considerar evaluar la vida útil de los alimentos y determinar el valor biológico.

Declaraciones éticas

Esta revisión está exenta porque no se reclutó ningún participante humano.

Declaración de conflictos de intereses

Los autores declararon no tener ningún conflicto de intereses potencial con respecto a la investigación, autoría y/o publicación de este artículo.

Fondos

Este trabajo contó con el apoyo de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia de Colombia-UNAD; Fundación Universitaria Agraria de Colombia bajo [Subvención PI190012].

Referencias

- Ali, S., Singh, B., & Sharma, S. (2016). Response surface analysis and extrusion process optimisation of maize–mungbean-based instant weaning food. *International Journal of Food Science and Technology*, *51*(10), 2301–2312. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13186>
- Amaya-Llano, S. L., Morales Hernández, N., Castaño Tostado, E., & Martínez-Bustos, F. (2007). Functional characteristics of extruded blends of whey protein concentrate and corn starch. *Cereal Chemistry*, *84*(2), 195–201. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-84-2-0195>
- Arribas, C., Cabellos, B., Cuadrado, C., Guillamón, E., & Pedrosa, M. M. (2019). Extrusion effect on proximate composition, starch and dietary fibre of ready-to-eat products based on rice fortified with carob fruit and bean. *Lwt*, *111*(May), 387–393. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.05.064>
- Augustin, L. S. A., Kendall, C. W. C., Jenkins, D. J. A., Willett, W. C., Astrup, A., Barclay, A. W., Björck, I., Brand-Miller, J. C., Brighenti, F., Buyken, A. E., Ceriello, A., La Vecchia, C., Livesey, G., Liu, S., Riccardi, G., Rizkalla, S. W., Sievenpiper, J. L., Trichopoulou, A., Wolever, T. M. S., ... Poli, A. (2015). Glycemic index, glycemic load and glycemic response: An International Scientific Consensus Summit from the International Carbohydrate Quality Consortium (ICQC). *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, *25*(9), 795–815. <https://doi.org/10.1016/j.numecd.2015.05.005>
- Bharath Kumar, S., & Prabhasankar, P. (2015). A study on starch profile of rajma bean (*Phaseolus vulgaris*) incorporated noodle dough and its functional characteristics. *Food Chemistry*, *180*, 124–132. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.02.030>
- Bourré, L., Young, G., Hill, H., Fraser, S., Borsuk, Y., Sarkar, A., Sopiwnyk, E., Jones, S., Dyck, A., & Malcolmson, L. (2019). Effect of dry and steam heating on the functional and bread baking properties of yellow pea and navy bean flours. *Cereal Chemistry*, *96*(6), 1079–1092. <https://doi.org/10.1002/cche.10218>
- Bravo-Núñez, Á., Garzón, R., Rosell, C. M., & Gómez, M. (2019). Evaluation of starch-protein interactions as a function of pH. *Foods*, *8*(5), 2–11. <https://doi.org/10.3390/foods8050155>
- Cabrera-Chávez, F., Calderón de la Barca, A. M., Islas-Rubio, A. R., Marti, A., Marengo, M., Pagani, M. A., Bonomi, F., & Iametti, S. (2012). Molecular rearrangements in extrusion processes for the production of amaranth-enriched, gluten-free rice pasta. *LWT - Food Science and Technology*, *47*(2), 421–426. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.01.040>
- Camelo-Méndez, G., Flores-Silva, P., Agama-Acevedo, E., Tovar, J., & Bello-Pérez, L. (2017).

- Incorporation of whole blue maize flour increases antioxidant capacity and reduces*. 1–28.
- Chen, X., Luo, J., Fu, L., Cai, D., Lu, X., Liang, Z., Zhu, J., & Li, L. (2019). Structural, physicochemical, and digestibility properties of starch-soybean peptide complex subjected to heat moisture treatment. *Food Chemistry*, 297(June). <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.124957>
- Delamare, G. Y. F., Butterworth, P. J., Ellis, P. R., Hill, S., Warren, F. J., & Edwards, C. H. (2020). Incorporation of a novel leguminous ingredient into savoury biscuits reduces their starch digestibility: Implications for lowering the Glycaemic Index of cereal products. *Food Chemistry: X*, 5(August 2019). <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2020.100078>
- Dhinda, F., A., J. L., Prakash, J., & Dasappa, I. (2012). Effect of Ingredients on Rheological, Nutritional and Quality Characteristics of High Protein, High Fibre and Low Carbohydrate Bread. *Food and Bioprocess Technology*, 5(8), 2998–3006. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0752-y>
- Dhingra, D., Michael, M., Rajput, H., & Patil, R. T. (2012). Dietary fibre in foods: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 49(3), 255–266. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0365-5>
- Dhingra, & Jood. (2002). Organoleptic and nutritional evaluation of wheat breads supplemented with soybean and barley flour. *Food Chemistry*, 77, 479–488. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.05.006>
- EFSA. (2011). Scientific Opinion on the substantiation of health claims related to resistant starch and reduction of post-prandial glycaemic responses (ID 681), “digestive health benefits” (ID 682) and “favours a normal colon metabolism” (ID 783) pursuant to Article 13. *EFSA Journal*, 9(4). <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2011.2024>
- Englyst, H. N., Kingman, S. M., & Cummings, J. H. (1992). Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. *European Journal of Clinical Nutrition*, 46 Suppl 2, S33-50.
- Fernandes, J. M., Madalena, D. A., Vicente, A. A., & Pinheiro, A. C. (2021). Influence of the addition of different ingredients on the bioaccessibility of glucose released from rice during dynamic in vitro gastrointestinal digestion. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 72(1), 45–56. <https://doi.org/10.1080/09637486.2020.1763926>
- Ferruzzi, M. G., Hamaker, B. R., & Bordenave, N. (2020). Phenolic compounds are less degraded in presence of starch than in presence of proteins through processing in model porridges. *Food Chemistry*, 309(June 2019). <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125769>

- Flores-Silva, P. C., Rodriguez-Ambriz, S. L., & Bello-Pérez, L. A. (2015). Gluten-Free Snacks Using Plantain-Chickpea and Maize Blend: Chemical Composition, Starch Digestibility, and Predicted Glycemic Index. *Journal of Food Science*, 80(5), C961–C966. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12865>
- Gallegos-Infante, J. A., Bello-Perez, L. A., Rocha-Guzman, N. E., Gonzalez-Laredo, R. F., & Avila-Ontiveros, M. (2010). Effect of the addition of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) flour on the in vitro digestibility of starch and undigestible carbohydrates in Spaghetti. *Journal of Food Science*, 75(5). <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01621.x>
- Giuberti, G., Gallo, A., Cerioli, C., Fortunati, P., & Masoero, F. (2015). Cooking quality and starch digestibility of gluten free pasta using new bean flour. *Food Chemistry*, 175, 43–49. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.11.127>
- Giuberti, G., Rocchetti, G., Sigolo, S., Fortunati, P., Lucini, L., & Gallo, A. (2018). Exploitation of alfalfa seed (*Medicago sativa* L.) flour into gluten-free rice cookies: Nutritional, antioxidant and quality characteristics. *Food Chemistry*, 239, 679–687. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.004>
- Gourineni, V., Stewart, M. L., Skorge, R., & Wolever, T. (2019). Glycemic Index of Slowly Digestible Carbohydrate Alone and in Powdered Drink-Mix. *Nutrients*, 11(6).
- Huerta-Abrego, A., Segura-Campos, M., Chel-Guerrero, L., & Betancur-Ancona, D. (2010). Changes in the functional properties of three starches by interaction with lima bean proteins. *Food Technology and Biotechnology*, 48(1), 36–41.
- Jenkins, D. J. A., Thorne, M. J., Wolever, T. M. S., Rao, A. V., & Thompson, L. U. (1987). The effect of starch-protein interaction in wheat on the glycemic response and rate of in vitro digestion. *American Journal of Clinical Nutrition*, 45(5), 946–951. <https://doi.org/10.1093/ajcn/45.5.946>
- Kamble, D. B., Singh, R., Rani, S., Upadhyay, A., Kaur, B. P., Kumar, N., & Thangalakshmi, S. (2020). Evaluation of structural, chemical and digestibility properties of multigrain pasta. *Journal of Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04616-x>
- Khan, S. H., Butt, M. S., Anjum, F. M., & Sameen, A. (2011). Quality evaluation of rice bran protein isolate-based weaning food for preschoolers. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 62(3), 280–288. <https://doi.org/10.3109/09637486.2010.529802>
- López-Barón, N., Sagnelli, D., Blennow, A., Holse, M., Gao, J., Saaby, L., Müllertz, A., Jespersen, B., & Vasanthan, T. (2018). Hydrolysed pea proteins mitigate in vitro wheat starch digestibility. *Food Hydrocolloids*, 79, 117–126.

- <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.12.009>
- Lu, Z. H., Donner, E., Yada, R. Y., & Liu, Q. (2016). Physicochemical properties and in vitro starch digestibility of potato starch/protein blends. *Carbohydrate Polymers*, 154, 214–222. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.08.055>
- Mann, J., Cummings, J. H., Englyst, H. N., Key, T., Liu, S., Riccardi, G., Summerbell, C., Uauy, R., van Dam, R. M., Venn, B., Vorster, H. H., & Wiseman, M. (2007). FAO/WHO Scientific Update on carbohydrates in human nutrition: Conclusions. *European Journal of Clinical Nutrition*, 61, S132–S137. <https://doi.org/10.1038/sj.ejcn.1602943>
- Menon, R., Padmaja, G., Jyothi, A. N., Asha, V., & Sajeew, M. S. (2016). Gluten-free starch noodles from sweet potato with reduced starch digestibility and enhanced protein content. *Journal of Food Science and Technology*, 53(9), 3532–3542. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2330-9>
- MinSalud. (2015). *Encuesta Nacional de la Situación Nutricional en Colombia 2015 - ENSIN*.
- Muoki, P. N., De Kock, H. L., & Emmambux, M. N. (2012). Effect of soy flour addition and heat-processing method on nutritional quality and consumer acceptability of cassava complementary porridges. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 92(8), 1771–1779. <https://doi.org/10.1002/jsfa.5545>
- Ndagire, C. T., Muyonga, J. H., Manju, R., & Nakimbugwe, D. (2015). Optimized formulation and processing protocol for a supplementary bean-based composite flour. *Food Science and Nutrition*, 3(6), 527–538. <https://doi.org/10.1002/fsn3.244>
- Nugent, A. P. (2005). Health properties of resistant starch. *Nutrition Bulletin*, 30(1), 27–54. <https://doi.org/10.1111/j.1467-3010.2005.00481.x>
- Omosebi, M. O., Osundahunsi, O. F., & Fagbemi, T. N. (2018). Effect of extrusion on protein quality, antinutritional factors, and digestibility of complementary diet from quality protein maize and soybean protein concentrate. *Journal of Food Biochemistry*, 42(4), 1–10. <https://doi.org/10.1111/jfbc.12508>
- Pellegrini, N., Vittadini, E., & Fogliano, V. (2020). Designing food structure to slow down digestion in starch-rich products. *Current Opinion in Food Science*, 32, 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.01.010>
- Rathod, R. P., & Annapure, U. S. (2017). Physicochemical properties, protein and starch digestibility of lentil based noodle prepared by using extrusion processing. *LWT - Food Science and Technology*, 80, 121–130. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.02.001>
- Sofi, S. A., Singh, J., Chhikara, N., & Panghal, A. (2020). Effect of incorporation of germinated

- flour and protein isolate from chickpea on different quality characteristics of rice-based noodle. *Cereal Chemistry*, 97(1), 85–94. <https://doi.org/10.1002/cche.10192>
- Świeca, M., Sęczyk, Ł., Gawlik-Dziki, U., & Dziki, D. (2014). Bread enriched with quinoa leaves - The influence of protein-phenolics interactions on the nutritional and antioxidant quality. *Food Chemistry*, 162, 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.04.044>
- Téllez-Morales, J. A., Herman-Lara, E., Gómez-Aldapa, C. A., & Rodríguez-Miranda, J. (2020). Techno-functional properties of the starch-protein interaction during extrusion-cooking of a model system (corn starch and whey protein isolate). *Lwt*, 132(April). <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109789>
- WHO. (2017). *Global Health Observatory data repository*.
- Xie, F., Huang, Q., Fang, F., Chen, S., Wang, Z., Wang, K., Fu, X., & Zhang, B. (2019). Effects of tea polyphenols and gluten addition on in vitro wheat starch digestion properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 126, 525–530. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.224>
- Yang, C., Zhong, F., Douglas Goff, H., & Li, Y. (2019). Study on starch-protein interactions and their effects on physicochemical and digestible properties of the blends. *Food Chemistry*, 280(December 2018), 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.12.028>

Capítulo 2. Pretratamientos y tamaño de partícula sobre el índice glicémico, propiedades reológicas y funcionales de las harinas de frijol.

Adriana Mejía-Terán, Carla María Blanco-Lizarazo, Eduardo Leiva Mateus, Indira Sotelo-Díaz, Darío Fernando Mejía Terán, Enrique Geffroy

International Journal of Food Science

To link to this article: <https://doi.org/10.1155/2024/6336837>

Resumen

El contenido de proteínas y carbohidratos de digestión lenta de los frijoles los convierte en una opción atractiva para el desarrollo de alimentos saludables. Sin embargo, sus propiedades están influenciadas por los procesos de extracción de la harina. Este estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto del tamaño de las partículas y tres pretratamientos: deshidratado (D), remojo + cocción + deshidratación 3 h (RCD3) y remojo + cocción + deshidratación 24 h (RCD24) – sobre el índice glicémico estimado (eIG) en comparación con la harina de frijol cruda (C). La metodología abarcó la absorción de agua (IAA), la solubilidad en agua (ISA), el contenido de amilosa, la digestibilidad del almidón, el eIG, la cuantificación fenólica y la reología. Los resultados mostraron que IAA se correlacionaba negativamente con el ISA y el contenido de amilosa, variando entre pretratamientos y tamaños. IAA tuvo un comportamiento en aumento $D < RCD24 < RCD3 < C$. La liberación de glucosa (IH) difirió entre las fracciones finas (125 μm) y gruesas (242 μm), y RCD24 y C mostraron el índice glicémico estimado (eIG) más bajo (22,8–24,2). RCD3 tenía la mayor concentración de flavonoides, mientras que C y D tenían más quercetina-3-glucósido. RCD24 mostró módulos elásticos/viscosos más altos que C. Las harinas de frijol de todos los tratamientos tenían un eIG bajo y contenían polifenoles bioactivos (catequina, epicatequina, ácido ferúlico, quercetina). El tratamiento óptimo fue RCD24, particularmente en la fracción gruesa, lo que muestra potencial para el desarrollo de alimentos funcionales y aplicaciones novedosas como la nutrición de precisión.

Palabras clave:

harinas sin gluten, tamaño de partícula, valor nutricional, harinas alternativas, tasa de digestibilidad.

1. Introducción

Las tendencias alimentarias actuales revelan una prominencia de los alimentos bajos en calorías, de bajo índice glicémico y sin gluten relacionados con beneficios funcionales para la salud y la nutrición de precisión (Kan *et al.*, 2018). Entre las legumbres, los frijoles son una opción atractiva para el diseño de alimentos debido a su alto contenido de proteínas y carbohidratos no digeribles y de digestión lenta, que fermentan en el intestino grueso como almidón resistente y oligosacáridos no digeribles (Cappa *et al.*, 2020). También contienen compuestos fenólicos como flavonoides y ácidos fenólicos que pueden tener actividad inhibidora de α -amilasa, α -glucosidasa y lipasa, así como propiedades antioxidantes, potencialmente beneficiosas para el control de la diabetes, la prevención de la obesidad y la prescripción nutricional personalizada como un enfoque prometedor. en prácticas de precisión nutricional (de Toro-Martín *et al.*, 2017; Mahoma *et al.*, 2022). Así, los compuestos presentes en los frijoles tienen potencialmente beneficios para la salud, cuyos efectos son directamente proporcionales a su ingesta (Ganesan & Xu, 2017). Por lo tanto, se ha identificado la conversión de legumbres en harina para uso tecnológico y como aditivos alimentarios, aumentando así su aplicación en alimentos procesados (Naiker *et al.*, 2020; Lee *et al.*, 2018).

Sin embargo, las legumbres contienen factores antinutricionales como compuestos proteicos (lectinas, inhibidores de proteasas o péptidos antifúngicos) y no proteicos (ácido fítico, alcaloides y compuestos fenólicos específicos), que reducen la absorción y disminuyen la digestibilidad y la biodisponibilidad de algunas nutrientes, que podrían resultar tóxicos y provocar malestar fisiológico cuando se consumen semillas o harinas crudas; además, pueden impartir sabores amargos y efectos desagradables a los alimentos (Bessada *et al.*, 2019). Así, para inactivar o reducir sus efectos antinutricionales, los granos enteros son pretratados, generalmente mediante procesos térmicos, antes de la molienda (Choe *et al.*, 2022). Se ha sugerido que los pretratamientos combinados que incluyen al menos tres métodos de procesamiento, como remojo, cocción a presión y deshidratación, reducen eficazmente la actividad inhibidora de compuestos tóxicos o no nutricionales (Kamalasundari *et al.*, 2019). Sin embargo, los pretratamientos también pueden modificar la digestibilidad de las harinas de leguminosas y promover interacciones físicas moleculares entre el almidón y las proteínas, que se correlacionan con las fracciones nutricionales del almidón (ADL-AR), la tasa de hidrólisis y el índice glicémico (Chávez-Murillo *et al.*, 2018).

En consecuencia, se ha informado que las características fisicoquímicas y funcionales de las harinas se rigen por diferencias relacionadas con la variedad, los tratamientos térmicos y los métodos de molienda (Choe *et al.*, 2022; Chung *et al.*, 2008; Lin & Fernández-Fraguas, 2020). Se ha demostrado que factores como el diámetro de las partículas de harina influyen en la composición nutricional, la capacidad de retención de agua y la digestibilidad del almidón de las fracciones (Ge *et al.*, 2023). Guo *et al.*, (2018) encontraron que las harinas de trigo crudas presentaron tasas de digestión más bajas en las fracciones de mayor tamaño de partículas (250 – 500 μm); además, el contenido de almidón resistente (AR) de las harinas gruesas fue mayor que el de las harinas finas. Estos resultados se atribuyen a la estructura más alterada y a la mayor superficie de las partículas de harinas finas, lo que aumenta su susceptibilidad a la amilólisis. Otros estudios muestran una alta variabilidad en la tasa de digestibilidad de las harinas de leguminosas dependiendo de variables del proceso que alteran la estructura celular, lo que podría afectar la modificación de la hidrólisis del almidón y el índice glicémico. Estos cambios inducen modificaciones en los biopolímeros y afectan las propiedades nutricionales, tecnológicas y funcionales de la matriz del alimento (Mejía Terán & Blanco-Lizarazo, 2021; Parada & Santos, 2016). Sin embargo, la literatura sobre el impacto de la sinergia de los pretratamientos y el tamaño de partícula sobre las características tecnológicas de las harinas de leguminosas y el índice glicémico posprandial es escasa.

En este estudio se investigó un nuevo frijol colombiano: la variedad de frijol de la UNAD-Dos Zandú (certificado de obtentor A182474), fue seleccionada debido a su adaptabilidad a climas templados y fríos, además de su notable tolerancia a enfermedades. Desarrollada mediante cruce recíproco, esta variedad arbustiva reduce los impactos ambientales al eliminar la necesidad de estructuras de soporte y reducir el uso de agroquímicos. Sus características morfoagronómicas, como granos grandes y color atractivo son muy valoradas por los consumidores y su alto rendimiento promete beneficios económicos. Además, su composición química contribuye a un perfil nutricional beneficioso. Esta selección se realizó en base a sus múltiples ventajas agronómicas, económicas y ambientales.

Los pretratamientos y sus variables de proceso fueron seleccionados para mejorar los factores nutricionales y tecnológicos de la harina de frijol. El tratamiento de remojo se basó en los resultados de Naiker *et al.*, (2020) orientado a rehidratar el frijol y activar la fitasa endógena y reducir los tiempos de cocción. Además, se aplicó el proceso de cocción a presión para reducir los factores antinutricionales, ya que cocinar bajo presión podría permitir mayores velocidades

de calentamiento, reduciendo así la pérdida de nutrientes. Además, este pretratamiento se asoció con un aumento en la fracción de resistencia de la hidrólisis enzimática, dado que los polímeros de almidón gelatinizados podrían retrogradar a una forma menos soluble. Se eligió el proceso de secado para aumentar el contenido de fracciones AR y mejorar la biodisponibilidad de los compuestos fenólicos (Hassan & Youssef, 2012; Naiker *et al.*, 2020; Ramírez-Jiménez *et al.*, 2014; Siddiq *et al.*, 2013).

En consecuencia, esta investigación tuvo como objetivo evaluar el índice glicémico, las propiedades tecnológicas, la composición y concentración de compuestos fenólicos y las propiedades reológicas en harinas de frijol con diferentes tamaños de partículas y tres pretratamientos (remojo, cocción y deshidratación) en comparación con harinas de frijol crudas.

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

Se estudió la variedad de frijol UNAD-DOS ZANDU, proporcionada por el Centro de Investigaciones Agrícolas y Biotecnológicas y el programa de mejoramiento de frijol de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia, UNAD, Dos Quebradas, Risaralda, Colombia [4°50'19" N 75° 40'13" O]. La composición química aproximada del frijol UNAD-DOS ZANDU fue 37,67 ± 0,9% almidón nativo, 4,61% azúcares totales, 22,07% ± 0,21 proteína cruda, 0,50 ± 0,01% grasa, 5,13 ± 0,21% fibra natural, 3,39 ± 0,09% ceniza y 14,83 ± 0,12% de humedad. Todas las pruebas analíticas se realizaron al azar en tres lotes de frijol independientes.

2.2. Diseño de experimentos

Este estudio se realizó en tres fases. La primera fase consistió en un diseño completamente al azar con dos factores correspondientes al pretratamiento y tamaño de partícula; cada análisis se realizó por triplicado a partir de tres lotes independientes de frijoles.

Fase 1: Se evaluaron el IAA y el ISA de diversas harinas de frijol mediante un diseño completamente al azar (4x5). Estos factores correspondieron a diferentes métodos de pretratamientos para la obtención de harina de frijol y diámetros de partícula. Los métodos de pretratamiento comprendieron cuatro niveles: Deshidratado (D), Remojo + Cocción + Deshidratación 3 h (RCD3), Remojo + Cocción + Deshidratación 24 h (RCD24) y Harina cruda (C) como control. Los diámetros de las partículas se evaluaron en cinco niveles: 500 µm, 425 µm, 300 µm, 212 µm y 150 µm.

Fase 2: las variables dependientes fueron la tasa de digestibilidad, elG, proporciones de fracción de almidón, porcentajes de amilosa/amilopectina y compuestos fenólicos cuantificados. Los diámetros de partícula de cada harina se agruparon según los resultados de IAA e ISA. En consecuencia, las harinas de frijol (RCD3 y RCD24) se clasificaron en fracciones enteras, gruesas y finas, agrupándolas mediante una prueba de contraste ortogonal y evaluando diferencias significativas entre los tamaños de partícula estudiados. La harina control C y pretratamiento D no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre sus fracciones. Así, se evaluó la harina entera sin fraccionamiento.

El diámetro promedio de partícula para las fracciones enteras, gruesas y finas de RCD3 fue de 163,8 μm , 192,7 μm y 125 μm , respectivamente; y para RCD24, fue de 161 μm , 242 μm y 125 μm , respectivamente. Las harinas enteras de frijol C y D tuvieron un diámetro de partícula promedio de 179,1 μm y 189,4 μm , respectivamente.

Fase 3: A partir de los resultados de las fases 1 y 2, el comportamiento reológico, la medición del flujo, el barrido de deformación, la prueba de barrido de frecuencia y la rampa de temperatura se realizaron en la fracción gruesa RCD24 (RCD24_G) y en las harinas de frijol enteras (C) debido a su demostrado elG más bajo.

2.3. Pretratamientos para la producción de harina.

Para el control C, se molieron frijoles crudos; para el pretratamiento D, los granos se secaron a 120 °C durante 30 minutos en un horno de bandeja de convección forzada Heratherm (Thermo Scientific, Alemania). Para los pretratamientos RCD3 y RCD24, los frijoles se remojaron en agua (1:3 p/v) a temperatura ambiente durante 12 h y luego se cocinaron en agua caliente en una olla a presión (Imusa, Colombia) durante 30 min. Luego se lavaron con agua fría a 4 °C durante 2 min. Los frijoles RCD3 se secaron a 120 °C durante 3 h, mientras que los frijoles RCD24 se secaron a 75 °C durante 24 h. Ambos pretratamientos se realizaron en un horno de bandejas de convección forzada Heratherm (Thermo Scientific, Alemania).

Durante el remojo se verificó la presencia de malos sabores relacionados con la fermentación. Para prevenir este proceso se evaluó la calidad microbiológica del frijol y se implementaron buenas prácticas de producción, almacenamiento y manejo. Además, se utilizó agua potable.

Después de aplicar los pretratamientos a los granos, se realizó una molienda en seco durante 2 minutos en un molino pulverizador de granos eléctrico de 5,29 oz (Cgoldenwall, China). Las harinas se fraccionaron secuencialmente en la serie de cinco tamices ASTM (estándar de EEUU)

durante 6 min en un tamizador vibratorio Analysette 3 Spartan (Fritsch, Alemania). Todas las harinas y fracciones se envasaron al vacío en bolsas plásticas de polietileno de baja densidad y se almacenaron a 4 °C hasta su análisis.

2.4. Caracterización tecnológica de harinas

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

IAA y el ISA se determinaron según el método propuesto por Anderson *et al.*, (1969) con modificaciones menores. Se dispersó una muestra de 1 g de cada fracción de harina en 10 ml de agua destilada a 30 °C y se agitó durante 30 minutos a 400 rpm en un agitador magnético Velp Arc con calentamiento (VELP Scientifica, Italia). Se añadió agua a las dispersiones para llevarlas hasta 13 ml y luego se centrifugaron a 1700 G durante 10 minutos en una centrífuga Power Spin™ DX (UNICO, Nueva Jersey, EEUU). El sobrenadante se decantó para determinar el total de sólidos solubles disueltos y el sedimento se pesó según la metodología propuesta por Igual *et al.*, (2021). El IAA correspondió al peso del sedimento tras la eliminación del sobrenadante por unidad de peso de la muestra original. El ISA correspondió al peso de los sólidos disueltos en el sobrenadante medido en un refractómetro digital Brix, rango 0–85% (Milwaukee Instruments, Wisconsin, EEUU) y expresado como porcentaje del peso original de la muestra.

2.5. Análisis de propiedades funcionales.

2.5.1. Contenido de amilosa/amilopectina

El contenido de amilosa de las harinas se determinó siguiendo los protocolos de Megazyme® utilizando el kit de amilosa K-AMYL 06/18 (Megazyme, Wicklow, Irlanda). Los lípidos se eliminaron precipitando el almidón en etanol y recuperando el almidón precipitado. Se añadió lectina concanavalina A para la síntesis específica de complejos de amilopectina, los cuales se eliminaron mediante centrifugación a 3000 G durante 20 min en una centrífuga Power Spin™ DX (UNICO, Nueva Jersey, EEUU). Posteriormente, se realizó y analizó la hidrólisis enzimática de amilosa a D-glucosa utilizando el reactivo GOPOD mediante cuantificación colorimétrica con el kit D-Glucose Assay (Megazyme International, Wicklow, Irlanda).

2.5.2. Análisis cuantitativo de compuestos fenólicos.

Los extractos fenólicos se obtuvieron en una mezcla de metanol: 0,2% de agua en ácido fórmico (1:1), agitación con vórtex (5 min) y sonicación (5 min); luego, estos se analizaron cuantitativamente mediante cromatografía líquida de ultra alto rendimiento (UHPLC), Dionex Ultimate 3000 (Thermo Scientific, Sunnyvale, CA, EEUU). Los espectros de masas se adquirieron en el rango de masas m/z 60–900. La identificación de compuestos se realizó utilizando el modo de adquisición de escaneo completo y extracción de iones (EIC) correspondiente al $[M+H]^+$ de los compuestos de interés, midiendo la masa con exactitud y precisión de $\Delta ppm < 1$ y usando una mezcla de solución estándar del Compuestos fenólicos.

2.5.3. Digestión *in vitro* de almidón y cálculo de fracciones de almidón

La digestión *in vitro* del almidón se determinó según el protocolo propuesto por Englyst *et al.*, (1992) con algunas modificaciones. Se realizó un procedimiento de digestión de 2 fases que involucra una fase gástrica y otra pancreática. En la digestión gástrica simulada, las muestras de harina se incubaron en una solución de 5 ml de HCl 0,05 M, pH 1,5, con 7 mg de pepsina durante 60 min a 37 °C. Para simular la fase pancreática, el pH se ajustó a 5,2 con tampón de acetato de sodio 0,5 M (3,5 ml) con la adición de amilasa pancreática (10 mg), amilogucosidasa (0,06 ml) e invertasa (0,086 mg); las enzimas utilizadas fueron Sigma-Aldrich (St. Louis, EEUU). La glucosa liberada de la muestra se determinó colorimétricamente con el reactivo de glucosa oxidasa/peroxidasa (GOPOD) utilizando el kit de ensayo de D-Glucosa (Megazyme International, Wicklow, Irlanda) a 0, 20, 60, 120 y 180 min. Se calcularon los contenidos de almidón rápidamente digerido (ADR, hidrolizado hasta los 20 min), almidón lentamente digerido (ADL, hidrolizado hasta los 120 min) y almidón resistente (AR, no hidrolizado después de 120 min). Como estándar se utilizó almidón de maíz (alto en amilosa, 68%) (Megazyme International, Wicklow, Irlanda).

2.5.4. Índice glicémico estimado (eIG)

El eIG se determinó mediante el método *in vitro* propuesto por Granfeldt *et al.*, (1994) basándose en el índice de hidrólisis (HI) de cada muestra. El HI se calculó como la relación entre el área bajo la curva de hidrólisis (0-180 min) de la muestra y el área bajo la curva del estándar de almidón de maíz con alto contenido de amilosa (68%) (Megazyme International, Wicklow, Irlanda).

2.5.5. Propiedades reológicas

Las masas se prepararon con base en pruebas preliminares y el índice de absorción de agua de las harinas, utilizando agua desionizada a 25 °C en una proporción harina-agua de 1:1,3. Las muestras se dejaron reposar durante 30 minutos antes del análisis.

Las propiedades reológicas de las muestras C y RCD24_G se determinaron utilizando un reómetro de tensión controlada ARES-G2 (TA Instruments, New Castle, DE, EEUU) equipado con placas paralelas (25 mm de diámetro, 2 mm de espaciado). Se cargaron aproximadamente 982 mm³ de la muestra en las placas para su medición. La placa superior se colocó lentamente sobre la muestra (0,001 mm s⁻¹) para minimizar las tensiones adicionales debidas a la compresión. Posteriormente, se limpió el exceso de muestra y se dejó la muestra en reposo durante cinco minutos antes de comenzar las mediciones. Este procedimiento se repitió para cada prueba realizada. El comportamiento reológico se estudió mediante dos tipos de pruebas: de flujo (viscosidad vs. velocidad de corte) y oscilatorias (frecuencia, barridos de deformación y rampa de temperatura).

Se aplicó una velocidad de corte de 0,1 a 10 s⁻¹ para la medición del flujo y los datos obtenidos se ajustaron al modelo de ley de potencia propuesto por Ostwald-de Waele; la prueba de barrido de deformación se evaluó con una oscilación de deformación entre 0,01 – 10%; Los barridos de frecuencia se realizaron en un rango de frecuencia angular de 0,1 a 100 rad/s, con una tensión del 1% establecida dentro de la región viscoelástica lineal a 25 °C. Las pruebas de rampa de temperatura en las masas se llevaron a cabo en un rango de temperatura de 25 °C a 90 °C y luego se enfriaron a 25 °C a una velocidad de 2 °C min⁻¹, frecuencia constante (ω) 6,28 rad/s (1 Hz), y 0,05% de deformación. El módulo de almacenamiento (G'), el módulo de pérdida (G'') y el valor de la tangente de pérdida ($\tan(\delta) = G''/G'$) se obtuvieron a partir de estas mediciones reológicas. Los mapas de textura y clasificación de materiales se construyeron según Schreuders *et al.*, (2022).

2.6. Análisis estadístico

La fase uno del análisis estadístico se realizó utilizando un análisis de varianza de dos vías, la prueba de comparación múltiple de Duncan y contrastes ortogonales ($\alpha = 0,05$) para analizar las diferencias entre las medias en IAA e ISA y sus interacciones. Para la segunda fase se realizó un análisis de varianza unidireccional y la prueba de comparación múltiple de Tukey ($\alpha = 0,05$). Se realizó un análisis de correlación de Pearson y Spearman para establecer posibles relaciones

lineales y lineales monótonas entre las variables evaluadas. Se utilizó el software estadístico SAS ODA para todos los procedimientos estadísticos (SAS Institute, Inc., Cary, NC).

3. Resultados y discusión

3.1. IAA e ISA

La Figura 2.1. muestra los valores de IAA e ISA para cada pretratamiento por tamaño de partícula de las harinas de frijol y el control (C). Para los valores de IAA de las harinas de frijol, existen diferencias altamente significativas entre los pretratamientos y los tamaños de partícula ($p < 0,0001$) (Figura 2.1A), así como interacciones significativas entre ambos factores ($p < 0,05$). Así, IAA aumenta significativamente con el pretratamiento en orden ascendente para D, RCD24 y RCD3, en comparación con C para todos los diámetros de partículas evaluados ($p < 0,05$). La fracción de 125 μm del control C presentó el menor IAA (2,27) con diferencias significativas ($p < 0,05$) respecto a las harinas con los pretratamientos. Sin embargo, no hubo diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los tamaños de partículas para RCD3. No hubo diferencias significativas ($p > 0,05$) entre las fracciones de 256 μm y 363 μm en el pretratamiento (D) y el control (C).

Asimismo, se observó una correlación negativa entre ISA y IAA en la harina de frijol ($r = -0,83$; $p = 0,0001$). Por lo tanto, IAA disminuye cuando ISA aumenta a medida que disminuyen los tamaños de partículas de las fracciones.

La disminución del IAA en el tamaño de partícula más pequeño de las fracciones coincide con los resultados encontrados por Feng *et al.*, (2022), quien sugiere que la reducción del tamaño de las partículas mediante la molienda aumenta la absorción de agua debido a la destrucción de la integridad estructural, lo que lleva a la ruptura de los enlaces de hidrógeno y expone niveles más altos de grupos hidrófilos. Además, las harinas de frijol con diámetros de partículas más pequeños exhiben una mayor superficie, lo que aumenta el potencial de absorción de agua superficial, lo que limita la gelatinización del almidón y reduce el IAA. Sin embargo, el aumento de la superficie también mejora la exposición al almidón, lo que permite la formación de dextrinas y carbohidratos simples, aumentando así el ISA (Ekielski *et al.*, 2020).

El valor IAA promedio para C fue consistente con Kenar *et al.*, (2020) reportan valores de 2,74 en harina de frijol blanco crudo, y Wani *et al.*, (2013) reportan valores entre 2,6 y 2,7 en harina de frijol cruda. Los valores de IAA aumentaron en las harinas de frijol pretratadas a altas temperaturas en comparación con la harina cruda.

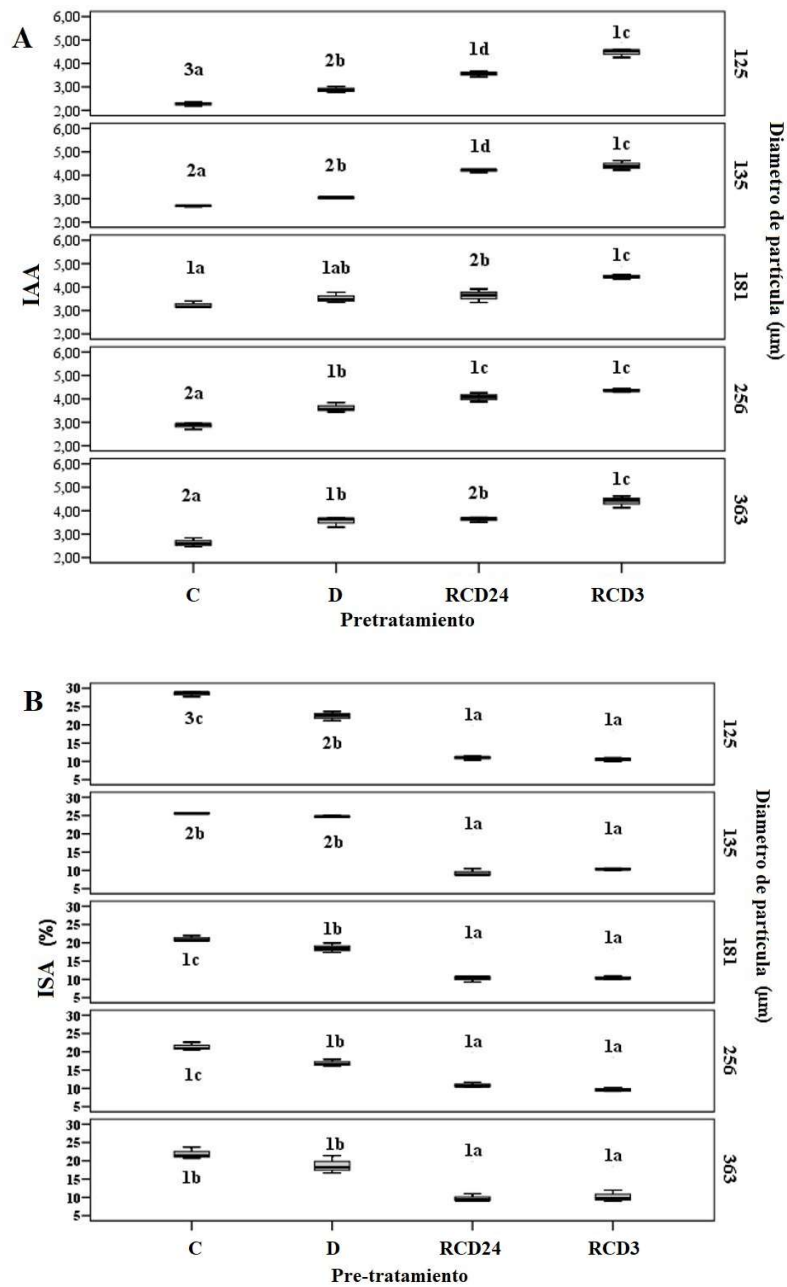


Figura 2.1. Índice de absorción de agua-IAA (A) e índice de solubilidad en agua-ISA (B) de harinas de frijol, sometidas a los pre-tratamientos: cruda (C), deshidratada (D), remojo + cocción + deshidratación 3 h (RCD3) y remojo + cocción + de deshidratación por 24 h (RCD24).

Los datos se expresan como valores medios ($n = 3$) \pm barra de error estándar.

^{a-d} Las letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$) entre pre-tratamientos a través de prueba de Duncan ¹⁻³

^{1 y 2} Los números diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$) entre diámetros de partícula a través de prueba de Duncan

Este comportamiento fue concordante con lo encontrado por Naiker *et al.*, (2020) para harinas de frijol jacinto, donde la capacidad de absorción de agua aumentó significativamente de 0,72 a 2,66 en harina cruda por efecto del remojo y cocción a alta presión y tratamientos de deshidratación. Este fenómeno podría atribuirse a procesos de desnaturalización y despliegue de proteínas, que exponen los enlaces peptídicos, lo que proporcionaría una mayor accesibilidad a los grupos polares de los aminoácidos y un aumento en la relación superficie-masa ligado a un aumento de los enlaces de hidrógeno no covalentes entre polipéptidos, cadenas y moléculas de agua (Kenar *et al.*, 2020; Lin & Fernández-Fraguas, 2020). Además, los pretratamientos térmicos de la RCD podrían haber aumentado la dextrinización del almidón y la descomposición de la amilopectina. Estos fenómenos podrían conducir a la gelatinización del almidón y a una mayor interacción con el agua (Siddiq *et al.*, 2013).

Los valores promedio de ISA para las harinas de frijol fluctuaron entre 9,66 y 28,47% (Figura 2.1B). Esta variable tecnológica presentó diferencias altamente significativas entre pretratamientos y diámetros de partículas ($p < 0,0001$). Las interacciones entre ambos factores también fueron altamente significativas ($p < 0,0001$). Sin embargo, el control de frijol C presentó las mayores magnitudes para este índice. También se observó que no hubo diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$) entre los tamaños de partícula evaluados para RCD3 y RCD24.

La harina control C presentó el mayor valor promedio de ISA de 23,04%. Este valor es similar al de las harinas crudas de frijol blanco, según lo informado por Kenar *et al.*, (2020) quienes informaron un ISA más alto (17,6%) en comparación con las harinas de frijol pinto procesadas mediante cocción a chorro a 138 °C y secado en tambor. El valor ISA para C es más alto que el de las harinas procesadas porque las harinas crudas son probablemente heterogéneas y contienen componentes solubles de menor peso molecular, como el almidón nativo. Además, las harinas crudas pueden contener proteínas nativas que, al ser más solubles, se lixivian más fácilmente cuando no han sido tratadas térmicamente. Por el contrario, las harinas pretratadas pueden contener una mezcla de polímeros y solutos de bajo peso molecular que podrían quedar atrapados en la matriz, incluidas amilosa, amilopectina y proteínas desnaturalizadas debido al calor. Esto puede dificultar la solubilidad de sus compuestos. El fenómeno de la matriz atrapada podría estar asociado con la desnaturalización de proteínas y la gelatinización del almidón, donde las transformaciones termoquímicas aumentan los enlaces de hidrógeno, las interacciones hidrófilas y las fuerzas iónicas entre compuestos (Felker *et al.*, 2018).

3.2. Determinación del contenido de amilosa

En cuanto al contenido de amilosa (tabla 2.1), los valores más altos (54,97–67,93%) encontrados fueron para el control C y la harina de frijol de los pretratamientos D, RCD24_Entera y RCD24_Gruesa, sin diferencias significativas entre ellos ($p > 0.05$). El contenido de amilosa tuvo una correlación negativa con IAA ($r = -0,57$; $p = 0,0062$) y una correlación positiva con ISA ($r = 0,52$; $p = 0,0072$).

Por otro lado, se encontró que los contenidos de amilosa en las harinas de frijol estaban en el rango de los valores de los extractos de almidón de frijol carioca analizados por Los *et al.*, (2022), es decir, entre 40,06% y 42,60%. Así, el contenido de amilosa es un parámetro relevante para el diseño de alimentos porque afecta propiedades tecnológicas como el índice de solubilidad en agua (ISA) y el índice de absorción de agua (IAA), como se muestra con las harinas evaluadas en nuestro estudio. En consecuencia, las harinas de frijol C, D y RCD24_Entera, que tienen mayores contenidos de amilosa, tendrían una mayor resistencia al corte y serían más susceptibles a la retrogradación del almidón y a un menor hinchamiento del almidón (Kunyanee & Luangsakul, 2022).

Tabla 2.1. Fracciones de almidón, almidón de digestión rápida (ADR), almidón de digestión lenta (ADL), almidón resistente (AR) y contenidos de amilosa de la harina de frijol.

Pre-tratamiento	Fracción	ADR	ADL	AR	% de amilosa
C	Entera	6.14 ± 0.45 ^{AB}	2.95 ± 0.3 ^A	28.57 ± 0.75 ^{DE}	67.93 ± 13.71 ^C
D	Entera	8.30 ± 0.65 ^B	5.28 ± 0.9 ^C	24.09 ± 1.18 ^B	57.61 ± 7.39 ^{ABC}
RCD3	Entera	7.53 ± 0.08 ^C	6.80 ± 0.29 ^D	23.34 ± 0.3 ^B	45.10 ± 4.64 ^{AB}
	Fina	16.35 ± 0.78 ^D	2.78 ± 0.53 ^{BC}	18.54 ± 1.31 ^A	43.34 ± 2.58 ^A
RCD24	Gruesa	7.64 ± 1.94 ^B	4.96 ± 0.12 ^C	25.07 ± 1.82 ^{CD}	42.95 ± 4.98 ^A
	Entera	13.91 ± 1.58 ^{CD}	1.18 ± 0.17 ^A	22.58 ± 1.4 ^{BC}	65.51 ± 2.58 ^{BC}
	Fina	14.62 ± 1.75 ^{CD}	3.95 ± 0.43 ^{BC}	19.10 ± 2.18 ^B	41.37 ± 1.93 ^A
	Gruesa	3.68 ± 0.99 ^A	3.43 ± 0.63 ^B	30.55 ± 1.63 ^E	54.97 ± 9.9 ^{ABC}

Los valores representan las medias ± DE en tres réplicas.

^{A-E} Letras diferentes representan diferencias estadísticamente significativas $P < 0,05$ según Tukey.

3.3. Compuestos fenólicos

En la Tabla 2.2 se muestra la concentración y tipo de compuestos fenólicos identificados en la harina de frijol. Aquí, las fracciones fina y gruesa de RCD3 tuvieron la mayor concentración de flavonoides, con diferencias significativas en comparación con los otros pretratamientos en las concentraciones de catequina y epicatequina ($p < 0,05$). El pretratamiento D tuvo la mayor concentración de quercetina-3-glucósido, sin diferencias significativas con el control C pero sí con los demás pretratamientos ($p < 0,05$). En cuanto a las concentraciones de ácido ferúlico, estas disminuyeron estadísticamente ($p < 0,05$) para RCD24 en comparación con los demás tratamientos. Además, solo se encontró pelargonidina-3-glucósido en el control R y en el pretratamiento D en $14,95 \text{ mg kg}^{-1}$ y 25 mg kg^{-1} , respectivamente. No hubo diferencias significativas ($p > 0,05$) entre la concentración de compuestos fenólicos en las fracciones finas y gruesas en RCD3 y RCD24.

Tabla 2.2. Composición de flavonoides y ácidos fenólicos en las harinas de frijol.

Pre-Tratamiento	Catequina (mg kg ⁻¹)	epicatequina (mg kg ⁻¹)	Ácido ferúlico (mg kg ⁻¹)	Quercetina (mg kg ⁻¹)	Quercetina 3-glucósido (mg kg ⁻¹)	pelargonidina 3-glucósido (mg kg ⁻¹)
C	23.7 ± 8.6 ^{AB}	1.55 ± 0.5 ^A	11.45 ± 0.5 ^B	2.75 ± 0.4 ^{BC}	22.15 ± 3.5 ^B	14.95 ± 3.7 ^A
D	33.9 ± 3.5 ^B	2.15 ± 0.1 ^A	9.5 ± 1.8 ^B	1.65 ± 0.5 ^A	25.1 ± 3.4 ^B	25 ± 1.8 ^B
RCD3_F	46.85 ± 3.7 ^C	11 ± 1.6 ^B	10.6 ± 0.3 ^B	3.8 ± 0.3 ^D	8.3 ± 0.1 ^A	< 1.0
RCD3_G	49.1 ± 4.4 ^C	9.35 ± 0.1 ^B	11.2 ± 0.8 ^B	3.6 ± 0.1 ^{CD}	9.65 ± 0.8 ^A	< 1.0
RCD24_F	12.45 ± 0.1 ^A	1.05 ± 1.5 ^A	4.75 ± 0.2 ^A	2.15 ± 0.6 ^{AB}	6.45 ± 1.3 ^A	< 1.0
RCD24_G	14.7 ± 4.8 ^A	1.55 ± 0.8 ^A	4.65 ± 0.8 ^A	2.65 ± 0.4 ^{ABC}	6.45 ± 0.2 ^A	< 1.0

Los valores son medias ± DE en dos replicas.

^{A-D} Letras diferentes muestran diferencias estadísticamente significativas $P < 0,05$ según Tukey

En cuanto al potencial bioactivo de la harina de frijol, las muestras de todos los pretratamientos muestran contenidos de catequina, epicatequina y quercetina, que han sido reportados como los principales compuestos fenólicos en los granos de leguminosas (Ramírez-Jiménez *et al.*, 2014). El pretratamiento RCD3 presentó las mayores concentraciones de flavonoides, posiblemente derivados de la ruptura de las paredes y compartimentos celulares, mejorando su biodisponibilidad, lo que puede ocurrir en la fase de secado a $120 \text{ }^\circ\text{C}$ durante tres horas (Arfaoui, 2021; Juárez *et al.*, 2016).

Durante el remojo, los compuestos fenólicos pueden reducirse debido a su migración al agua (Aguilera *et al.*, 2011). Sin embargo, el tratamiento RCD3 exhibió la mayor concentración de compuestos fenólicos, lo que puede atribuirse al efecto de cocción y al corto tiempo de secado.

El procesamiento a altas temperaturas puede liberar compuestos fenólicos acumulados en las vacuolas de los granos, y las altas temperaturas también pueden desactivar las enzimas oxidativas e hidrolíticas que de otro modo podrían degradar los compuestos fenólicos (Dewanto *et al.*, 2002; Hassan & Youssef, 2012). Para el tratamiento RCD24, la reducción en la concentración de compuestos fenólicos en ambas fracciones puede estar relacionada con su degradación durante el secado prolongado. Estos hallazgos son consistentes con los informes de Ramírez-Jiménez *et al.*, (2014) en frijoles negros, donde las concentraciones de flavonoides (como quercetina y rutina) aumentaron después de la cocción (hervida a 94°C, aproximadamente 2,5 h) y el secado (secado al horno durante 12 h a 60°C). Sin embargo, los informes sobre la influencia de los tratamientos térmicos sobre los compuestos fenólicos son contradictorios (Yang *et al.*, 2018).

El ácido ferúlico se identificó en todos los pretratamientos en una concentración mayor de 4.16 $\mu\text{g g}^{-1}$, según lo encontrado por Ramírez-Jiménez *et al.*, (2014) para frijol negro. La concentración de este ácido fenólico puede estar relacionada con una disminución del eIG para las harinas de frijol debido a un efecto inhibitor de tipo mixto contra la α -amilasa y un mecanismo de inhibición de tipo no competitivo contra la α -glucosidasa con fuerzas de interacción que pueden ser enlaces de hidrógeno. Se ha informado que este fenómeno está relacionado con el potencial de la harina de frijoles para regular el nivel glicémico posprandial (Liu *et al.*, 2020; Zheng *et al.*, 2020), de esta manera las legumbres en polvo podrían aportar ventajas nutricionales y funcionales a los productos alimenticios convencionales (Cathrina *et al.*, 2020).

Se ha demostrado que los compuestos fenólicos presentes en los frijoles exhiben actividad inhibitora contra la α -amilasa, lo que contribuye al retraso en la digestión del almidón y afecta el índice glicémico (Mahoma *et al.*, 2022). Sin embargo, es importante considerar el impacto de la digestión sobre los compuestos fenólicos en términos de bioaccesibilidad y biodisponibilidad (Chandrasekara & Shahidi, 2011; Hachibamba *et al.*, 2013).

3.4. Determinación de fracciones de almidón.

La Tabla 2.1 muestra los porcentajes de las fracciones almidón de digestión rápida (ADR), almidón de digestión lenta (ADL) y almidón resistente (AR) y el contenido de amilosa. Considerando la fracción ADR, los valores más altos (13,91–16,35%) fueron para las partículas finas (125 μm) de RCD3, RCD24 y RCD24 entera (161 μm) sin diferencias significativas entre ellas ($p > 0,05$).

Asimismo, la AR en las harinas fraccionadas RCD24 y RCD3 aumentó en función del diámetro de partícula con diferencias estadísticamente significativas entre las fracciones ($p > 0.05$). Los valores de AR más altos (30,55–28,57%) fueron para RCD24 grueso y harina cruda entera. En cuanto a las características funcionales, el porcentaje de AR en la harina de frijol concordó con los datos encontrados por Chung *et al.*, (2008) y Hooper *et al.*, (2021), donde las fracciones de AR oscilaron entre 32% y 36% para las harinas de frijol.

3.5. Digestibilidad *in vitro* del almidón e índice glicémico estimado

La Figura 2.2 muestra las curvas de digestibilidad del almidón *in vitro* de harinas de frijol con diferentes pretratamientos. La liberación de glucosa cuantificada en IH en el tiempo de digestión estudiado mostró diferencias estadísticamente significativas entre las fracciones fina y gruesa ($p < 0,05$). Las fracciones finas de RCD3 y RCD24 presentaron la mayor hidrólisis del almidón (16,49–20,05%). Este comportamiento podría explicarse por la hidrólisis del almidón digerible durante los primeros 20 min (entre 80,68 y 95,41%), seguido de un comportamiento estable. Las fracciones gruesas de RCD24 mostraron tasas de digestión de almidón más bajas después de 180 minutos (10,21-13,11%) sin diferencias significativas con el control C pero con diferencias estadísticamente significativas con los demás pretratamientos ($p < 0,05$). A los 180 minutos, todos los pretratamientos se digirieron con una menor hidrólisis del almidón (10,21–20,05%) que el estándar de almidón de maíz (53%), con diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$).

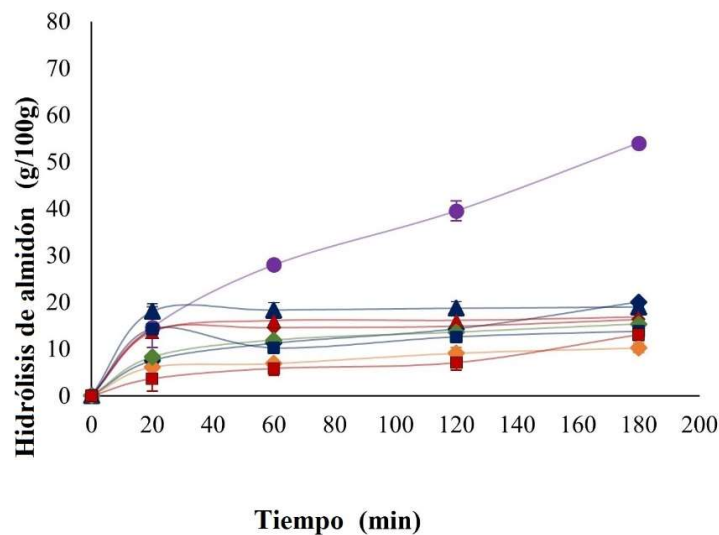


Figura 2.2 Curvas de digestión del almidón *in vitro* de las harinas de frijol por diferentes pretratamientos: cruda (C) (-◆-), Deshidratado(D) (-◆-), Remojo + Cocción + Deshidratación 3 h (RCD3): RCD3_entera (-◆-), RCD3_fina (-▲-), RCD3_gruesa (-■-); y Remojo + Cocción + Deshidratación 24 h (RCD24): RCD24_entera (-◆-), RCD24_fina (-▲-), RCD24_gruesa (-■-) y almidón estándar (-●-).

El eIG promedio de las harinas de frijol osciló entre 22,82 y 44,02 (Figura 2.3). El pretratamiento RCD24_Gruesa presentó el eIG más bajo correspondiente a 22,82 sin diferencias estadísticas significativas ($p > 0,05$) respecto al control C con un eIG de 24,16, y a su vez, con diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) respecto a los demás pretratamientos. Para la harina de frijol, el contenido de AR demostró una correlación positiva con el ISA ($r = 0,58$, $p = 0,0028$) y una correlación positiva con el contenido de amilosa ($r = 0,53$, $p = 0,0017$). En cuanto a eIG, se encontraron correlaciones negativas de este parámetro con AR ($r = -0,80$, $p < 0,0001$) mientras que se mostró una correlación positiva con ADR ($r = 0,89$, $p < 0,0001$). Sin embargo, el pretratamiento y el diámetro de las partículas influyeron en la velocidad de digestión y, en consecuencia, en el eIG en las harinas de frijol. Este comportamiento podría atribuirse a que el tratamiento térmico durante este pretratamiento puede producir un cambio en la estructura del frijol debido a la desnaturalización y agregación de las membranas celulares. Por otro lado, el tratamiento térmico influye en la estructura y textura de las células, provocando la pérdida de firmeza y ayudando en el acceso de la amilasa (Naiker *et al.*, 2020; Lee *et al.*, 2018). Además, el tratamiento térmico podría aumentar el grado de gelatinización e hinchamiento de los gránulos lo que, sumado a los cambios en la estructura cristalina, aumenta la accesibilidad a las moléculas de almidón, provocando un aumento en la tasa de digestibilidad con respecto a esa harina cruda.

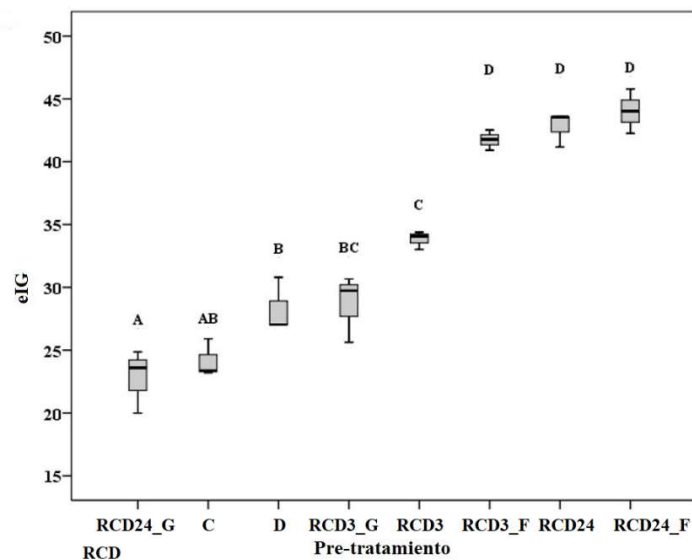


Figura 2.3. Índice glucémico estimado (eIG) para harinas de frijol, por pretratamientos y tamaño de partícula.

Pretratamientos: crudo (C), deshidratado (D), remojo + cocción + deshidratación por 3 h (RCD3) y remojo + cocción + deshidratación por 24 h (RCD24) y tamaño de partícula: entera, fina (F), gruesa (G). Letras diferentes muestran diferencias estadísticamente significativas entre pretratamientos y tamaño de partícula. $P < 0,05$ por Tukey.

La matriz proteica podría encapsular el gránulo de almidón, previniendo la hinchazón y la gelatinización del almidón y limitando la accesibilidad al ataque de las enzimas digestivas amilolíticas (Yang *et al.*, 2019; Yu *et al.*, 2018; Ovando-Martínez *et al.*, 2011).

Los resultados para las harinas gruesas con tamaños de partícula mayores a 192,7 μm mostraron menores tasas de digestibilidad en comparación con las fracciones finas, lo que podría atribuirse a la disminución en la relación entre el área superficial y el volumen, reduciendo la superficie sobre la cual se realiza la hidrólisis de los gránulos de almidón. las enzimas amilolíticas tienen lugar (Chen *et al.*, 2016). Las fracciones más finas tendrían gránulos de almidón porosos más pequeños con menor cristalinidad y una estructura de capa delgada, lo que provocaría un modo diferente de actividad de α -amilasa y amiloglucosidasa, según el tamaño de los gránulos (Dong *et al.*, 2021).

3.6. Propiedades reológicas

3.6.1. Medición de flujo

La Figura 2.4 muestra la curva de flujo para dos masas (R y RCD24_gruesa). El comportamiento fue similar para las dos muestras, con la pendiente disminuyendo monótonamente. El aumento de la velocidad de corte ($\dot{\gamma}$) en las dos muestras condujo a una disminución de la viscosidad (η) en el rango de 10s^{-1} a 10, lo que revela que las muestras tenían un comportamiento de adelgazamiento, característico de muchos alimentos no newtonianos. El modelo de flujo utilizado en este estudio fue la ley de potencia, que se utiliza para describir el comportamiento pseudoplástico y mostró un ajuste de flujo ($R > 99\%$) para las dos muestras. Las masas R y RCD24_gruesa mostraron valores de $n < 1$ (-0,65, -1,109), lo que confirma el comportamiento de adelgazamiento por cizallamiento de las harinas de frijol.

En cuanto al comportamiento de flujo de RCD24_gruesa y C, las muestras experimentaron deformación a medida que aumentaba la velocidad de corte, lo cual fue consistente con los resultados encontrados por Lin y Fernández-Fraguas (2020), quienes reportaron un resultado de corte similar en dispersiones de frijol común, mostrando características de un material pseudoplástico. Esta propiedad podría atribuirse al hecho de que la estructura molecular del material comenzó a romperse, lo que redujo la resistencia interna en forma de fricción y la resistencia al flujo.

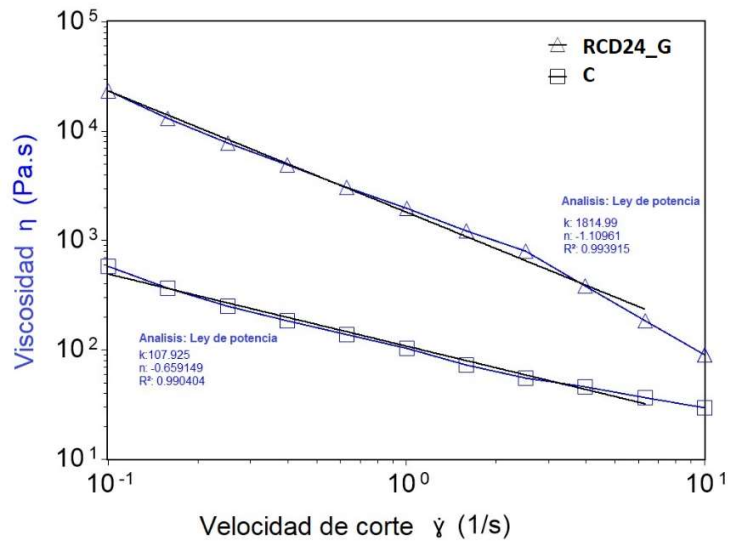


Figura 2.4. Comportamiento de flujo de masas de frijol RCD24_G (Gruesa) (Δ) y C (\square), influencia de la velocidad de corte en la curva de viscosidad a 25°C. Los datos se ajustaron al modelo de Ley de Potencia, donde (k): coeficiente de consistencia, (n): índice de comportamiento del flujo.

La muestra RCD24_gruesa mostró los valores de viscosidad más altos en comparación con la masa cruda C, lo que podría deberse a que el almidón fue precocido y tiene mayor hinchamiento, mayor capacidad de retención de agua y resistencia a que la dispersión fluya; también puede presentar una estructura altamente reticulada que debe romperse, lo que indica que el pretratamiento tuvo un efecto significativo sobre la estructura del almidón y la interacción de sus componentes; en consecuencia, contribuye a la máxima viscosidad de la masa (Lin *et al.*, 2020; Beltrão *et al.*, 2020).

3.6.2. Barrido de deformación

La Figura 2.5 muestra las mediciones en el barrido de deformación. La masa C presentó el límite viscoelástico lineal (RVL) más alto (deformación de oscilación $\sim 0,6\%$) en comparación con RCD24_gruesa (deformación de oscilación $\sim 0,3\%$) (Figura 2.5A).

La caída del módulo G' de la muestra C fue causado por la aplicación de esta oscilación de deformación, lo que indica que la ruptura estructural de la masa ocurre más allá de este nivel de deformación.

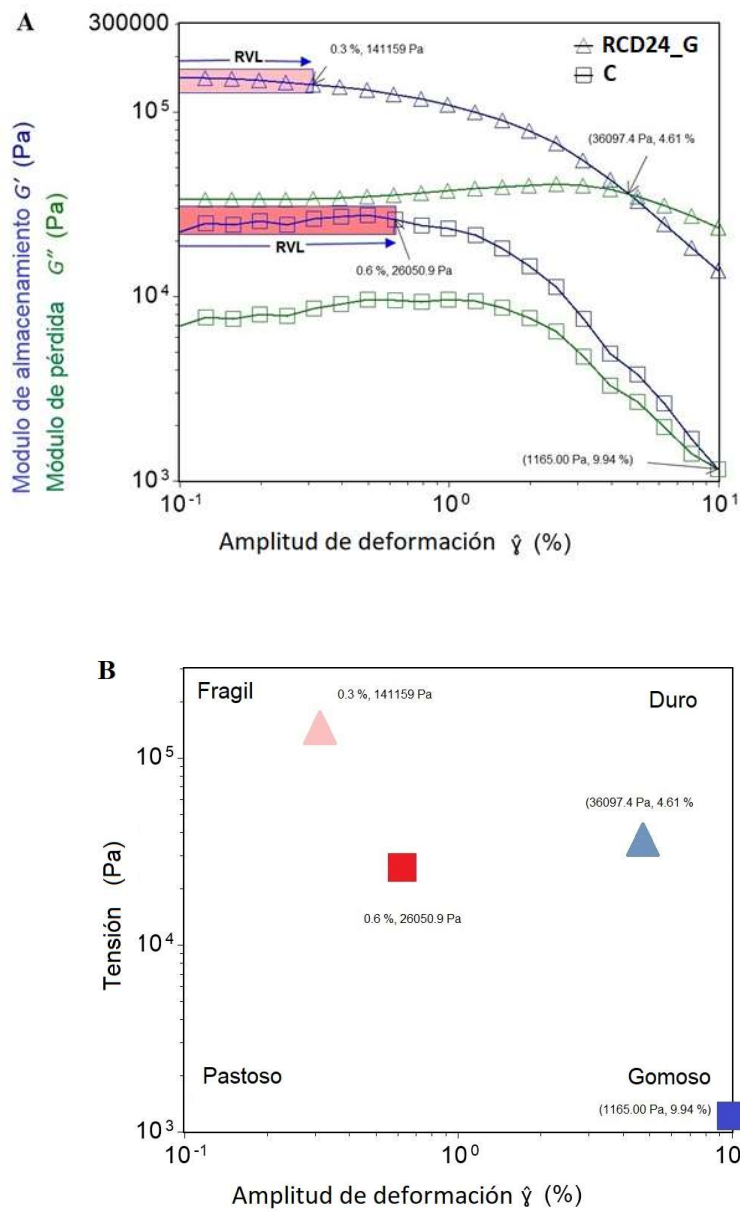


Figura 2.5. Barrido de deformación dinámica para R(\square), RCD24_G (Gruesa) (Δ). A): Módulo de almacenamiento [G' (azul)] y módulo de pérdida [G'' (verde)] versus amplitud de deformación para definir el final del régimen viscoelástico lineal y el punto de cruce ($G' = G''$). B): Mapa de textura y clasificación de materiales en cuatro cuadrantes utilizando las tasas de tensión con la deformación por oscilación en el límite de la región viscoelástica lineal [RVL: R(\blacksquare), RCD24_G (\blacktriangle)] y el punto de cruce [($G' = G''$): C (\blacksquare), RCD24_G (\blacktriangle)].

Los datos mostraron que el módulo de almacenamiento (G') es mayor que el módulo de pérdida (G'') a una tensión oscilatoria más baja, lo que indica que las muestras están en un régimen sólido

o elástico y pueden almacenar más energía, que pierden en forma de calor cuando se deforman por una tensión oscilatoria creciente. RCD24_gruesa muestra la convergencia de G' y G'' a un valor de deformación más bajo que la muestra C, y un alto valor de tensión oscilatoria demuestra módulos intercambiados, $G'' > G'$, lo que demuestra que el material disipa más energía en forma de calor de la que almacena elásticamente. Este comportamiento indica que las funciones dinámicas G' y G'' de las muestras son independientes de la deformación en la región RVL.

La Figura 2.5B muestra el mapa de textura y la clasificación de materiales en cuatro cuadrantes usando las tasas de tensión con la deformación por oscilación en el límite de la región RVL y el punto de cruce (punto de flujo) ($G' = G''$). La muestra C se ubica en el cuadrante 2 (abajo a la derecha) está más cerca de la región "gomosa", mientras que RCD24_gruesa se ubica en el cuadrante 3 (arriba a la derecha) está más cerca de la región "dura" con cierta tendencia a la región "frágil".

En cuanto a las mediciones de barrido de deformación, las dos masas exhibieron un módulo de pérdidas bajo (G''), lo que indica que se comportan como un material elástico-sólido (Zhang *et al.*, 2023) y son menos propensos a la deformación, lo que evidencia un enlace interatómico robusto, excepto cuando hay un estrés oscilatorio alto, donde es más probable que fluyan bajo presión, como se evidencia en las muestras de RCD24_gruesa. Esta característica es el comportamiento típico de los geles blandos que muestran un comportamiento elástico dominante a altas frecuencias y una respuesta viscosa dominante a bajas frecuencias, según lo informado por Sadat y Joye (2022). Asimismo, mayores magnitudes en el G' y los módulos G'' en RCD24_gruesa, respecto a C, podrían estar relacionados con la desnaturalización de proteínas y la gelatinización parcial de los gránulos de almidón, produciendo una pérdida de cristalinidad y el hinchamiento irreversible de los gránulos de almidón (Matos y Rossell, 2015; Cappelli *et al.*, 2020), el cual podría generarse por el efecto del pretratamiento para RCD24_gruesa que se realizó con calor seco durante 24 h.

La masa RCD24_gruesa exhibió un límite RVL más alto y mostró una mayor G' . Los resultados indican que la masa es más resistente y estable, lo que podría atribuirse a que forma una estructura de red con interacciones microestructurales más fuertes en comparación con C, que podría formar una red más débil y frágil en el rango de deformación estudiado (Zhang, 2017) según los resultados de los mapas de textura, lo cual es consistente con Azeem *et al.*, (2020), quienes afirman que el tamaño de partícula puede afectar las propiedades texturales.

3.6.3. Prueba de barrido de frecuencia

La Figura 2.6 muestra las mediciones de barrido de frecuencia, la respuesta de G' , G'' (Figura 6A), y $\tan(\delta) = G''/G'$ (Figura 6B) versus la frecuencia angular de las masas de C y RCD24_gruesa a 25° C. Las dos muestras mostraron magnitudes $G' > G''$ sin cruce observable y una $\tan(\delta) < 1$.

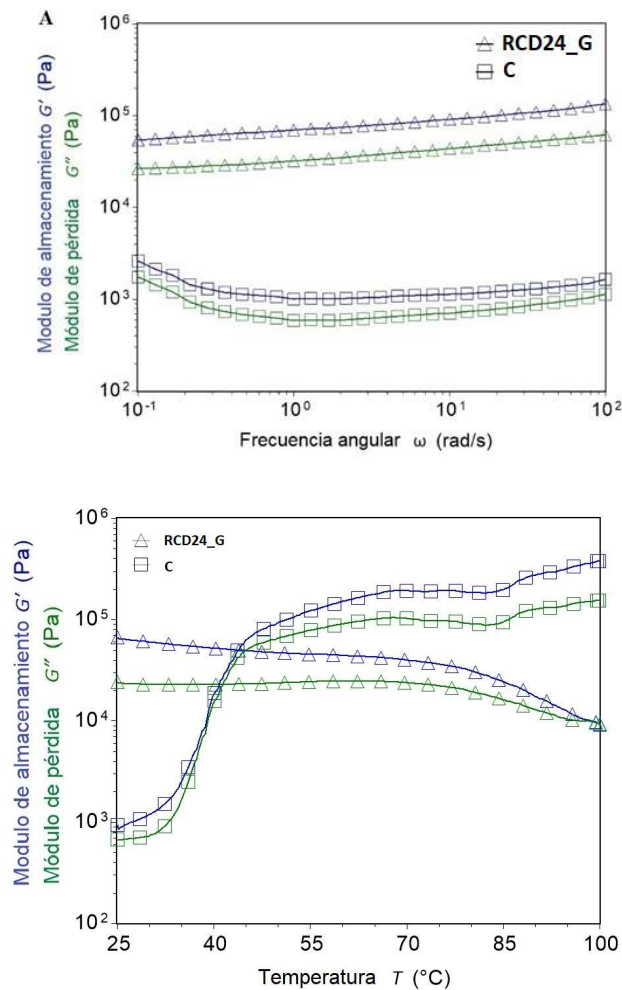


Figura 2.6. Barrido de frecuencia de muestras de frijol RCD24_G (Gruesa) (Δ) y cruda(\square). A) respuesta del módulo de almacenamiento [G' (azul)] - módulo de pérdida [G'' (verde)] versus la frecuencia angular; B) $\tan(\delta)=G''/G'$ versus la frecuencia angular de las muestras a 25 °C.

Para la muestra C, los valores de G' y G'' mostraron una ligera disminución en frecuencias bajas (0,01–1 rad/s) y luego un ligero aumento en frecuencias más altas (1–100 rad/s), lo que demuestra que son relativamente independientes de la frecuencia. Esto sugiere una reducción del reordenamiento molecular y la formación de geles fuertes. Para la muestra RCD24_G, los

módulos G' y G'' presentaron una dependencia con frecuencia creciente. Con respecto a C, la masa RCD24_gruesa presentó valores mayores de G' y G'' , como se muestra en la Figura 2.6A, lo que indica que el pretratamiento incrementó el comportamiento sólido del sistema. Asimismo, la masa RCD24_gruesa, con un tamaño de partícula mayor (242 μm), en comparación con la C, con un tamaño de partícula menor (179,1 μm), mostró valores de $\tan(\delta)$ más bajos (Figura 2.6B) y una textura más rígida.

En el barrido de frecuencia, las dos muestras estudiadas mostraron que el módulo de elasticidad (G') era mayor que el módulo viscoso (G''), no se observaba ningún cruce entre G' y G'' , y la $\tan(\delta)$ era < 1 , lo que sugiere que predomina el componente elástico, estructura típica de geles blandos con polímeros reticulados, ya que la red impide que el material fluya, mostrando un comportamiento sólido-elástico en las frecuencias estudiadas (Sadat y Joye, 2022). Asimismo, los valores de G' y G'' aumentaron constantemente con la frecuencia (Figura 6), lo que podría indicar un aumento en las interacciones moleculares y un fortalecimiento de la microestructura, mostrando procesos de relajación donde las dispersiones pueden caracterizarse como geles débiles (Yang *et al.*, 2019). Este comportamiento fue consistente con la investigación de Lin y Fernández-Fraguas (2020), quienes reportaron un comportamiento similar en harinas de frijol tratadas térmicamente. Las tasas superiores de G' y G'' de RCD24_gruesa reflejan la formación de una estructura más rígida en comparación con las muestras C no tratadas, lo que indica interacciones moleculares y modificaciones estructurales causadas por el tratamiento térmico, y que podrían formar una red tridimensional de alta densidad de proteínas reticuladas y almidón cuando se produce la gelatinización. Probablemente, la expresión macroscópica fue consecuencia de cambios a nivel micro del almidón y la proteína (Yang *et al.*, 2021).

3.6.4. Rampa de temperatura

La Figura 2.7 muestra la viscoelasticidad dinámica de las masas de frijol durante el ciclo de calentamiento (Figura 2.7A) y enfriamiento (Figura 2.7B) (25°C – 95°C – 25°C) a una tensión constante y una frecuencia de 2% y 1 Hz (6.28rad/s), respectivamente. Para C, las estimaciones de G' y G'' aumentaron gradualmente con el aumento de la temperatura y mostraron un aumento significativo en G' alrededor de 35°C . La muestra C presentó un pico en valores de $\tan(\delta)$ entre 40°C y 45°C (Figura 2.7C). Por otro lado, para RCD24_gruesa, los módulos (G' y G'')

disminuyeron lentamente con el aumento de la temperatura, y $\tan(\delta)$ aumentó gradualmente con el aumento de la temperatura (Figura 2.7D).

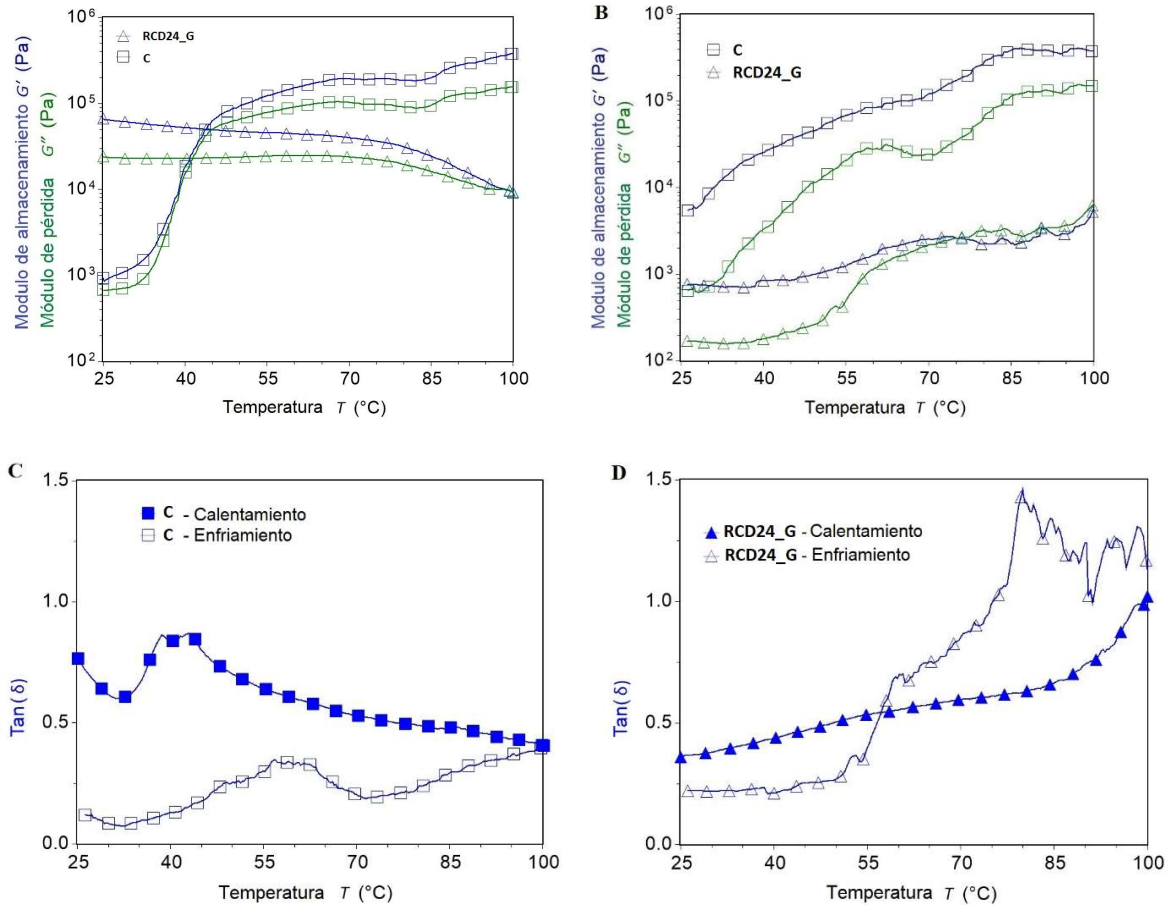


Figura 2.7. Viscoelasticidad dinámica de las masas RCD24_G (Gruesa) (Δ) y C (\square) durante el ciclo de calentamiento (A) y enfriamiento (B) (25 °C-95 °C-25 °C) a una deformación constante del 2% y una frecuencia de 1 Hz.

Valores de $\tan(\delta)$: (C) para Raw(\square) y (D) RCD24_G (Δ).

El control (C) exhibió la mayor cantidad del módulo G' alrededor de los 35°C, lo cual concuerda con lo observado en harinas de frijol por Romero y Zhang (2019), quienes plantearon que el aumento del módulo G' se debe a la hinchazón de los gránulos de almidón (Brishti *et al.*, 2020). Por otro lado, para RCD24_gruesa los módulos G' y G'' tendieron a disminuir, presentando menor rigidez con el aumento de temperatura, lo que indica que el material pasó a un estado viscoso. Sin embargo, el tratamiento presentó un aumento en el valor de $\tan(\delta)$ a temperaturas más altas, lo que puede indicar un cambio hacia un comportamiento más viscoso y una disminución en la capacidad del material para resistir la deformación cuando el material se somete a calentamiento.

El comportamiento reológico se puede evaluar examinando el grado de almidón gelatinizado y su reticulación con proteínas. El tratamiento RCD24 se caracterizó por un gel débil asociado con una menor lixiviación de amilosa. Además, la rotura de los gránulos cristalinos después del tratamiento térmico podría conducir a la formación de gránulos hinchables de amilopectina con mayor flexibilidad, afectando así la digestión del almidón a través de modificaciones microestructurales. Además, la desnaturalización de las proteínas podría promover la agregación de proteínas y la separación de fases, lo que afectaría el debilitamiento del gel. En la prueba de rampa de temperatura, el tratamiento RCD24_gruesa exhibió la temperatura más baja para G', lo que indica una estructura cristalina (integridad estructural) más baja en comparación con R, y sugiere una desintegración más fácil, lo que se correlaciona con una mayor digestibilidad y un mayor índice glicémico estimado (eIG).

Por otro lado, las propiedades tecnológicas, funcionales y el comportamiento reológico de la harina de frijol indican su potencial para productos con alta absorción de agua, lo que puede dar como resultado alimentos suaves y viscosos, aptos para su uso en masas, natillas, productos cárnicos emulsionados, sopas o mezclas de bebidas. Además, su alto contenido en amilosa lo hace adecuado para productos fritos con baja capacidad de absorción de aceite.

4. Conclusiones

El tipo de pretratamiento utilizado para convertir el frijol en harina podría modificar sus propiedades tecnológicas. El secado a 120 °C por 3 h y el secado a 75 °C por 24 h influyeron en el aumento del IAA y la disminución del ISA. Además, la tasa de hidrólisis del almidón aumentó, lo que influyó en el aumento del elG. Sin embargo, las harinas obtenidas de los procesos de remojo, cocción y deshidratación previos al tratamiento necesarios para reducir compuestos antinutricionales y mejorar aspectos sensoriales permitieron clasificar este tipo de harina dentro de alimentos de bajo índice glicémico y similares que también son buenas fuentes de proteínas y almidón resistente. Además, las harinas de frijol obtenidas con los tres pretratamientos presentaron compuestos fenólicos con potenciales bioactivos y propiedades promotoras de la salud, como catequina, epicatequina, ácido ferúlico y quercetina. Así, promover su incorporación en el diseño alimentario podría aumentar su ingesta y mejorar significativamente la regulación del índice glicémico posprandial. Asimismo, los tamaños de partícula influyeron en la caracterización tecnológica de las harinas y el índice glicémico posprandial. En consecuencia, el fraccionamiento de la harina en partículas de mayor tamaño es una alternativa industrialmente viable para la obtención de harinas de bajo índice glicémico.

El estudio del comportamiento reológico reveló propiedades de las harinas RCD24_gruesa y C, encontrando que las masas son más fluidas a mayor velocidad de deformación, lo cual es característico de un pseudoplástico. El pretratamiento del frijol influyó en la estructura del almidón y la interacción de sus componentes, contribuyendo al aumento de su capacidad de absorción de agua y la viscosidad de la masa, resultando un material más resistente y estable en comparación con la materia prima C. Las masas de la harina RCD24_gruesa se comportó como gel viscoso débil a bajas frecuencias y gel elástico dominante a altas frecuencias.

Disponibilidad de datos

Los datos generados o analizados durante este estudio están disponibles previa solicitud razonable del autor correspondiente.

Declaración de intereses contrapuestos

Los autores declaran que no tienen ningún potencial conflicto de intereses con respecto a la investigación, autoría o publicación de este artículo.

Agradecimientos

Este trabajo contó con el apoyo de la Universidad Nacional Abierta ya Distancia-UNAD. A la Universidad de La Sabana y a la Facultad de Ingeniería de Alimentos de la Fundación Universitaria Agraria de Colombia por su apoyo experimental. Fenalce especialmente a Henry Vargas por sus orientaciones, al Dr. Manuel Francisco Polanco por las muestras de frijol (UNAD-DOS ZANDÚ). Este trabajo fue apoyado por la Universidad Nacional Abierta y a Distancia de Colombia-UNAD bajo el [Beca ECAPMAPIE092022].

Declaración de contribución de autoría CRediT

Adriana Mejía Terán: ejecución experimental, análisis de datos, redactó el manuscrito y conceptualizó el estudio. **Carla Blanco-Lizarazo:** analizó datos, análisis estadístico, redactó el manuscrito, revisó y conceptualizó el estudio. **Eduardo Leiva-Mateus:** ejecución experimental y revisión del manuscrito. **Indira Sotelo-Díaz:** revisó el manuscrito y conceptualizó el estudio. **Darío Fernando Mejía Terán:** ejecución experimental. **Enrique Geffroy:** ejecución experimental.

5. Referencias

- Aguilera, Y., Estrella, I., Benitez, V., Esteban, R. M., & Martín-Cabrejas, M. A. (2011). Bioactive phenolic compounds and functional properties of dehydrated bean flours. *Food Research International*, 44(3), 774–780. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.01.004>
- Amoah, I., Ascione, A., Muthanna, F. M., Feraco, A., Camajani, E., Gorini, S., Armani, A., Caprio, Massimiliano & Lombardo, M. (2023). Sustainable Strategies for Increasing Legume Consumption: Culinary and Educational Approaches. *Foods*, 12(11), 2265. <https://doi.org/10.3390/foods12112265>
- Anderson, R. A., Conway, H. F., & Peplinski, A. J. (1970). Gelatinization of Corn Grits by Roll Cooking, Extrusion Cooking. *J. Cereal Sci.*, 14, 4–12. <https://doi.org/10.1002/star.19700220408>
- Arfaoui, L. (2021). Dietary plant polyphenols: Effects of food processing on their content and bioavailability. *Molecules*, 26(10), 2959. <https://doi.org/10.3390/molecules26102959>
- Azeem, M., Mu, T. H., & Zhang, M. (2020). Influence of particle size distribution of orange-fleshed sweet potato flour on dough rheology and simulated gastrointestinal digestion of sweet potato-wheat bread. *LWT*, 131, 109690. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109690>
- Beltrão Martins, R., Nunes, M. C., M. Ferreira, L. M., A. Peres, J., RNA Barros, A. I., & Raymundo, A. (2020). Impact of acorn flour on gluten-free dough rheology properties. *Foods*, 9(5), 560. <https://doi.org/10.3390%2Ffoods9050560>
- Bessada, S. M. F., Barreira, J. C. M., & Oliveira, M. B. P. P. (2019). Pulses and food security: Dietary protein, digestibility, bioactive and functional properties. *Trends in Food Science and Technology*, 93, 53–68. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.08.022>
- Bielefeld, D., Grafenauer, S., & Rangan, A. (2020). The effects of legume consumption on markers of glycaemic control in individuals with and without diabetes mellitus: A systematic literature review of randomised controlled trials. *Nutrients*, 12(7), 2123. <https://doi.org/10.3390/nu12072123>
- Biliaderis. (1991). The Structure and Interactions of Starch with Food Constituents. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, 69, 60–78. <https://doi.org/10.1139/y91-011>
- Brishti, F. H., Chay, S. Y., Muhammad, K., Ismail-Fitry, M. R., Zarei, M., Karthikeyan, S., & Saari, N. (2020). Effects of drying techniques on the physicochemical, functional, thermal, structural and rheological properties of mung bean (*Vigna radiata*) protein isolate powder. *Food Research International*, 138, 109783. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109783>

- Cappa, C., Kelly, J., & Ng, P. (2020). Baking performance of 25 edible dry bean powders: Correlation between cookie quality and rapid test indices. *Food Chemistry*, 302, 125338. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125338>
- Cappelli, A., Oliva, N., & Cini, E. (2020). A systematic review of gluten-free dough and bread: Dough rheology, bread characteristics, and improvement strategies. *Applied Sciences*, 10(18), 6559. <https://doi.org/10.3390/app10186559>
- Cathrina, E., Peter, R., Pinto, A., van der Schoot, A., Stocchi, C., Perez-Moral, N., Butterworth, P., Bajka, B., Berry, S., Hill, S., & Ellis, P. (2020). Chemical, physical and glycaemic characterisation of PulseON®: A novel legume cell-powder ingredient for use in the design of functional foods. *Journal of Functional Foods*, 68, 103918. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.103918>
- Chandrasekara, A., & Shahidi, F. (2012). Bioaccessibility and antioxidant potential of millet grain phenolics as affected by simulated in vitro digestion and microbial fermentation. *Journal of functional foods*, 4(1), 226-237. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2011.11.001>
- Chávez-Murillo, C. E., Veyna-Torres, J. I., Cavazos-Tamez, L. M., de la Rosa-Millán, J., & Serna-Saldívar, S. O. (2018). Physicochemical characteristics, ATR-FTIR molecular interactions and in vitro starch and protein digestion of thermally-treated whole pulse flours. *Food Research International*, 105, 371-383. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.11.029>
- Chen, J., Liang, Y., Li, X., Chen, L., & Xie, F. (2016). Supramolecular structure of jackfruit seed starch and its relationship with digestibility and physicochemical properties. *Carbohydrate Polymers*, 150, 269–277. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.05.030>
- Choe, U., Osorno, J. M., Ohm, J. B., Chen, B., & Rao, J. (2022). Modification of physicochemical, functional properties, and digestibility of macronutrients in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) flours by different thermally treated whole seeds. *Food Chemistry*, 382, 132570. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132570>
- Chung, H., Liu, Q., Pauls, K. P., Fan, M. Z., & Yada, R. (2008). In vitro starch digestibility , expected glycemic index and some physicochemical properties of starch and flour from common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) varieties grown in Canada. *Food Research International*, 41(9), 869–875. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2008.03.013>
- Dewanto, V., Xianzhong, W., Adom, K. K., & Liu, R. H. (2002). Thermal processing enhances the nutritional value of tomatoes by increasing total antioxidant activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(10), 3010–3014. <https://doi.org/10.1021/jf0115589>

- Dong, S., Fang, G., Luo, Z., & Gao, Q. (2021). Effect of granule size on the structure and digestibility of jackfruit seed starch. *Food Hydrocolloids*, 120, 106964. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106964>
- Englyst, H. N., Kingman, S. M., & Cummings, J. H. (1992). Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. *European Journal of Clinical Nutrition*, 46 (SUPPL 2), S33-50.
- Ekielski, A., Żelaziński, T., Siwek, A., Sharma, V., & Kumar Mishra, P. (2020). Formulation and Characterization of Corn Grits-Propylene Glycol Extrudates. In *Materials Today: Proceedings* (Vol. 21). www.sciencedirect.comwww.materialstoday.com/proceedings2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.230>
- Felker, F. C., Kenar, J. A., Byars, J. A., Singh, M., & Liu, S. X. (2018). Comparison of properties of raw pulse flours with those of jet-cooked, drum-dried flours. *Lwt*, 96, 648-656. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.06.022>
- Feng, X., Yu, B., Regenstein, J. M., & Wang, L. (2023). Effect of particle size on composition, physicochemical, functional, and structural properties of insoluble dietary fiber concentrate from citrus peel. *Food Science and Technology International*, 29(3), 195-203. <https://doi.org/10.1177/10820132211063973>
- Ganesan, K., & Xu, B. (2017). Polyphenol-rich dry common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) and their health benefits. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(11). <https://doi.org/10.3390/ijms18112331>
- Ge, J., Chen, X., Zhang, X., Dai, Q., & Wei, H. (2023). Comparisons of rice taste and starch physicochemical properties in superior and inferior grains of rice with different taste value. *Food Research International*, 169, 112886 <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112886>
- Granfeldt, Y., Björck, I., Drews, A., & Tovar, J. (1994). An in vitro procedure based on chewing to predict metabolic response to starch in cereal and legume products. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 59(3), 777S. <https://doi.org/10.1093/ajcn/59.3.777S>
- Guo, P., Yu, J., Wang, S., Wang, S., & Copeland, L. (2018). Effects of particle size and water content during cooking on the physicochemical properties and in vitro starch digestibility of milled durum wheat grains. *Food Hydrocolloids*, 77, 445-453. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.10.021>
- Hachibamba, T., Dykes, L., Awika, J., Minnaar, A., & Duodu, K. G. (2013). Effect of simulated gastrointestinal digestion on phenolic composition and antioxidant capacity of cooked

- cowpea (*Vigna unguiculata*) varieties. *International journal of food science & technology*, 48(12), 2638-2649. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12260>
- Hassan, M. A. M., & Youssef, A. M. K. (2012). Effect of toasting and microwaving on gross chemical composition, total phenolics, antioxidant activity and phenolic acids fractionation of white beans flour (*Phaseolus vulgaris* L.). *World Applied Sciences Journal*, 18(6), 731–736. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2012.18.06.2739>
- Hooper, S. D., Bassett, A., Sadohara, R., & Cichy, K. A. (2021). Elucidation of the low resistant starch phenotype in *Phaseolus vulgaris* exhibited in the yellow bean Cebo Cela. *Journal of Food Science*, 86(9), 3975–3986. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15883>
- Huang, M., Theng, A. H. P., Yang, D., & Yang, H. (2021). Influence of κ-carrageenan on the rheological behaviour of a model cake flour system. *LWT*, 136, 110324. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110324>
- Igual, M., Chiş, M. S., Socaci, S. A., Vodnar, D. C., Ranga, F., Martínez-Monzó, J., & García-Segovia, P. (2021). Effect of *Medicago sativa* addition on physicochemical, nutritional and functional characteristics of corn extrudates. *Foods*, 10(5), 928. <https://doi.org/10.3390/foods10050928>
- Juániz, I., Ludwig, I. A., Huarte, E., Pereira-Caro, G., Moreno-Rojas, J. M., Cid, C., & De Peña, M. P. (2016). Influence of heat treatment on antioxidant capacity and (poly)phenolic compounds of selected vegetables. *Food Chemistry*, 197, 466–473. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.10.139>
- Kamalasundari, S., Babu, R., & Umamaheswari, T. (2019). Effect of domestic processing methods on anti-nutritional factors and its impact on the bio-availability proteins and starch in commonly consumed whole legumes. *Asian Journal of Dairy and Food Research*, 38(1), 67-72. <https://doi.org/10.18805/ajdfr.dr-1410>
- Kan, A., Mocan, A., & Atanasov, A. G. (2018). Let food be thy medicine and medicine be thy food: A bibliometric analysis of the most cited papers focusing on nutraceuticals and functional foods. *Food Chemistry*, 269, 455–465. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.06.139>
- Kenar, J. A., Felker, F. C., Singh, M., Byars, J. A., Berhow, M. A., Bowman, M. J., & Winkler-Moser, J. K. (2020). Comparison of composition and physical properties of soluble and insoluble navy bean flour components after jet-cooking, soaking, and cooking. *LWT*, 130, 109765. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109765>
- Kunyanee, K., & Luangsakul, N. (2022). The impact of heat moisture treatment on the physicochemical properties and in vitro glycemic index of rice flour with different amylose

- contents and associated effects on rice dumpling quality. *Lwt*, 154, 112694. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112694>
- Lee, H., Ha, M. J., Shahbaz, H. M., Kim, J. U., Jang, H., & Park, J. (2018). High hydrostatic pressure treatment for manufacturing of red bean powder: A comparison with the thermal treatment. *Journal of Food Engineering*, 238, 141-147. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.06.016>
- Lin, L., Yang, H., Chi, C., & Ma, X. (2020). Effect of protein types on structure and digestibility of starch-protein-lipids complexes. *Lwt*, 134, 110175. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.06.016>
- Lin, T., & Fernández-Fraguas, C. (2020). Effect of thermal and high-pressure processing on the thermo-rheological and functional properties of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) flours. *LWT*, 127, 109325. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109325>
- Liu, S., Zhao, L., Wang, L., & Liu, H. (2020). Microstructure-modified products from stone-milled wheat bran powder improve glycemic response and sustain colonic fermentation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 153, 1193–1201. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.249>
- Los, F. G. B., Chezini, A., Piroski, C. S., Lacerda, L. G., Nogueira, A., & Demiate, I. M. (2022). Evaluation of physicochemical properties of starch from brazilian carioca beans (*Phaseolus vulgaris*). *Starch-Stärke*, 74(1-2), 2000281. <https://doi.org/10.1002/star.202000281>
- Matos, M. E., & Rosell, C. M. (2015). Understanding gluten-free dough for reaching breads with physical quality and nutritional balance. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(4), 653-661. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6732>
- Mejía Terán, A., & Blanco-Lizarazo, C. M. (2021). Considerations for functional food design based on starch-protein interactions: a systematic review. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 72(8), 1009-1018. <https://doi.org/10.1080/09637486.2021.1905784>
- Muhammad, M., Zhu, Y., Wen, A., Liu, N., & Qin, L. (2022). Phenolic profile, alpha-amylase inhibitory activity, and in vitro glycemic index of adzuki beans. *Front Nutr*, 9, 1063602. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1063602>
- Naiker, T. S., Baijnath, H., Amonsou, E. O., & Mellem, J. J. (2020). The effect of soaking, steaming, and dehydration on the microstructure, physicochemical properties and in vitro starch digestibility of flour produced from *Lablab purpureus* (L.) Sweet (hyacinth bean).

- Journal of Food Processing and Preservation*, 44(5), e14430.
<https://doi.org/10.1111/jfpp.14430>
- Ovando-Martínez, M., Osorio-Díaz, P., Whitney, K., Bello-Pérez, L. A., & Simsek, S. (2011). Effect of the cooking on physicochemical and starch digestibility properties of two varieties of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) grown under different water regimes. *Food Chemistry*, 129(2), 358–365. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.04.084>
- Parada, J., & Santos, J. L. (2016). Interactions between Starch, Lipids, and Proteins in Foods: Microstructure Control for Glycemic Response Modulation. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(14), 2362–2369. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.840260>
- Ramírez-Jiménez, A. K., Reynoso-Camacho, R., Mendoza-Díaz, S., & Loarca-Piña, G. (2014). Functional and technological potential of dehydrated *Phaseolus vulgaris* L. flours. *Food Chemistry*, 161, 254–260. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.04.008>
- Romero, H. M., & Zhang, Y. (2019). Physicochemical properties and rheological behavior of flours and starches from four bean varieties for gluten-free pasta formulation. *Journal of Agriculture and Food Research*, 1, 100001. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2019.100001>
- Sadat, A., & Joye, I. J. (2022). Zein and gluten interactions: A rheological and confocal Raman microscopy study. *Journal of Cereal Science*, 108, 103563. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2022.103563>
- Schreuders, F. K., Sagis, L. M., Bodnár, I., Boom, R. M., & van der Goot, A. J. (2022). Non-linear rheology reveals the importance of elasticity in meat and meat analogues. *Scientific Reports*, 12(1), 1334. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04478-z>
- Siddiq, M., Kelkar, S., Harte, J. B., Dolan, K. D., & Nyomba, G. (2013). Functional properties of flour from low-temperature extruded navy and pinto beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *LWT-Food Science and Technology*, 50(1), 215–219. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.05.024>
- de Toro-Martín, D., Arsenault, B. J., Després, J. P., & Vohl, M. C. (2017). Precision nutrition: a review of personalized nutritional approaches for the prevention and management of metabolic syndrome. *Nutrients*, 9(8), 913. <https://doi.org/10.3390/nu9080913>
- Wani, I. A., Sogi, D. S., Wani, A. A., & Gill, B. S. (2013). Physico-chemical and functional properties of flours from Indian kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars. *LWT-Food Science and Technology*, 53(1), 278–284. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.02.006>

- Yang, T., Wang, P., Zhou, Q., Wang, X., Cai, J., Huang, M., & Jiang, D. (2021). Investigation on the molecular and physicochemical changes of protein and starch of wheat flour during heating. *Foods*, 10(6), 1419. <https://doi.org/10.3390%2Ffoods10061419>
- Yang, C., Zhong, F., Goff, H. D., & Li, Y. (2019). Study on starch-protein interactions and their effects on physicochemical and digestible properties of the blends. *Food chemistry*, 280, 51-58. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.12.028>
- Yang, Q. Q., Gan, R. Y., Ge, Y. Y., Zhang, D., & Corke, H. (2018). Polyphenols in Common Beans (*Phaseolus vulgaris* L.): Chemistry, Analysis, and Factors Affecting Composition. In *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* (Vol. 17, Issue 6, pp. 1518–1539). Blackwell Publishing Inc. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12391>
- Yu, W., Zou, W., Dhital, S., Wu, P., Gidley, M. J., Fox, G. P., & Gilbert, R. G. (2018). The adsorption of α -amylase on barley proteins affects the in vitro digestion of starch in barley flour. *Food Chemistry*, 241, 493-501. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.09.021>
- Zhang, D. (2023). Effect of Proofing on the Rheology and Moisture Distribution of Corn Starch-Hydroxypropylmethylcellulose Gluten-Free Dough. *Foods*, 12(4), 695. <https://doi.org/10.3390/foods12040695>
- Zhang, D., Mu, T., & Sun, H. (2017). Comparative study of the effect of starches from five different sources on the rheological properties of gluten-free model doughs. *Carbohydrate Polymers*, 176, 345-355. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.08.025>
- Zheng, Y., Liu, S., Xie, J., Chen, Y., Dong, R., Zhang, X., Liu, S., Xie, J., Hu, X., & Yu, Q. (2020). Antioxidant, α -amylase and α -glucosidase inhibitory activities of bound polyphenols extracted from mung bean skin dietary fiber. *Lwt*, 132, 109943. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109943>

Capítulo 3. Propiedades tecnofuncionales y fisicoquímicas de las harinas de maíz como potenciales ingredientes alimentarios.

Adriana Mejía-Terán, Carla María Blanco-Lizarazo, Eduardo Leiva Mateus, Indira Sotelo-Díaz

Applied Food Research

To link to this article: <https://doi.org/10.1016/j.afres.2024.100427>

Resumen

Antecedentes y Objetivos: el maíz juega un papel crucial en la seguridad alimentaria y la nutrición. Este estudio tuvo como objetivo evaluar el impacto de tres cultivares de maíz (Advanta, Leptra y Porva) y diferentes tamaños de partículas de harinas en el índice glicémico estimado (eIG), propiedades tecnofuncionales y comportamientos reológicos, cruciales para definir sus propiedades tecnológicas.

Hallazgos: IAA e ISA presentaron diferencias entre los tamaños de partículas para las harinas de maíz Advanta y Leptra, mientras que la harina Porva mostró resultados consistentes independientemente del tamaño de las partículas. En particular, aunque Advanta y Leptra no mostraron diferencias en el eIG y sus fracciones, Advanta (174,4 μm) demostró el eIG más bajo con 32,21, junto con una mayor capacidad de retención de agua (CRA) en comparación con las harinas de trigo. Otros hallazgos incluyeron un índice de actividad de emulsificación (IAE) inicial de 40,55 m^2/g y una concentración mínima de gelificación (CMG) del 12%. Además, la caracterización reológica indicó un comportamiento no newtoniano y pseudoplástico.

Conclusiones: este estudio presentó una harina de maíz con alto contenido de almidón resistente y bajo índice glicémico con propiedades funcionales que podrían aplicarse para fabricar alimentos saludables que requieran alta solubilidad en agua, mayor capacidad de emulsificación y capacidad de retención de agua mayor que las harinas convencionales.

Importancia y novedad: el estudio de los factores intrínsecos y extrínsecos que pueden modular el índice glicémico del maíz se vuelve crucial. Esta exploración tiene el potencial de diseñar productos saludables y comercialmente viables.

Palabras clave: evaluación tecno-funcional, digestión *in vitro*, harinas libres de gluten, propiedades reológicas.

1. Introducción

El maíz se ha posicionado como el cereal de mayor producción en el mundo y el más usado en alimentos suplementarios, el cual en conjunto con el trigo y el arroz proporcionan el 42,5% de la ingesta energética mundial para el ser humano (Dongmo *et al.*, 2020). Por otro lado, el endospermo del maíz se ha posicionado como una alternativa interesante en alimentos gluten-free (Hassan *et al.*, 2020). Donde, sus propiedades tecnológicas y nutricionales dependen de sus características intrínsecas como la dureza, el tamaño y morfología del granulo, composición molecular (amilosa/amilopeptina), presencia de proteínas y lípidos y la variedad del cultivo, así como propiedades extrínsecas como el método de molienda y operaciones unitarias de procesamiento (An *et al.*, 2023; Caballero-Rothar *et al.*, 2022).

Asimismo, el maíz se destaca por su disponibilidad, accesibilidad, facilidad de uso y transformación, (Dongmo *et al.*, 2020). De esta manera, una de las principales formas de consumo a gran escala es a través de harina entera o fraccionada (Gwirtz & Garcia-Casal, 2014). Sin embargo, existe una dicotomía respecto al uso del maíz en el diseño de alimentos funcionales atribuible a sus altos contenidos de almidón y su categorización como alimento de alto índice glicémico ($\geq 70\%$) considerando que su consumo puede causar efectos adversos en la salud, principalmente en personas con problemas de sobrepeso, obesidad o diabetes (Caballero-Rothar *et al.*, 2022). No obstante, existen estudios que han puesto en evidencia que el maíz presenta almidones resistentes y fibra, lo que incide en la disminución de la tasa de hidrólisis del almidón, es así como la evaluación de factores que intervienen en la digestibilidad de sus fracciones y su efecto en el índice glicémico constituye una importante oportunidad de avanzar en el conocimiento de sus propiedades para uso en el diseño de alimentos. Por otro lado, Bello-Pérez *et al.*, (2021), han resaltado para el desarrollo de productos a base de maíz con bajo IG y mejorar el valor nutricional, el contemplar procesos que controlen la gelatinización del almidón para reducir la hidrólisis enzimática del almidón.

Adicionalmente, el análisis de las propiedades tecnológicas, reológicas y funcionales de harinas de cultivares de maíz, podrían contribuir con la predicción de su comportamiento durante el procesamiento, así como identificar la integridad de los componentes moleculares en el sistema alimentario, profundizar en la comprensión de su estabilidad en el almacenamiento y aceptabilidad de los alimentos, así como definir su aplicabilidad práctica en el desarrollo de productos (Al-Attar *et al.*, 2022; Hettiarachchi & Gunathilake, 2023). Adicionalmente, la seguridad alimentaria implica que el estudio de productos autóctonos pueda promover la conservación de

tradiciones culinarias, garantizar la disponibilidad de alimentos, e incentivar el uso de cultivos que pueden adaptarse mejor a las condiciones ambientales y agroecológicas locales, siendo más resilientes a los cambios climáticos y posiblemente con mayor tolerancia al ataque de plagas y enfermedades (Erenstein *et al.*, 2022; Nhamo L *et al.*, 2022). En este estudio, la elección de los cultivares de maíz, en Colombia se fundamentó en sus características distintivas y contribuciones específicas. El Híbrido Advanta se destaca por su alto potencial productivo evidenciado por la uniformidad de la mazorca, llenado óptimo y un mayor número diferencial de hileras, resistencia estructural y eficiencia lumínica. Mientras tanto, el híbrido Leptra se seleccionó por su adaptabilidad a condiciones contrastantes de humedad, alto rendimiento, evidenciando precocidad en la cosecha, un peso específico del grano destacado y control eficaz de plagas. Ambos híbridos prometen contribuciones significativas, cada uno aportando fortalezas particulares en adaptabilidad, productividad y manejo del cultivo. Por su parte la variedad de maíz Porva se seleccionó por su relevancia en el mercado y consumo adaptable a climas fríos y templados, con niveles superiores de prolina lo cual podría proporcionar un mecanismo de fortalecimiento de la integridad celular. De esta manera, el objetivo de esta investigación fue estudiar las propiedades funcionales, las fracciones de almidón, el índice glicémico y las propiedades reológicas de la harina de maíz obtenida con diferentes tamaños de partícula de tres cultivares de relevancia productiva en Colombia con el fin de predecir su comportamiento tecnológico y definir su aptitud de uso en la industria alimentaria.

2. Materiales y métodos

2.1. Diseño de experimentos

El estudio se llevó a cabo en tres fases. En la primera fase se utilizó un diseño completamente aleatorizado de dos factores (cultivar y tamaño de partícula); cada análisis se realizó por triplicado a partir de tres lotes independientes de maíz.

Fase 1. Se evaluaron los índices de absorción de agua (IAA) e índice de solubilidad de harinas de maíz mediante un diseño completamente aleatorizado (3x5). Estos factores correspondían a cultivares y diámetros de partículas donde se estudiaron las harinas de dos cultivares de maíz (Leptra y Advanta) que fueron procesados en crudo y como control fue utilizada una harina cruda comercial (Porva). Las harinas se fraccionaron secuencialmente y se definieron cinco niveles que correspondieron al factor de diámetro de partícula utilizando tamices de malla N°: 35 (500 μm), 40 (425 μm), 50 (300 μm), 70 (212 μm) y 100 (150 μm). Las variables independientes correspondieron a los índices de absorción de agua (IAA) e índice de solubilidad.

Fase 2. Acorde con los resultados estadísticos de la fase 1 se agruparon fracciones de harina por tamaño de partícula. De esta manera, se evaluó la tasa de digestibilidad, eIG, y el porcentaje de amilosa para los tres cultivares de maíz y las fracciones agrupadas por tamaños de partícula.

Fase 3. Acorde con los resultados de la fase 1 y 2, se seleccionó el cultivar de maíz y la fracción con menores eIG para realizar una evaluación tecno- funcional basada en capacidad de retención de agua (CRA), índice de capacidad emulsificante (IAE), capacidad de gelificación y el comportamiento reológico.

2.2. Materiales

Se estudiaron dos cultivares de maíz amarillo híbrido de endospermo duro, Leptra 30F35 y Advanta 9339, suministradas por la Federación Nacional de Cultivadores de Cereales, Leguminosas y Soya, Fenalce, Tolima, Colombia [4°03'N 75°15'O] y una harina cruda comercial de maíz amarillo Porva adquirida en una tienda local, Bogotá, Colombia [4°36'35"N 74°04'54"O].

Los granos de maíz con un nivel de humedad entre 12 y 14% fueron seleccionados manualmente y limpiados de material extraño, luego almacenados en recipientes plásticos en un lugar seco a temperatura ambiente promedio (13 °C) por un tiempo máximo de seis meses antes de la elaboración de las harinas. Durante este período de almacenamiento, la composición química de los granos de maíz Advanta, Leptra y Porva se mantuvo sin cambios, con niveles de % de almidón nativo de (66.43 ± 0.86 , 65.17 ± 0.29 , 69.70 ± 0.35); % de niveles de proteína total de (7.30 ± 0.1 , 8.10 ± 0.1 , 6.73 ± 0.15); % de niveles carbohidratos totales de (2.02 ± 0.05 , 1.70 ± 0.04 , 1.38 ± 0.05); % niveles de cenizas de (1.15 ± 0.01 , 1.12 ± 0.04 , 1.02 ± 0.03); % niveles de grasa de (4.05 ± 0.18 , 4.64 ± 0.15 , 4.16 ± 0.01); % de niveles de fibra cruda de (1.77 ± 0.06 , 1.97 ± 0.25 , 1.23 ± 0.15) y % de niveles de humedad de (12.0 ± 0.14 , 11.80 ± 0.17 , 12.43 ± 0.06), respectivamente. Todas las pruebas analíticas se realizaron al azar en tres lotes de maíz independientes.

Las enzimas utilizadas pepsina, amilasa pancreática, amiloglucosidasa e invertasa, fueron adquiridas en Sigma-Aldrich (St. Louis, USA). El kit D-Glucose Assay, el kit de amilosa/amilopectina K-AMYL 06/18 y el estándar de almidón de maíz alto en amilosa (68%) fueron adquiridos en Megazyme International (Wicklow, Ireland).

2.3. Obtención de las harinas

El maíz entero se molió en seco usando un molino pulverizador de granos eléctrico de 5,29 oz. Este molino estaba equipado con tres cuchillas de acero inoxidable y funcionaba con un grado de trituración de entre 0,04 y 0,6 mm (malla 325 - 30), con una velocidad del motor de 25000 r/min (Cgoldenwall, China). La molienda en seco se realizó durante 2 minutos con intervalos cada 30 segundos. Las harinas se fraccionaron secuencialmente utilizando una serie de cuatro tamices ASTM (EE. UU.) durante 6 min con un tamizador vibratorio Analysette 3 Spartan (Fritsch, Alemania). Posteriormente, se realizó un análisis de distribución del tamaño de partícula de cada harina para determinar el diámetro promedio de partícula. Los resultados mostraron un diámetro de partícula promedio de 174,4 μm para Advanta; 190,3 μm para Leptra; y 141,1 μm para Porva. Este análisis se realizó para cada harina y se replicó para verificar la consistencia y reproducibilidad del proceso de molienda y fraccionamiento.

Todas las harinas y sus fracciones fueron empacadas en bolsos de polietileno de baja densidad y almacenadas a $4\pm 2^\circ\text{C}$ hasta su análisis por un período máximo de 4 meses. Estas condiciones de almacenamiento fueron mantenidas a una temperatura constante, preservaron efectivamente la composición química aproximada y las propiedades fisicoquímicas de la harina, asegurando que la calidad inicial se mantuviera durante todo el estudio. Esto proporcionó una harina de referencia para toda la duración del estudio.

2.4. Determinación de IAA e ISA

El IAA y el ISA, se determinaron siguiendo el método descrito por (Igual *et al.*, 2021) con pequeñas modificaciones. Se disperso 1g de cada fracción de harina en agua destilada con una relación 1:10 m/v. La suspensión se calentó en un baño de agua a 30°C con agitación por 30 min a 400 rpm en un agitador magnético Velp Arc (VELP Scientifica, Italia). Posteriormente, las dispersiones se aforaron a 13 ml con agua y se centrifugaron a 1700 g durante 10 min en una centrífuga Power Spin DX (UNICO, New Jersey, USA). El IAA correspondió al peso de sedimento por unidad de peso de la muestra original; y el ISA correspondió al peso de sólidos disueltos en el sobrenadante medido en un refractómetro digital Brix, rango 0-85% (Milwaukee Instruments, Wisconsin, USA) y expresado como porcentaje del peso original de la muestra.

2.5. Determinación del contenido de amilosa/amilopectina

El contenido de amilosa de las harinas de maíz se analizó con un kit de amilosa/amilopectina K-AMYL 06/18 acorde con las instrucciones del fabricante. La amilosa se hidrolizó a D-glucosa, y se cuantificó con el kit D-Glucose Assay.

2.6. Digestión *in vitro* del almidón

La digestibilidad *in vitro* del almidón de las harinas de maíz se determinó mediante el método de digestión en dos fases: gástrica y pancreática descrito por (Englyst *et al.*, 1992). Para esto, 2 g de harina se suspendieron en una solución tampón de 5 ml de HCl (0,05 M, pH 1,5), se mezcló con pepsina (7 mg) y se incubó durante 60 min a 37°C. Para la simulación de la fase pancreática, el pH se ajustó a 5,2 con tampón acetato de sodio 0,5 M (3,5 ml) y se hidrolizó la muestra adicionando una solución enzimática mixta (10 mg de amilasa pancreática, 0,06 ml de amiloglucosidasa y 0,086 mg invertasa), se continuó con la digestión a 37°C tomando alícuotas (0,1 ml) en los tiempos (0-20-60-120-180) min, luego se agregó etanol para detener la digestión. Para determinar la glucosa liberada de la muestra se empleó el kit D-Glucose Assay. Con base en la tasa de hidrólisis, se determinaron las fracciones de almidón de digestión rápida (ADR) hidrolizada durante los primeros 20 min, almidón de digestión lenta (ADL) hidrolizada entre 20 y 120 min y almidón resistente (AR) no digerida después de 120 min de digestión. El contenido de cada fracción en almidón se expresa en porcentaje (%) y se calculó mediante las siguientes fórmulas:

$$\text{ADR \%} = (\text{G20} - \text{FG}) / \text{AT}$$

$$\text{ADL \%} = (\text{G120} - \text{G20}) / \text{AT}$$

$$\text{AR \%} = [\text{AT} - (\text{ADR} + \text{ADL})] / \text{AT}$$

Donde G20 y G120 representan el contenido de glucosa (mg) después de 20 y 120 min de hidrólisis, respectivamente; FG es el contenido de glucosa libre (mg) de las muestras de almidón antes de la hidrólisis; AT es el contenido total de almidón (mg) de las muestras.

2.7. Determinación del índice glicémico estimado (eIG)

El eIG se determinó mediante la cinética de hidrólisis del almidón con base en los datos obtenidos de la digestión *in vitro* del almidón según el método propuesto por (Granfeldt *et al.*, 1992). El índice de hidrólisis (IH) cuantifica el porcentaje de glucosa liberada de las muestras en comparación con la glucosa liberada por el estándar; y se calculó como la relación entre el área

bajo la curva de hidrólisis de la muestra en diferentes tiempos de digestión (0, 20, 60, 120, 180 min) y el área bajo la curva de un estándar de almidón de maíz.

2.8. Propiedades tecno-funcionales

2.8.1. Capacidad de retención de agua (CRA)

El CRA se determinó con base en el método descrito por (Lin & Fernández-Fraguas, 2020). Se mezclaron 0.10 g de harina con 15 ml de agua destilada. La suspensión se mezcló en un vortex durante 10 s en intervalos de 5 min durante un periodo de 20 min. Posteriormente, la suspensión se centrifugó a 5000 g durante 15 min. Se eliminó el sobrenadante decantado por completo y se pesó la masa hidratada. El CRA se calculó como el peso de agua retenido (g) por peso de la muestra (g).

2.8.2. Propiedades emulsionantes

La técnica turbidimétrica descrita por Lin & Fernández-Fraguas (2020), basada en la metodología propuesta por Pearce & Kinsella (1978), evalúa el índice de actividad emulsionante (IAE) de harinas a 500 nm. Se seleccionó esta longitud de onda porque su absorbancia proporciona las medidas más reproducibles para describir las propiedades emulsionantes de las proteínas y su capacidad para estabilizar la interfaz aceite-agua. Por tanto, el IAE mide la superficie máxima ocupada por moléculas tensioactivas y su capacidad para formar una emulsión. Para esto, se prepararon emulsiones con 3 ml de aceite vegetal y se mezclaron con 9 ml de dispersión de harina al 0,5 % (p/v) en tampón fosfato 10 mM (pH 7). Se procedió a homogenizar por agitación durante 3 min y posteriormente se tomaron alícuotas de 50 μ L del fondo de la emulsión en el tiempo 0 y posterior a 10 min en reposo, las cuales se diluyeron con 5 ml de solución de dodecil sulfato de sodio al 0,1% y se agitaron por 15s. Se midió absorbancia a 500 nm y se expresó como IAE, m^2/g .

2.8.3. Capacidad de gelificación

Esta propiedad fue evaluada utilizando el método descrito por (Shen & Li, 2021). Se prepararon 10 suspensiones de la harina en agua destilada (10 ml) con concentraciones del 2 al 20% (p/v). Posteriormente, las suspensiones fueron calentadas a 100 °C por 1h con posterior enfriamiento en agua a 4°C por 120 min. La concentración mínima de gelificación (CMG) se detectó cuando la muestra del tubo de ensayo invertido no cayó ni se deslizó.

2.9. Caracterización reológica

Para analizar el comportamiento reológico de las masas de las muestras, se empleó un reómetro de tensión controlada ARES-G2 (TA Instruments, New Castle, DE, USA) equipado con sistema de medición disco-disco (25 mm de diámetro, 2 mm de separación). La masa se preparó con agua destilada a 25°C en una proporción harina/agua 1:0.8, después de mezclar se dejaron reposar por 30 min. Posteriormente, se cargó una muestra en los discos aproximadamente de 982 mm³, se eliminó el exceso de muestra y se dejó en reposo por 5 min. Para la medición de flujo se aplicó una shear rate de 0.1 a 10 s⁻¹, para ajustar los datos experimentales se usó el modelo propuesto por Ostwal–de Waele (Ley de Potencia). La prueba de barrido de deformación se evaluó en una tensión de oscilación de deformación en un rango de 0,01 - 10% a 25°C y se determinó la región viscoelástica lineal (RVL) de la muestra.

Los barridos de frecuencia se realizaron en un rango de frecuencia angular de 0,1 a 100 rad.s⁻¹ con una tensión del 1%. Se realizaron pruebas de rampa de temperatura en un rango de temperatura de 25 °C - 90 °C - 25 °C a una velocidad de 2 °C.min⁻¹ (calentamiento y enfriamiento) y a una frecuencia constante (ω) 6.28 rad.s⁻¹ and 0.05% strain. A partir de las pruebas reológicas se obtuvieron los valores del módulo de almacenamiento (G'), de pérdida (G'') y el valor de tan δ (G''/G'). El mapa de textura de la masa de maíz y la clasificación de la muestra se construyó acorde con (Schreuders *et al.*, 2021).

2.10. Análisis estadístico

Para las variables dependientes de las fases 1 y 2, el efecto de las tres harinas, diámetros de partícula y sus interacciones se analizó mediante análisis de varianza de dos vías ($\alpha = 0,05$) con aplicación posterior de la prueba de comparación múltiple de Duncan ($\alpha = 0,05$). Acorde con los resultados estadísticos de la fase 1, se realizó una agrupación por prueba de contrastes ortogonales evaluando diferencias significativas entre los tamaños de partícula estudiados y se clasificaron las harinas de maíz en enteras, gruesas y finas. Posteriormente, se realizó la correlación de Pearson y el análisis de componentes principales. Para todos los procedimientos estadísticos se utilizó el software estadístico SAS ODA (SAS Institute, Inc., Cary, NC). Todas las pruebas se realizaron por triplicado y los valores se reportan como media con su respectiva desviación estándar (medias \pm DE).

3. Resultados

3.1. IAA e ISA

Los valores del IAA e ISA para las harinas de maíz se presentan en la figura 3.1. Se evidenció que para los valores de IAA se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre cultivares y tamaños de partícula ($p < 0.0001$), así como interacciones significativas entre ambos factores ($p < 0.05$). Los valores promedio de IAA fluctuaron entre 1.91 y 2.44 y mostraron las mayores magnitudes en orden descendente para Advanta, Leptra y Porva (Figura 3.1A). Donde, Porva presentó diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) respecto a Advanta y Leptra. Por otro lado, se encontró que las fracciones de 256 μm y 363 μm de Advanta presentaron el mayor IAA sin diferencias significativas ($p > 0.05$) entre ellas, mientras que las fracciones de 125 μm y 135 μm de Porva presentaron los menores valores de IAA sin diferencias significativas ($p > 0.05$) entre ellas.

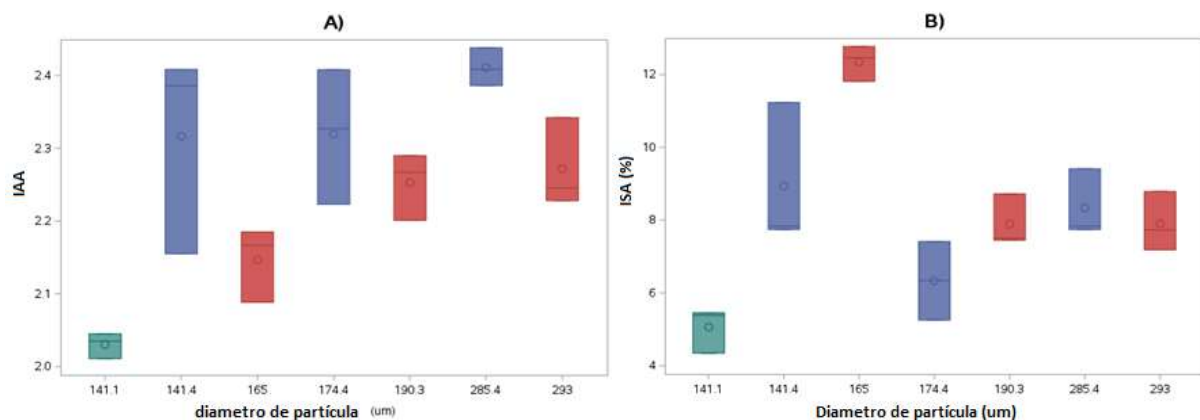


Figura 3.1. Índice de absorción de agua-IAA (A) e índice de solubilidad en agua-ISA (B) de las harinas de maíz Advanta (■), Leptra (■), and Porva (■) con diferentes diámetros de partícula.

Con respecto a la variable tecnológica ISA presentó diferencias significativas entre cultivares y diámetros de partículas ($p < 0.0001$). Las interacciones entre ambos factores también fueron altamente significativas ($p < 0.05$). Los valores de ISA promedio de las harinas de maíz fluctuaron entre 5.65 y 12.65% (Figura 3.1B). Las fracciones de 135 μm de Advanta y Leptra y la fracción 181 μm de Leptra, presentaron los mayores valores para ISA sin diferencias significativas entre ellas, pero con diferencias significativas con las fracciones gruesas (256 μm y 363 μm) ($p > 0.05$); por otro lado, las fracciones 256 μm y 363 μm no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre ellas. También se observó que la harina Porva presentó la menor magnitud para ISA sin diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$) entre los tamaños de partícula evaluados.

En general las harinas de maíz tuvieron una baja absorción de agua ($IAA < 2.5$) lo cual es característico de los almidones nativos de maíz, los datos fueron consistente con (Beech *et al.*, 2022) quienes reportaron magnitudes de 2.31. Sin embargo, las harinas de maíz de los cultivares Leptra (8.1% proteína) y Advanta (7.3% proteína), mostraron mayores IAA respecto a la variedad Porva (6.7% proteína), lo cual podría relacionarse con el contenido de proteína que al tener afinidad con el agua puede retenerla mediante fuerzas débiles como los enlaces de hidrógeno incrementando su absorción (Bravo-Núñez & Gómez, 2019). Por otro lado, la tendencia en la disminución de IAA conforme disminuyen los tamaños de partícula de las fracciones podría atribuirse a que las partículas más finas pueden tener mayor afectación en la integridad de la estructura con posible ruptura de las cadenas de polisacáridos afectando las propiedades de hidratación y absorción (Feng *et al.*, 2022).

Los porcentajes de ISA de las tres harinas evaluadas fueron coherentes con los valores reportado por (Guo *et al.*, 2021) para harina de maíz morado (9.63 %), mientras que son superiores a los valores reportados para almidón de maíz nativo, los cuales fluctúan entre 0.44 y 0.89 % (Beech *et al.*, 2022). El incremento de ISA puede asociarse con la liberación de sólidos solubles y la desintegración de los gránulos de almidón, lo cual puede ser efecto de la molienda e interacciones de la amilosa con el agua (An *et al.*, 2023), un mayor ISA aumenta la capacidad de adhesividad y pegajosidad en el producto final (Lapčíková *et al.*, 2021).

Acorde con los resultados estadísticos de IAA y ISA, Las harinas de maíz de Advanta y Leptra se agruparon en fracciones gruesas (363 + 256) μm y finas (181 + 135) μm , la harina Porva, no presentó diferencias estadísticamente significativas entre sus fracciones, por tanto, se evaluó la harina completa sin fraccionar. Con base en estas agrupaciones, el diámetro promedio de partícula estudiados en la fase dos para advanta fue: 174.4 μm (harina entera), 299.8 μm (fracción gruesa) y 151.5 μm (fracción fina); para lepra: 190.3 μm (harina entera), 293.2 μm (fracción gruesa) y 166.1 μm (fracción fina) y para porva 141.1 μm (harina entera).

3.2. Determinación del contenido de amilosa

Respecto al contenido de amilosa (Tabla 3.1) se encontró que existen diferencias estadísticamente significativas entre los cultivares de maíz ($p < 0.0001$). Para Advanta no se presentaron diferencias significativas del contenido de amilosa entre los tamaños de partícula ($p > 0.05$) a diferencia de Leptra que presentó diferencias significativas entre sus fracciones ($p < 0.05$). El mayor contenido de amilosa (56.42 %) lo presentó la fracción fina de Leptra presentando diferencias significativas respecto a las demás harinas ($p > 0.05$).

El contenido promedio de amilosa en las harinas de maíz fue similar a lo reportado por (Giuberti *et al.*, 2012) de 31.1%; y fue mayor al reportado para trigo 26.4%, tapioca 17.7%, papa 24.16% y camote de 18,82% (Zhang *et al.*, 2017). Así, el contenido de amilosa representaría mayor resistencia al cizallamiento respecto a los otros cereales referenciados, los cuales podrían ser más susceptibles a la retrogradación del almidón, presentar menor hinchazón y mayor resistencia a la digestión enzimática debido a su estructura lineal compacta (Kunyanee & Luangsakul, 2022).

Tabla 3.1. Fracciones de almidón, almidón de digestión rápida (ADR), almidón de digestión lenta (ADL), almidón resistente (AR), contenido de amilosa, índice de hidrólisis (IH), índice glucémico estimado (eIG) de harina de maíz.

Cultivar	Fracción	ADR (%)	ADL (%)	AR (%)	Amilosa (%)	IH	eIG
Advanta	Entera	7.20 ± 1.0 ^a	9.56 ± 3 ^a	49.68 ± 4.0 ^{b,c}	36.55 ± 4.4 ^b	27.86 ± 3.9 ^a	32.21 ± 3.3 ^a
	Gruesa	7.73 ± 1.8 ^a	13.53 ± 2.0 ^a	45.18 ± 0.1 ^{a,b}	38.07 ± 3 ^b	37.25 ± 3.3 ^{a,b}	40.31 ± 2.9 ^{a,b}
	Fina	7.64 ± 0.3 ^a	8.61 ± 1.2 ^a	50.19 ± 1.5 ^c	35.90 ± 0.6 ^b	32.94 ± 2.2 ^{a,b}	36.59 ± 1.9 ^{a,l}
Leptra	Entera	7.26 ± 0.1 ^a	9.31 ± 1.1 ^a	48.59 ± 1.2 ^{b,c}	36.02 ± 2.3 ^b	33.14 ± 2.1 ^{a,b}	36.75 ± 1.8 ^{a,b}
	Gruesa	10.44 ± 3.1 ^a	11.59 ± 3.0 ^a	43.13 ± 0.1 ^a	26.69 ± 1.0 ^a	37.02 ± 6.2 ^{a,b}	40.11 ± 5.3 ^{a,b}
	Fina	11.14 ± 2.0 ^a	10.20 ± 2.1 ^a	43.83 ± 0.2 ^a	56.42 ± 3.1 ^c	42.52 ± 3.9 ^b	44.85 ± 3.3 ^b
Porva	Entera	10.83 ± 2.2 ^a	11.13 ± 1.5 ^a	47.74 ± 0.8 ^{a,b,c}	20.01 ± 0.9 ^a	41.4 ± 2.7 ^b	43.88 ± 2.4 ^b

Los valores son medias ± DE de tres réplicas.

^{a-c} Letras diferentes muestran diferencias estadísticamente significativas P<0,05 según Tukey.

3.3. Digestibilidad del almidón *in vitro* e índice glucémico estimado

Los valores de las fracciones de almidón que incluyen ADR, ADL, AR, el HI calculado a partir de las curvas de hidrólisis del almidón y el eIG correspondiente a cada muestra, se presentan en la tabla 3.1. Respecto a la fracción ADR los valores promedio fluctuaron entre 7.2 % y 11,14% sin diferencias significativas entre los cultivares y diámetros de partícula evaluados. Para ADL los valores fluctuaron entre 8.61 % y 13.53% sin diferencias significativas entre las muestras evaluadas (p>0.05). Adicionalmente, los mayores valores de AR (47.74 – 50.19%) fueron para las harinas enteras (Advanta, Leptra, Porva) y para la fracción fina de Advanta.

Se evidenció que para los valores de HI y de eIG no existen diferencias estadísticamente significativas entre los cultivares de maíz Advanta y Leptra y dentro de cada cultivar no se evidenció diferencias estadísticamente significativas entre los tamaños de partícula evaluados (p<0.05). Se observó que la harina completa de Advanta (174.4 µm) después de los 180 minutos

presentó el valor más bajo de HI (27.86 %) y en consecuencia presentó el menor eIG (32.21) con diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) frente a la harina fina de Leptra (166 μm) y la harina de Porva (141.1 μm). Adicionalmente, el contenido promedio AR de las muestras de harina de este estudio fueron comparables con lo reportado por (Barretti *et al.*, 2022) para almidón de maíz correspondiente a 62.6%. De esta manera, podrían presentar potencial funcionalidad nutricional incrementando el índice de hidrólisis al final de la digestión con efecto inverso en el eIG.

Por otro lado, la cocción puede generar alto impacto en el eIG, debido a que los resultados en harinas de maíz pre- cocidas ascienden entre 77.3 y 80.7 (Caballero-Rothar *et al.*, 2022), este fenómeno podría atribuirse a que la cocción genera la hidratación de los gránulos de almidón que posteriormente se hinchan por efecto de la temperatura y se gelatinizan aumentando la disponibilidad a la hidrólisis enzimática y por tanto su bioaccesibilidad (Lal *et al.*, 2021; Singh *et al.*, 2020). Por otro lado, no se encontró efecto del tamaño de partícula sobre el eIG, lo cual es concordante con los resultados presentados por (Mete *et al.*, 2021) en respuesta glicémica de personas adultas con pan elaborado a partir de harina integral. No obstante, se requiere mayores estudios para comprender la sinergia de los componentes de las harinas de maíz y los mecanismos responsables que tienen efecto en este índice, debido a que se han encontrado estudios que muestran efectos significativos del tamaño de partícula de las harinas sobre la sensibilidad enzimática, independientemente de su fuente (Dong *et al.*, 2021).

3.4. Análisis de componentes principales

Como se muestra en la figura 3.2, el análisis de componentes principales evidenció que los tres primeros componentes (PC) explican el 81.03% de la varianza total (PC1: 37.82%, PC2: 23.14%, y PC3: 20.07%). De esta manera el plano PC1-PC2 (Figura 3.2A) muestra que ADL presenta alta contribución relativa en ambos PC mientras que el contenido de amilosa mostró baja contribución a la varianza de los datos experimentales. Asimismo, se identifican patrones comunes que representan co-variación entre el contenido de amilosa e ISA. El plano PC1-PC3 (Figura 2B), se evidencia alto peso de contribución del contenido de amilosa e ISA en el PC3, mientras que en el PC1 la mayor contribución se relaciona con las variables AR, HI y eIG. Por otro lado, IAA y diámetro de partícula (PD) muestran alto peso de contribución en el PC2 (Figura 3.2C).

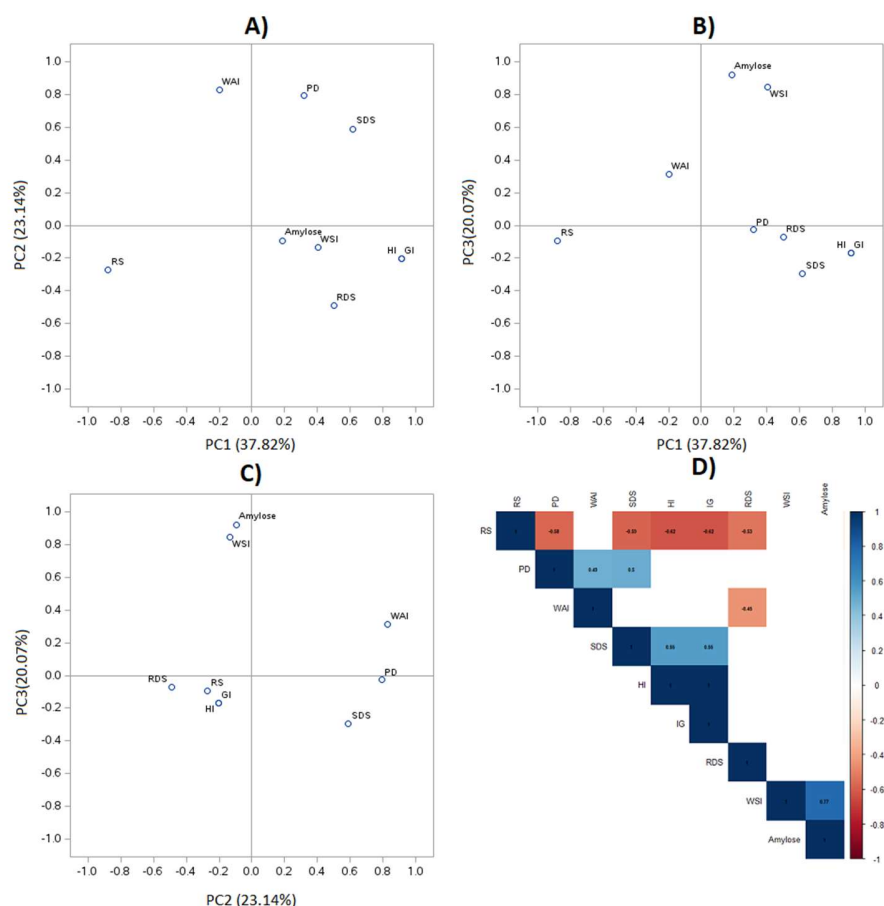


Figura 3.2. Análisis de Componentes Principales. Plano PC1-PC2 (A), plano PC1-PC3 (B), plano PC2-PC3 (C) y matriz de correlación (D).

Índice de absorción de agua (WAI), índice de solubilidad en agua (WSI), diámetro de partícula (PD), almidón de digestión rápida (RDS), almidón de digestión lenta (SDS), almidón resistente (AR), índice de hidrólisis (HI), índice glucémico y (GI). *D: Matriz de correlación: el azul indica una correlación positiva, el rojo una correlación negativa, y un aumento de la intensidad indica un aumento de la correlación de los factores.

3.5. Propiedades funcionales, CRA, IAE y CMG

Con base en los resultados anteriores, se seleccionó la harina entera del cultivar Advanta (174.4 μm) debido a que presentó el mejor eIG (32.21) y se evaluaron para esta muestra, propiedades funcionales como capacidad de retención de agua (CRA), capacidad emulsificante (IAE), capacidad de gelificación (CMG) y se analizó su comportamiento reológico.

El CRA de la harina de maíz entera de Advanta fue de $\sim 1.93 \text{ g/g} \pm 0.12$ comparable al valor reportado por (An *et al.*, 2023) en harinas crudas de maíz 1.04g/g, y fue similar con datos para harinas de amaranto reportados por (Rahimi *et al.*, 2020) correspondientes a 1.09g/g. Sin embargo, fue superior al valor en harina de trigo de 0.51g/g. El incremento en CRA puede

dependen de la estructura de las proteínas y de la presencia de carbohidratos hidrófilos. En consecuencia, las harinas con alta CRA posiblemente formen enlaces de hidrógeno entre grupos hidroxilo u otros enlaces no covalentes que les permite formar agregados de proteínas que atrapan agua, lo cual puede afectar la textura de los productos generando mayor suavidad, retención de los sabores e incremento en los rendimientos (Aguilera *et al.*, 2009; An *et al.*, 2023; Shen & Li, 2021).

La harina de Advanta presentó un IAE inicial de $\sim 40.55 \pm 1.45 \text{ m}^2/\text{g}$ y $\sim 32.52 \pm 0.24 \text{ m}^2/\text{g}$ posterior a 10 min. Las harinas crudas de maíz mostraron una capacidad emulsionante comparable a lo reportado por (Lin & Fernández-Fraguas, 2020) en harinas cruda de frijol ($\sim 42 \text{ m}^2/\text{g}$) y superior a lo reportado por (Aguilera *et al.*, 2009) en las harinas de garbanzo ($\sim 22.9 \text{ m}^2/\text{g}$). La capacidad de formar emulsión en la harina de Advanta puede estar influenciada por el contenido de fibra y el balance de grupos hidrofílico/hidrofóbico que pueden contribuir a la estabilidad de la emulsión aumentando la viscosidad del sistema.

Por otra parte, la concentración mínima de gelificación (CMG) obtenida en la harina de Advanta fue de $12\% \pm 0.57$ menor a lo reportado (Hettiarachchi & Gunathilake, 2023) en harinas de leguminosas (16 -20%), lo que se relaciona con la proporción relativa de los macro componentes de las harinas y la competencia física por el agua que se puede generar entre la gelificación de proteínas y la gelatinización del almidón.

3.6. Propiedades reológicas

3.6.1. Medición en flujo.

La medición en flujo de la masa de harina entera de Advanta se presenta en la Figura 3.3. Se evidenció que la viscosidad (η) decrece con el incremento de la velocidad de corte ($\dot{\gamma}$) en el rango estudiado (10s^{-1} to 10). La masa presentó un comportamiento de adelgazamiento por cizallamiento y un índice de comportamiento de flujo (n) < 1 , lo cual clasifica a la masa de harina de Advanta, dentro de los alimentos no-Newtoniano, con características de un material pseudoplástico. Este comportamiento podría atribuirse a que la estructura molecular del material comenzó a descomponerse, lo que redujo la resistencia interna en forma de fricción y el material se vuelve más fluido. (Zhang *et al.*, 2017) concluyeron que las masas sin gluten como maíz, tapioca, papa son más propensas a presentar adelgazamiento por cizallamiento en comparación

con las masas que contienen gluten, lo cual se convierte en un desafío tecnológico para la producción de alimentos sin gluten.

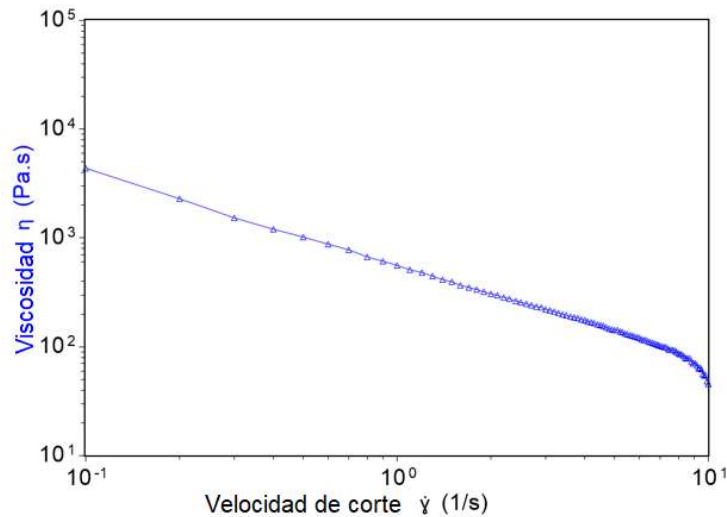


Figura 3.3. Medición de flujo de harina de Advanta entera (Δ), influencia de la velocidad de corte en la curva de viscosidad a 25°C.

3.6.2. Barrido de deformación

En la Figura 3.4 se presenta las mediciones en barrido de deformación. La masa de Advanta presentó el límite de RVL en $\sim 0.16\%$; a partir de la aplicación de esta tensión inició la caída del módulo G' lo que indica que, más allá de este nivel se presentó una deformación crítica de la masa. Asimismo, los datos mostraron que, a un esfuerzo oscilatorio bajo $G' > G''$, indicando que las muestras se encuentran en régimen elástico más parecido a un sólido. Con el incremento del esfuerzo oscilatorio, las muestras presentaron confluencia a una tensión de oscilación de $2,3\%$ ($G' = G''$) y a un alto esfuerzo oscilatorio $G'' > G'$, indicando que el material se vuelve más fluido o viscoso donde las moléculas formaron una estructura de red compleja a través de interacciones, este comportamiento fue concordante con los resultados presentados por (An et al., 2023).

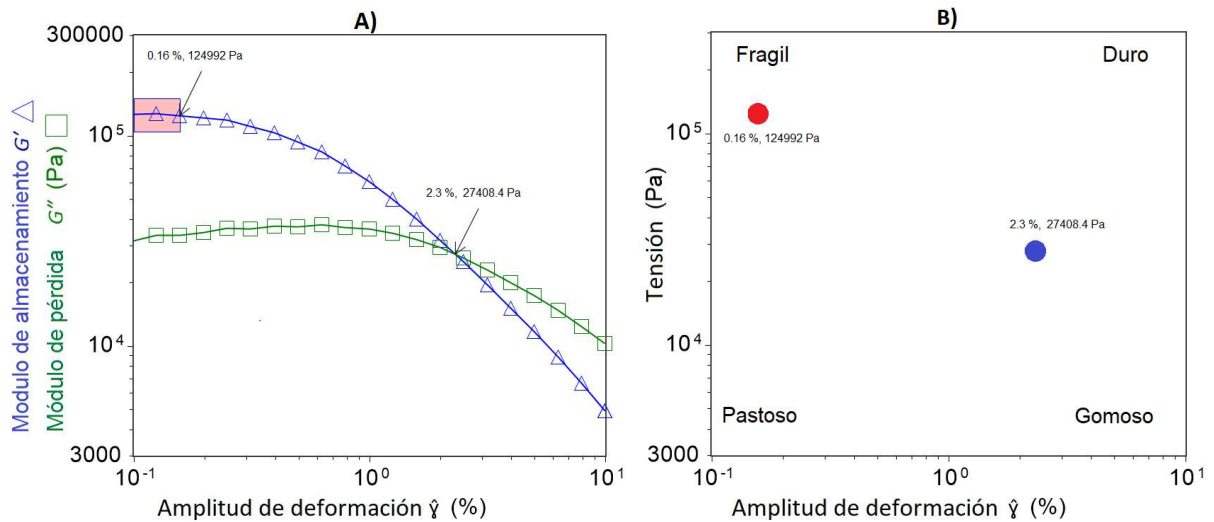


Figura 3.4. Barrido de deformación dinámica para maíz Advanta.

A): Módulo de almacenamiento [G' (Δ azul)] y módulo de pérdida [G'' (\square verde)] versus amplitud de deformación para definir el final del régimen viscoelástico lineal y el punto de cruce ($G' = G''$). B): Mapa de textura y clasificación de materiales en cuatro cuadrantes utilizando las tasas de tensión con la deformación por oscilación en el límite de la región viscoelástica lineal [RVL: (\bullet rojo)] y el punto de cruce [($G' = G''$): (\bullet azul)].

Se evidenció que las funciones dinámicas G' y G'' de la masa de Advanta son independientes de la deformación reflejando un comportamiento viscoelástico en el que se presentó una alteración y reorganización de la red del gel con una estructura transitoria y frágil, lo que permitiría inferir la formación de geles débiles. En la Figura 4D se presenta el mapa de textura a partir de los valores de tensión con la deformación al final del régimen RVL y la tensión con los puntos de cruce ($G' = G''$). La masa de maíz se ubicó en la región frágil en el cuadrante 4 (Fig. 1 arriba izquierda) y a medida que aumentó la tensión se acercó a la región gomosa (abajo a la derecha).

3.6.3. Prueba de barrido de frecuencia

Las mediciones de barrido de frecuencia, la respuesta de G' , G'' y $\tan(\delta)$ frente a la frecuencia angular de la masa de Advanta medidas a 25°C se presentan en la Figura 3.5. La muestra presentó magnitudes de $G' > G''$ ($\tan \delta < 1$) en todo el rango de frecuencia estudiado, cuyos valores mostraron una leve disminución a bajas frecuencias ($0,01 - 1 \omega$) posteriormente un leve aumento a frecuencias más altas ($1 - 100 \omega$) indicando que la muestra mejoró la viscoelasticidad, con diferencias en la dependencia de la frecuencia de los módulos. En las frecuencias estudiadas no se evidenció un cruce observable ($G' \neq G''$), lo que indica que la masa de maíz presentó un

comportamiento elástico dominante. En la gráfica se observó que a bajas frecuencias la tasa de deformación es lenta, y a frecuencias angulares más altas se presentó una disminución en $\tan \delta$, lo cual puede asociarse con un cambio en el comportamiento viscoso a un comportamiento más elástico del material lo cual fue concordante con los hallazgos presentados por (An *et al.*, 2023) en harinas de maíz, evidenciando una estructura de gel débil poco fluido con polímeros reticulados (Sadat & Joye, 2022).

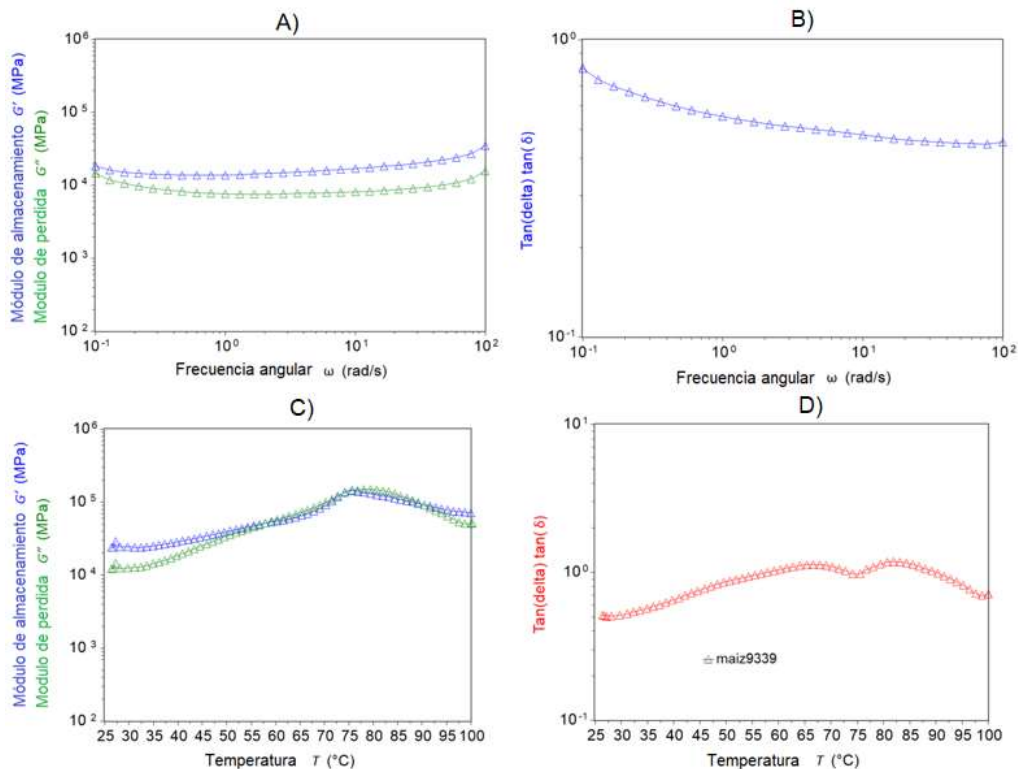


Figura 3.5. Barrido de frecuencia y viscoelasticidad dinámica de una muestra de maíz Advanta A) Respuesta del módulo de almacenamiento G' (Δ azul) - módulo de pérdida G'' (Δ verde) versus la frecuencia angular; B) $\tan(\delta) = G''/G'$ versus la frecuencia angular de las muestras a 25°C. C) Masas durante el ciclo de calentamiento (25 °C-95) a una deformación constante del 2% y frecuencia de 1 Hz. D) Valores de $\tan(\delta)$ versus $^{\circ}T$

3.6.4. Rampa de temperatura

La viscoelasticidad dinámica de la masa de Advanta a tensión constante (2%) y frecuencia constante (6.28 rad/s), en función de la temperatura (ciclo de calentamiento y enfriamiento) se observa en la Figura 3.5C. Durante la etapa inicial de calentamiento (de 25 a 60°C), el valor de G' y G'' incrementó gradualmente con el aumento de la temperatura lo que sugiere que el material se está volviendo más rígido y menos deformable, presentó un cruce de G' y G'' en el ciclo de

calentamiento alrededor de 60°C junto con un pico G' alrededor de 75°C, lo cual puede reflejar que a dicha temperatura se genera un hinchamiento de los gránulos de almidón (Brishti *et al.*, 2020). Asimismo, la muestra presentó picos en $\tan(\delta)$ alrededor de 65°C y los 80°C (Figura 3.5D). Según (Jekle *et al.*, 2016), el $\tan(\delta)$ máximo se puede utilizar como herramienta para identificar el inicio de la gelatinización. No obstante, con el aumento de temperatura el módulo de pérdida (G'') y el valor de $\tan(\delta)$ alcanzaron valores máximos, lo cual es concordante con (Zhang, 2023) que estudió masas de almidón de maíz con 2 % de hidroxipropilmetilcelulosa, y reportó que al aumentar la temperatura, $\tan(\delta)$ alcanzó su punto máximo y luego disminuyó cambiando a un comportamiento de relajación, lo que sugiere que, las cadenas de polímeros se vuelven menos móviles, la masa se vuelve más frágil en la última etapa de calentamiento que otras masas, y da como resultado una estructura relativamente suelta en el producto final.

4. Conclusiones

Se estudiaron las propiedades fisicoquímicas de la harinas de maíz obtenida de tres cultivares Advanta, Leptra y Porva. Además, se evaluaron las propiedades reológicas de Advanta. Los hallazgos muestran que el tamaño de partícula de las harinas tuvo efecto en el incremento del IAA, aunque no influyo en el elG. Las variedades de maíz crudo seleccionadas se clasificaron dentro de alimentos de bajo índice glicémico, relevante para la industria alimentaria considerando la conveniencia de regular los niveles de glucosa en sangre. El comportamiento reológico reveló que la harina de maíz Advanta es más propensa a presentar comportamiento de adelgazamiento por cizallamiento en comparación con las masas que contienen gluten, lo cual se convierte en un desafío tecnológico.

Los resultados de este estudio revelan que la harina de maíz es un ingrediente prometedor con propiedades funcionales que lo convierten en un candidato ideal para aplicaciones en la industria alimentaria, particularmente en la fabricación de productos saludables que requieren alta solubilidad en agua y mayor capacidad de emulsificación. Esto lo hace particularmente adecuado para posibles aplicaciones en sopas y bebidas instantáneas.

Además, las harinas de maíz exhiben una capacidad de retención de agua superior en comparación con las harinas convencionales, como se informó en estudios anteriores. En este sentido, podría justificarse una mayor exploración de su uso en productos de panadería como las galletas, dado su potencial para mejorar la suavidad y conservar el sabor. En consecuencia, los hallazgos de este estudio pueden orientar futuras investigaciones centradas en el diseño de alimentos sin gluten.

Referencias

- Aguilera, Y., Esteban, R. M., Benítez, V., Mollá, E., & Martín-Cabrejas, M. A. (2009). Starch, functional properties, and microstructural characteristics in chickpea and lentil as affected by thermal processing. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(22), 10682–10688. <https://doi.org/10.1021/jf902042r>
- Al-Attar, H., Ahmed, J., & Thomas, L. (2022). Rheological, pasting and textural properties of corn flour as influenced by the addition of rice and lentil flour. *LWT*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113231>
- An, N. nan, Li, D., Wang, L. jun, & Wang, Y. (2023). Microwave irradiation of corn kernels: Effects on structural, thermal, functional and rheological properties of corn flour. *Food Hydrocolloids*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108939>
- Barretti, B. R. V., de Almeida, V. S., Ito, V. C., Silva, B. M., Filho, M. A. da S. C., Sydney, E. B., Demiate, I. M., & Lacerda, L. G. (2022). Combination of organic acids and heat-moisture treatment on the normal and waxy corn starch: thermal, structural, pasting properties, and digestibility investigation. *Food Science and Technology (Brazil)*, 42. <https://doi.org/10.1590/fst.33120>
- Beech, D., Beech, J., Gould, J., & Hill, S. (2022). Effect of amylose/amylopectin ratio and extent of processing on the physical properties of expanded maize starches. *International Journal of Food Science & Technology*, 57, 1–12. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15581>
- Bello-Pérez, L. A., Flores-Silva, P. C., Sifuentes-Nieves, I., & Agama-Acevedo, E. (2021). Controlling starch digestibility and glycaemic response in maize-based foods. In *Journal of Cereal Science*, 99. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.103222>
- Bravo-Núñez, Á., & Gómez, M. (2019). Physicochemical properties of native and extruded maize flours in the presence of animal proteins. *Journal of Food Engineering*, 243, 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.09.005>
- Brishti, F. H., Chay, S. Y., Muhammad, K., Ismail-Fitry, M. R., Zarei, M., Karthikeyan, S., & Saari, N. (2020). Effects of drying techniques on the physicochemical, functional, thermal, structural and rheological properties of mung bean (*Vigna radiata*) protein isolate powder. *Food Research International*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109783>
- Caballero-Rothar, N. N., Borrás, L., & Gerde, J. A. (2022). Physical and chemical kernel traits affect starch digestibility and glycemic index of cooked maize flours. *Food Chemistry*, 369. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130953>

- Dong, S., Fang, G., Luo, Z., & Gao, Q. (2021). Effect of granule size on the structure and digestibility of jackfruit seed starch. *Food Hydrocolloids*, 120. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106964>
- Dongmo, H., Tambo, S. T., Teboukeu, G. B., Mboukap, A. N., Fotso, B. S., Tekam Djuidje, M. C., & Klang, J. M. (2020). Effect of process and variety on physico-chemical and rheological properties of two corn flour varieties (Atp and Kassai). *Journal of Agriculture and Food Research*, 2, 100075. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2020.100075>
- Englyst, H. N., Kingman, S. M., & Cummings, J. H. (1992). Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. *European Journal of Clinical Nutrition*, 46 Suppl 2, S33-50.
- Erenstein, O., Jaleta, M., Sonder, K., Mottaleb, K., & Prasanna, B. M. (2022). Global maize production, consumption and trade: trends and R&D implications. In *Food Security*, 14, (5), 1295–1319. <https://doi.org/10.1007/s12571-022-01288-7>
- Feng, X., Yu, B., Regenstein, J. M., & Wang, L. (2022). Effect of particle size on composition, physicochemical, functional, and structural properties of insoluble dietary fiber concentrate from citrus peel. *Food Science and Technology International*, 1–9. <https://doi.org/10.1177/10820132211063973>
- Giuberti, G., Gallo, A., Cerioli, C., & Masoero, F. (2012). In vitro starch digestion and predicted glycemic index of cereal grains commonly utilized in pig nutrition. *Animal Feed Science and Technology*, 174(3–4), 163–173. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2012.03.006>
- Guo, X., He, X., Dai, T., Liu, W., Liang, R., Chen, J., & Liu, C. (2021). The physicochemical and pasting properties of purple corn flour ground by a novel low temperature impact mill. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 74. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102825>
- Gwartz, J. A., & Garcia-Casal, M. N. (2014). Processing maize flour and corn meal food products. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1312(1), 66–75. <https://doi.org/10.1111/nyas.12299>
- Hassan, E. M., Fahmy, H. A., Magdy, S., & Hassan, M. I. (2020). Chemical composition, rheological, organoleptical and quality attributes of gluten-free fino bread. *Egyptian Journal of Chemistry*, 63(11), 4545–4564. <https://doi.org/10.21608/EJCHEM.2020.28290.2597>
- Hettiarachchi, H. A. C. O., & Gunathilake, K. D. P. P. (2023). Physicochemical and functional properties of seed flours obtained from germinated and non-germinated *Canavalia gladiata* and *Mucuna pruriens*. *Heliyon*, 9(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19653>

- Igual, M., Chiş, M. S., Socaci, S. A., Vodnar, D. C., Ranga, F., Martínez-Monzó, J., & García-Segovia, P. (2021). Effect of medicago sativa addition on physicochemical, nutritional and functional characteristics of corn extrudates. *Foods*, *10*(5). <https://doi.org/10.3390/foods10050928>
- Jekle, M., Mühlberger, K., & Becker, T. (2016). Starch-gluten interactions during gelatinization and its functionality in dough like model systems. *Food Hydrocolloids*, *54*, 196–201. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.10.005>
- Kunyanee, K., & Luangsakul, N. (2022). The impact of heat moisture treatment on the physicochemical properties and in vitro glycemic index of rice flour with different amylose contents and associated effects on rice dumpling quality. *Lwt*, *154*. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112694>
- Lal, M. K., Singh, B., Sharma, S., Singh, M. P., & Kumar, A. (2021). Glycemic index of starchy crops and factors affecting its digestibility: A review. In *Trends in Food Science and Technology*, *111*, 741–755. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.067>
- Lapčíková, B., Lubomír, L., Valenta, P., & Ondroušková Kristýna. (2021). *Effect of the rice flour particle size and variety type on water holding capacity and water diffusivity in aqueous dispersions*. *142*. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111082>
- Lin, T., & Fernández-Fraguas, C. (2020). Effect of thermal and high-pressure processing on the thermo-rheological and functional properties of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) flours. *LWT*, *127*. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109325>
- Mete, E., Haszard, J., Perry, T., Oey, I., Mann, J., & Morenga, L. Te. (2021). Effect of wholegrain flour particle size in bread on glycaemic and insulinaemic response among people with risk factors for type 2 diabetes: A randomised crossover trial. *Nutrients*, *13*(8), 1–12. <https://doi.org/10.3390/nu13082579>
- Nhamo, L., Paterson, G., van der Walt, M., Moeletsi, M., Modi, A., Kunz, R., Chimonyo, V., Masupha, T., Mpandeli, S., Liphadzi, S., Molwantwa, J., & Mabhaudhi, T. (2022). Optimal production areas of underutilized indigenous crops and their role under climate change: Focus on Bambara groundnut. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *6*. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.990213>
- Pearce, K. & Kinsella, J. (1978). Emulsifying properties of proteins: evaluation of a turbidimetric technique. *Journal of Agriculture Food Chemistry*, *26*(3), 716 - 723.
- Rahimi, J., Baur, J., & Singh, A. (2020). Digital imaging as a tool to study the structure of porous baked foods. *Journal of Cereal Science*, *95*. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.103084>

- Sadat, A., & Joye, I. J. (2022). Zein and gluten interactions: A rheological and confocal Raman microscopy study. *Journal of Cereal Science*, 108. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2022.103563>
- Schreuders, F. K. G., Sagis, L. M. C., Bodnár, I., Erni, P., Boom, R. M., & van der Goot, A. J. (2021). Mapping the texture of plant protein blends for meat analogues. *Food Hydrocolloids*, 118. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106753>
- Shen, Y., & Li, Y. (2021). Acylation modification and/or guar gum conjugation enhanced functional properties of pea protein isolate. *Food Hydrocolloids*, 117. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106686>
- Singh, A., Raigond, P., Lal, M. K., Singh, B., Thakur, N., Changan, S. S., Kumar, D., & Dutt, S. (2020). Effect of cooking methods on glycemic index and in vitro bioaccessibility of potato (*Solanum tuberosum* L.) carbohydrates. *Lwt*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109363>
- Zhang, D. (2023). Effect of Proofing on the Rheology and Moisture Distribution of Corn Starch-Hydroxypropylmethylcellulose Gluten-Free Dough. *Foods*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/foods12040695>
- Zhang, D., Mu, T., & Sun, H. (2017). Comparative study of the effect of starches from five different sources on the rheological properties of gluten-free model doughs. *Carbohydrate Polymers*, 176, 345–355. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.08.025>
- Zhang, L., Apea-Bah, F. B., Chen, X., Hornung, P. S., Malunga, L. N., & Beta, T. (2023). The physicochemical and structural properties and in vitro digestibility of pea starch isolated from flour ground by milling and air classification. *Food Chemistry*, 419. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136086>

Capítulo 4. Diseño de un alimento funcional de bajo índice glicémico a partir de harinas compuestas de frijol y maíz fundamentado en sus propiedades tecno-funcionales

Adriana Mejía-Terán, Carla María Blanco-Lizarazo

Artículo finalizado, versión en idioma inglés en proceso de sometimiento.

Diseño de un alimento funcional de bajo índice glicémico a partir de harinas compuestas de frijol y maíz fundamentado en sus propiedades tecnológicas

Adriana Mejía-Terán^{1,2}, Carla María Blanco-Lizarazo^{3*}

¹ Grupo Interinstitucional de Investigación en Ciencias Agropecuarias, Forestales y Agroindustriales del Trópico, Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Bogotá, Colombia

² Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE), Instituto Tecnológico de Costa Rica, Universidad Nacional, Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica

³ Centro de investigación y desarrollo cárnico CI+D, Industria de Alimentos Zenú, Medellín, Colombia

*Corresponding author: cmblanco@zenu.com.co

Authors ORCID:

Mejía-Terán, Adriana: 0000-0002-9044-7548

Blanco-Lizarazo, Carla María: 0000-0002-6463-3056

Resumen

El objetivo de este estudio fue evaluar las características tecnofuncionales de harinas compuestas de maíz Advanta y frijol UNAD-dos Zandú para el diseño un producto de bajo índice glicémico. Las harinas compuestas se formularon reemplazando la harina de maíz por 15% (C:B15), 30% (C:B30), 45% (C:B45) y 60% (C:B60) de harina de frijol. Los controles incluyeron harinas de maíz (C) y trigo (W). Se analizaron la capacidad de retención de agua, la actividad emulsionante y la concentración mínima de gelificación y se seleccionó galletas como matriz alimentaria. Se evaluaron el índice glucémico estimado (eIG) de las galletas, los aminoácidos, los compuestos fenólicos, el perfil sensorial y la textura. Las cuatro galletas a base de maíz calificaron como alimentos de bajo IG. Sin embargo, C:B45 y C:B60 tuvieron mayores proporciones de arginina, lisina y compuestos fenólicos. Estos dos prototipos también mostraron una mayor dureza en comparación con C, aunque sus perfiles sensoriales fueron comparables a los de los controles. En conclusión, se desarrolló con éxito una galleta de bajo índice glucémico con propiedades nutricionales mejoradas.

Palabras clave: sin gluten, galletas, compuestos fenólicos, perfil sensorial, aminoácidos, harinas compuestas.

1. Introducción

Los cereales y sus derivados son fundamentales en la alimentación humana debido a su capacidad de proporcionar energía, además de aportan nutrientes esenciales como proteínas, grasas, fibra, minerales y vitaminas. Por lo tanto, presentan alto potencial como materias primas debido a su versatilidad en una amplia gama de productos consumidos alrededor del mundo en diferentes culturas y regiones tales como harinas, cereales para el desayuno, snacks, masas, pastas, productos horneados y mezclas secas (Beverly, 2024; Senarathna *et al.*, 2024).

No obstante, por la prevalencia actual de las enfermedades crónicas no transmisibles, se requiere la promoción de esquemas dietéticos equilibrados que puedan implementarse de manera efectiva (Lee *et al.*, 2022; Luhovyy *et al.*, 2015; West *et al.*, 2015). En este sentido, las tendencias actuales se enfocan en productos saludables elaborados con ingredientes alternativos, sin gluten y reducidos en azúcar y grasa, así como enfocados en disminuir el índice glicémico (IG) (Augustin *et al.*, 2015).

Para el diseño de alimentos de bajo IG se han utilizado con frecuencia cereales diferentes al trigo y leguminosas. En consecuencia, en este estudio se propone utilizar maíz y frijol debido a que ambos son alimentos ampliamente consumidos a nivel mundial, presentan alta relevancia cultural en América Latina y se han estudiado para el diseño de productos sin gluten (Rico *et al.*, 2021). Adicionalmente, las mezclas entre cereales y leguminosas permiten optimizar sus propiedades nutricionales a través del incremento en el contenido de proteínas, mejora en el equilibrio de aminoácidos, aumento en el contenido de fibra y compuestos bioactivos, así como la reducción de la hidrólisis del almidón moderando el IG (Delamare *et al.*, 2020; Monnet *et al.*, 2019; Ndagire *et al.*, 2015; Salazar *et al.*, 2020). Sin embargo, el diseño de alimentos a base de leguminosas representa un reto debido a que a pesar de los reconocidos beneficios nutricionales y para la salud, su consumo a nivel mundial es inferior a 60 g/día de frijoles cocidos, lo que corresponde a menos de una porción diaria recomendada por U.S. Department of Agriculture, (2020). Este bajo consumo se atribuye a que los consumidores asocian su consumo con malestar gastrointestinal, así como baja innovación y desarrollo en alimentos a base de leguminosas.

Múltiples investigaciones previas han evaluado la incorporación de harinas compuestas de cereales y leguminosas para el diseño de alimentos saludables. Mecha *et al.* (2021) elaboraron galletas en la que se reemplazó el 78% de la harina de trigo por harina compuesta (56% frijol y 22% maíz) reportando menor índice glucémico, mayor almidón resistente, mayores contenidos fenólicos, mayor actividad antioxidante y su consumo aumentó la percepción de saciedad.

Sparvoli *et al.* (2021) obtuvieron snacks a partir de frijol biofortificado y harina de trigo, los cuales mostraron una mayor actividad inhibidora de la amilasa residual y un índice glicémico reducido. Delamare *et al.* (2020) reportaron que cuando sustituyeron un 50% de harina de trigo por harina de garbanzo se obtuvo una reducción del 60% en la digestibilidad del almidón. Con relación a la calidad nutricional Ezegbe *et al.* (2023) reportaron que la inclusión frijol terciopelo en productos horneados, mejoró el perfil de aminoácidos esenciales.

A pesar de los múltiples beneficios que puede suscitar el uso de harinas compuestas en el diseño de alimentos funcionales, es posible que haya retos relevantes desde la pérdida de estructura del producto influenciada por las propiedades funcionales de las harinas. Por ejemplo, la adición de harina de frijol puede afectar la textura de los productos aumentando la dureza o rigidez del producto, igualmente, las características sensoriales pueden ser restrictores del consumo (Monnet *et al.*, 2019). Por ello, se requiere orientar el diseño de producto con una formulación equilibrada entre las propiedades tecnológicas, funcionales y nutricionales permitiendo optimizar el uso de materias primas locales (Sparvoli *et al.*, 2021). En este estudio, se usaron harinas de un cultivar híbrido de maíz Advanta y una variedad mejorada de frijol UNAD-DOS Zandú, ambas descritas y caracterizadas en estudios previos las cuales presentaron bajos IG (Mejía-Terán, Blanco-Lizarazo, Leiva Mateus, & Sotelo-Díaz, 2024; Mejía-Terán, Blanco-Lizarazo, Leiva Mateus, Sotelo-Díaz, *et al.*, 2024). Así, el objetivo de este estudio fue evaluar las características tecno-funcionales de harinas compuestas de maíz Advanta y frijol UNAD-dos Zandú para diseñar un producto de bajo índice glicémico. Asimismo, en el alimento funcional se realizó una caracterización de los perfiles de aminoácidos y polifenoles, así como su textura y perfil sensorial.

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

Para la elaboración de las harinas, el frijol de la variedad UNAD Dos Zandu, fue cosechada en 2023 a una altitud promedio 1460 m.s.n.m. Risaralda, Colombia [4°50'19" N 75°40'13" O] y fue proporcionado por el Centro de Investigación de Agricultura y Biotecnología de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD); la harina se elaboró acorde con los protocolos propuestos por Mejía-Terán *et al.* (2024b) donde se realizó un pretratamiento de remojo, cocción y secado a 75°C por 24 h para su posterior molienda en seco. El maíz amarillo se obtuvo del cultivar Advanta 9339, cosechado en 2023 a una altitud promedio de 1285 m, Tolima, Colombia [4°03'N 75°15'W], suministrado por la Federación Nacional de Cultivadores de Cereales, Leguminosas y Soya

(Fenalce), la harina se obtuvo acorde con los protocolos descritos por Mejía-Terán *et al.* (2024a) los cuales consistieron en un proceso de selección y molienda en seco de los granos crudos. Como control se usó harina de trigo comercial fortificada de una harinera ubicada en Cali, Colombia.

2.2. Diseño de experimentos

El estudio consistió en un diseño completamente al azar con un factor correspondiente al porcentaje de incorporación de harina de frijol. Inicialmente, se evaluaron propiedades tecno-funcionales en las harinas compuestas en cuatro porcentajes de incorporación (maíz:fríjol) 85:15 (C:B15), 70:30 (C:B30), 55:45 (C:B45), 40:60 (C:B60), en harina de maíz 100% (C), en harina de frijol 100% (B1) y harina de trigo 100% (W) correspondientes a capacidad de retención de agua (CRA), el índice de actividad emulsificante (IAE) y la concentración mínima de gelificación (CMG). El análisis se realizó

Acorde con los resultados de las propiedades tecno-funcionales de las harinas compuestas, se seleccionó la matriz alimentaria. Posteriormente, para el diseño del prototipado del alimento, se evaluaron cuatro porcentajes de incorporación de harina de frijol (% m/m) en función de la participación total de harina compuesta (maíz:fríjol): 85:15 (C:B15), 70:30 (C:B30), 55:45 (C:B45) y 40:60 (C:B60), se utilizó como control positivo un prototipo diseñado con harina 100% de maíz (C) y como control negativo se utilizó harina 100% de trigo (W). Para los protocolos de formulación y elaboración del alimento, se realizó una revisión de literatura acorde con el prototipo seleccionado y se procedió a realizar ensayos preliminares para validar y ajustar sus características organolépticas generales y apariencia.

A los prototipos se les determinó el índice glicémico estimado (eIG) *in vitro*. Posteriormente, se seleccionaron las dos fórmulas con menores eIG y se caracterizaron a través de los perfiles de aminoácidos y compuestos fenólicos, análisis de textura instrumental y perfil sensorial de sabor, aroma, olor y aroma, por jueces expertos. Todos los experimentos se realizaron por triplicado a partir de tres lotes independientes de harinas compuestas.

2.3. Propiedades tecno-funcionales de las harinas compuestas

2.3.1. Capacidad de retención de agua (CRA)

El CRA de las harinas compuestas se determinó de acuerdo con el protocolo propuesto por Lin & Fernández-Fraguas (2020). Se preparó una suspensión con 0.10 g de harina y 15 ml de agua

destilada en un tubo de centrifuga y se agitó en un vortex durante 10 s cada 5 min por un periodo de 20 min. Posteriormente, la suspensión se centrifugó a 5000 g durante 15 min. A continuación, se descartó el sobrenadante decantado y se pesó el sedimento hidratado. El CRA corresponde al peso en g de agua retenido por peso en g de la muestra.

2.3.2. Propiedades emulsionantes

Se utilizó la técnica turbidimétrica descrita por Lin & Fernández-Fraguas (2020) para evaluar el índice de actividad emulsificante (IAE). Para esto, se mezclaron 3 ml de aceite vegetal con 9 ml de dispersión de harina al 0,5 % (p/v) en tampón fosfato 10 mM pH 7 (Himedia, India). Se procedió a homogenizar la emulsión con agitación durante 3 min. Posteriormente se tomaron del fondo alícuotas de 50 μ L a las que se añadió 5 ml de solución de dodecil sulfato de sodio al 0,1% (Merk, Alemania) y se agitaron por 15 s. La absorbancia se midió a 500 nm.

2.3.3. Capacidad de gelificación

Se determinó por el método descrito por Shen & Li, (2021). Se prepararon diez suspensiones con harina y agua destilada (10 ml) en tubos de centrifuga (15ml) en concentraciones equidistantes entre 2 y 20%. Posteriormente, las suspensiones se calentaron en un baño de agua hirviendo durante 1 h. Seguidamente, las suspensiones se enfriaron en un baño de agua fría y se refrigeraron a 4°C por 120 min. Los tubos que contenían las suspensiones se invirtieron para determinar la concentración mínima de gelificación (CMG), la cual corresponde a la concentración de la suspensión en la cual la muestra en el tubo invertido no se deslizó o cayó.

2.4. Caracterización de prototipo de alimento

2.4.1. Estimación del índice Glicémico *in vitro*

La hidrólisis del almidón *in vitro* se determinó según el protocolo propuesto por Englyst *et al.* (1992) el cual consistió en una digestión de dos fases: gástrica y pancreática y fue descrito en estudios previos (Mejía-Terán *et al.*, 2024b). Con base en el índice de hidrólisis (HI) se calculó el eIG del prototipo de alimento a partir de la formula empírica propuesta por Granfeldt *et al.* (1992), $eGI = 8,198 + 0,862 HI$.

2.4.2. Determinación de aminoácidos

Para determinar la composición de aminoácidos de los prototipos de alimento se utilizó un cromatógrafo líquido de ultra-alta eficiencia (UHPLC), Dionex Ultimate 3000 (Thermo Scientific,

Sunnyvale, CA, EE.UU.) y una Columna ZORBAX Eclipse XDB C-18 (Agilent, Sunnyvale, CA, EE.UU). Las muestras se disolvieron en una mezcla de metanol:agua (20:80 v/v) con ácido fórmico 0.1% v/v, vórtice (5 min), sonicación (20 min) y posterior inyección al equipo cromatográfico. La cuantificación de los analitos de interés se basó en curvas de calibración empleando los materiales de referencia certificados. Los resultados obtenidos se expresaron en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

2.4.3. Análisis cuantitativo de compuestos fenólicos

El proceso para la obtención de los extractos y la cuantificación de compuestos fenólicos se realizó de acuerdo con el procedimiento descrito en estudios previos (Mejía-Terán *et al.*, 2024b), utilizando la técnica de cromatografía líquida de ultra alto rendimiento (UHPLC), Dionex Ultimate 3000 (Thermo Scientific, Sunnyvale, CA, EE. UU.).

2.4.4. Análisis de textura instrumental

Para la prueba de análisis de textura de una compresión se utilizó un texturómetro TA-XT (Stable Micro Systems, Godalming, United Kingdom). Cinco unidades del alimento prototipado fueron evaluadas con sonda TA39. Los parámetros del ensayo correspondieron a: velocidades pre-test, test y post-test fueron 1 mm/s, el grado de compresión fue del 50%.

2.4.5. Perfilación sensorial

La perfilación sensorial de los prototipos se realizó utilizando la metodología de análisis cuantitativo descriptivo (QDA), la cual fue realizada por 10 jueces entrenados del panel del centro de Investigación y Desarrollo, Industria de Alimentos Zenú (Medellín, Colombia), los protocolos se llevaron a cabo de acuerdo con la norma (ISO 6564, 1985). De esta manera, las muestras sin ningún tratamiento se codificaron aleatoriamente con tres dígitos y se sometieron a un panel en consenso para definir los descriptores sensoriales (Tabla 4.1.). Posteriormente, los panelistas evaluaron la presencia de cada descriptor en términos de sabor, aroma, olor y aroma, usando una escala de 0 – 5, ordenando la intensidad de los descriptores en orden ascendente.

Tabla 4.1. Descriptores sensoriales para análisis cuantitativo descriptivo (QDA) del prototipo de alimento.

Descriptor	Definición	Referencia
Salado	Sabor básico, producido por la sal de mesa, comúnmente usado como condimento.	Cloruro de sodio
Dulce	Sabor básico, producido por cualquier sustancia edulcorante, comúnmente usado como condimento.	Sacarosa Miel
Amargo	Sabor básico, producido por soluciones acuosas de cafeína o quinina.	Cafeína
Mantequilla	Percepción de una alta proporción de grasa láctea.	Mantequilla Margarina
Graso	Percepción de una alta proporción de grasa en un producto, sin exudación.	Manteca de cerdo Sebo
Farináceo	Percepción de sabor típico de harina de cereales.	Alimentos con alto contenido de harinas
Oxidación residual	Sabor, olor y aroma residual fuerte de grasas que permanece y se incrementa con el tiempo, relacionado con el deterioro.	Aceite deteriorado por cocción
Harina	Sabor vinculado a la harina trigo.	Harina de trigo

2.5. Análisis estadístico

Para las variables continuas, se realizó un análisis de varianza unidireccional (ANOVA), las diferencias entre las medias se determinaron mediante la prueba de comparación múltiple de Tukey ($\alpha = 0,05$). Se utilizó el software estadístico IBM SPSS 24 statistical software (SPSS Inc., Chicago, IL, USA). Respecto a la perfilación sensorial, se determinaron las diferencias de C:B45 y C:B60 respecto a C y W (control) utilizando la prueba de Dunnett ($P < 0,05$).

3. Resultados y discusión

3.1. Propiedades tecno-funcionales de las harinas compuestas

En la tabla 4.2. se presentan las propiedades tecno-funcionales correspondientes a CRA, IAE y CMG de las tres harinas compuestas (C:B15, C:B30, C:B45 y C:B60), y controles de harina de frijol (B), harina de maíz (C) y harina de trigo (W).

Tabla 4.2. Propiedades tecno-funcionales de harinas

Harina	CRA g/g	IAE ₀ m ² /g	CMG %
C:B15	1.96 ± 0.03 ^c	37.02 ± 0.56 ^c	13.33 ± 1.15 ^{ab}
C:B30	2 ± 0.04 ^{bc}	36.83 ± 1.07 ^c	14 ^{bc} ± 0 ^{abc}
C:B45	2.14 ± 0.11 ^c	35.1 ± 1.13 ^c	14.66 ± 1.15 ^{bc}
C:60	2.39 ± 0,01 ^d	31,32 ± 1 ^b	15.33± 1.15 ^c
B	2.86 ± 0.07 ^e	22.69 ± 1.38 ^a	18 ± 0 ^d
C	1.93 ± 0.12 ^b	40.55 ± 1.45 ^d	12 ± 0 ^a
W	1.6 ± 0 ^a	52 ± 0.5 ^e	16 ± 0 ^{cd}

Los valores son medias ± SEM de tres réplicas.

a-c Letras diferentes muestran diferencias estadísticamente significativas $P < 0,05$ según Tukey.

La harina de 100 % frijol (B) presentó el mayor valor de CRA correspondiente a 2.86 g/g con diferencias estadísticamente significativas frente a las harinas compuestas, el control de harina de maíz y la harina de trigo ($p < 0.05$). Por otro lado, los valores de esta harina fueron consistentes con los reportados por Lin & Fernández-Fraguas (2020) en harinas de frijol tratadas con alta presión hidrostática, lo cual podría relacionarse con un mayor contenido de proteína y el pre-tratamiento térmico que genera desnaturalización exponiendo algunos enlaces peptídicos y cadenas laterales polares previamente ocultos, lo que conduce a una mayor capacidad para atrapar y retener moléculas de agua. Además, las harinas con mayor cantidad de proteína pueden formar agregados a través de enlaces de hidrógeno que le permite retener mayor cantidad de agua. En consecuencia, alimentos elaborados con harinas con altas CRA generarían una textura más suave y fresca, mejorando la consistencia y favoreciendo la retención de los sabores (Aguilera *et al.*, 2009; An *et al.*, 2023; Shen & Li, 2021).

Respecto a las propiedades emulsificantes, la harina de trigo (W) presentó el mayor IAE de $\sim 52.55 \text{ m}^2/\text{g}$ con diferencias significativas ($p < 0,05$), seguida de la harina de maíz y las cuatro harinas compuestas, las cuales no presentaron diferencias significativas entre sí ($p > 0,05$). El incremento de IAE, puede estar influenciado por el contenido de lípidos, almidón y el balance de grupos hidrofílicos/hidrofóbico. Por otro lado, la disminución en la IAE proporcional a la participación de la harina de frijol, podría atribuirse a la disminución de la capacidad de las proteínas del frijol para adsorberse, desplegarse y reorientarse rápidamente en la oilwater interface y la disminución de la solubilidad de las proteínas en harinas tratadas térmicamente (Lin & Fernández-Fraguas, 2020). No obstante, el IAE de las harinas compuestas fue superior a los valores reportados por Ma *et al.*, (2011) en las harinas de garbanzos y lentejas tostadas y precocidas ($\sim 10\text{--}25 \text{ m}^2/\text{g}$).

Respecto a la CMG, la harina B presentó los mayores valores con diferencias significativas ($p < 0,05$), seguidas de C:B60, C:B45, C:B30, C:B15, y C, donde C:B45 y C:B30, así como C:B15 y C no presentaron diferencias entre sí ($p > 0,05$). La disminución del CMG puede atribuirse al incremento en la concentración de carbohidratos, lo que podría reducir la afinidad termodinámica de la proteína por la solución acuosa y fortalecer la interacción entre las moléculas (Hettiarachchi and Gunathilake, 2023).

Los resultados de las propiedades tecno-funcionales de las harinas compuestas no presentaron diferencias significativas ($p > 0,05$) atribuibles a los porcentajes de composición frijol/maíz. Asimismo, muestran características de altas CRA en comparación con otras de harinas de

leguminosas, lo cual se traduce en masas más consistentes y suaves ideales para productos de panificación; lo que sumado a su contenido de proteína podría relacionarse con masas más extensibles y menos elásticas. Por otro lado, las harinas compuestas en general presentaron mayor capacidad emulsificante respecto a otras leguminosas, lo cual puede contribuir a la estabilidad, uniformidad y consistencia de la masa, mejorando las propiedades en los productos horneados. Adicionalmente, la disminución en la CMG respecto a la harina de maíz podría asociarse con productos de textura más ligera, suave y menos densa, por lo tanto, las masas permitirían realizar moldeado. En consecuencia, las harinas compuestas propuestas permitirían la elaboración de galletas. Autores como Yang *et al.*, (2022) han planteado que las galletas representan una alternativa viable para la inclusión de leguminosas y el aprovechamiento de su calidad nutricional, adicionalmente entre los aperitivos horneados es la categoría de mayor consumo a nivel mundial convirtiéndose en una opción ideal para llegar a todos los segmentos de la población (Sparvoli *et al.*, 2016).

3.2. Diseño del alimento prototipado

La formulación se ajustó con base en diseños de prototipos de galletas previamente publicados por (Delamare *et al.*, 2020; Sparvoli *et al.*, 2016), donde la cantidad de agua fue modificada acorde al índice de absorción de agua de las harinas, cuyas formulaciones se muestran en la tabla 4.3. El proceso de elaboración se realizó acorde con los procedimientos descritos por Delamare *et al.* (2020) con ligeras modificaciones respecto al tamaño del producto (45 mm de diámetro, 0.7 mm de espesor) con un peso aproximado de 10 g. Los prototipos se hornearon en un horno de convección de aire forzado precalentado a 180 °C durante 15 min.

Tabla 4.3. Formulación de los prototipos de galletas (g)

Prototipo	Harina			Mant equilla	Huevo liquido	Leche en polvo	Azúcar	Polvo hornear	sal	Agua
	Maíz	Frijol	Trigo							
C:B15	48.36	8.54	-	22.4	10	1.7	0.8	0.6	0.4	14
C:B30	39.8	17.1	-	22.4	10	1.7	0.8	0.6	0.4	19
C:B45	31	25.9	-	22.4	10	1.7	0.8	0.6	0.4	21
C:B60	22.8	34.1	-	22.4	10	1.7	0.8	0.6	0.4	24
C	56.9	-	-	22.4	10	1.7	0.8	0.6	0.4	7.2
W	-	-	56.9	22.4	10	1.7	0.8	0.6	0.4	7.2

La Figura 4.1. representa la visualización de cada prototipo de galleta obtenido.

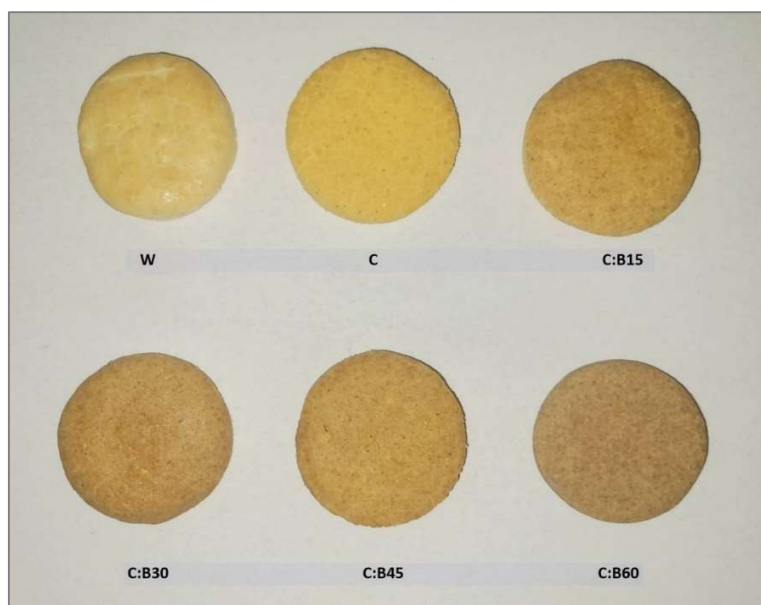


Figura 4.1. Prototipos de galletas a partir de harina compuesta en diferentes proporciones (maíz:frijol): C:B15 (85:15), C:B30 (70:30), C:B45 (55:45), C:B60 (40:60), y galletas control: C (100% maíz) control positivo, W (100% trigo) control negativo.

En la tabla 4.4., se presenta la composición proximal obtenida de los prototipos de galletas.

Tabla 4.4. Composición química proximal (por 100 g de producto) de galletas elaboradas a partir de harinas compuestas (maíz/frijol)

Prototipo	Azúcares totales	Proteína cruda	Cenizas	Grasa	Fibra (cruda)	Carbohidratos totales ^a	Humedad
C:B15	2.02	10.54	1.79	23.40	1.16	54.03	7.06
C:B30	2.34	12.95	2.20	22.89	1.41	50.97	7.24
C:B45	2.65	15.36	2.60	22.61	1.67	47.62	7.49
C:B60	2.83	16.15	2.77	21.64	2.02	46.33	8.26
W	1.89	6.23	1.90	22.16	1.17	60.99	5.66
C	2.32	8.33	2.18	24.34	<1	57.53	5.30

^a Los carbohidratos potencialmente disponibles; no incluye carbohidratos como fibra

3.2.1. Evaluación de prototipos en el índice glicémico estimado

Los valores medios del eIG de los tratamientos se muestra en la figura 4.2. Los prototipos que incorporaron harina de frijol presentaron un bajo IG (< 40.5) con diferencias significativas ($p < 0.05$) respecto al control positivo C (47.9) y diferencias significativas respecto al control

negativo W (73.95). Asimismo, los resultados mostraron que la digestibilidad del almidón siguió una relación dosis-respuesta, donde los valores disminuyeron en función del aumento en el porcentaje de sustitución de harina de frijol (60<45<30<15). Los prototipos C:B60 y C:B45 (28.82 - 31.6) presentaron los menores valores de eIG, los cuales son menores a los reportados por Sparvoli *et al.*, (2021) quienes evaluaron galletas en los que se sustituyeron 60% de harina de trigo por harina de frijol obteniendo eGI de 58.5.

La disminución en el eGI en los prototipos de galletas elaboradas con incorporación de frijol puede estar asociado al patrón de difracción del almidón tipo C, característico de las leguminosas el cual tiene un hinchamiento más restringido y su estructura granular más resistente a la fragmentación mecánica y a la hidrólisis enzimática (Biliaderis, 1991). De igual manera, se ha evidenciado que el almidón con tratamientos térmicos tiende a retrogradarse, produciendo fracciones no digeribles o resistentes. Complementariamente, los frijoles utilizados en este estudio contienen una cantidad significativa de proteína endógena (22%) y compuestos fenólicos identificados en resultados previos (Mejía-Terán *et al.*, 2024b), lo que puede dar lugar a interacciones macromoleculares con el sustrato, encapsulación del almidón y que además puede contribuir a retrasar el vaciamiento gástrico (Yang *et al.*, 2019; Yu *et al.*, 2018; Ovando-Martínez *et al.*, 2011). Adicionalmente, las galletas elaboradas con 100 % harina de maíz, también se clasificaron dentro de alimentos de bajo índice glicémico.

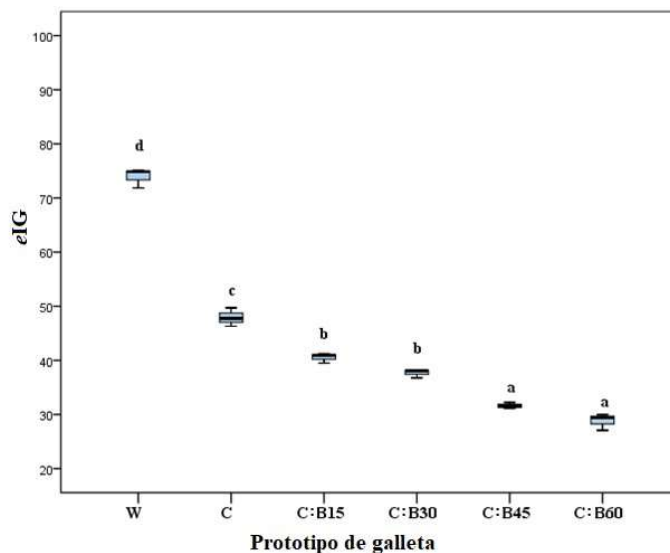


Figura 4.2. Índice glicémico estimado (eIG) en prototipos de galletas a partir de harina compuesta en diferentes proporciones (maíz:frijol): C:B15 (15:85), C:B30 (30:70), C:B45 (45:55), C:B60 (60:40) y galletas control: C (100% maíz) control positivo, W (100% trigo) control negativo. Los valores son medias \pm el error estándar de tres réplicas. a-d Letras diferentes muestran diferencias estadísticamente significativas $P < 0,05$ según Tukey.

Con base en los resultados anteriores, se seleccionaron los prototipos C:B60 y C:B45, debido a que presentaron el menor eGI (28.82 - 31.6). En consecuencia, se determinó su perfil de aminoácidos y de compuestos fenólicos, y se realizó el análisis de textura instrumental y perfilación sensorial.

3.2.2. Perfil de aminoácidos y polifenoles

La Tabla 4.5. muestra el perfil de aminoácidos, la concentración y tipo de compuestos fenólicos identificados en los prototipos C:B45 y C:B60. Se identificó que la cantidad de aminoácidos en general es proporcional al incremento de la incorporación de la harina de frijol. C:B60 registró un contenido mayor de aminoácidos alrededor del 20 – 30 % respecto a C:B45, sin embargo, no se observó una tendencia definida. Respecto a los aminoácidos esenciales identificados en las dos galletas, el más predominante fue la arginina; mientras que, para lisina, el aminoácido limitante en los cereales hubo un incremento significativo (250%) en C:B60 en comparación con C:B45. Estos resultados fueron concordantes con lo reportado por Adebayo-Oyetero *et al.*, (2021) quienes identificaron la arginina como el aminoácido más abundante (6.08 mg/100 g) en alimentos complementarios a base maíz y velvet bean. Asimismo, reportaron un incremento de lisina a medida que la harina de maíz fermentada fue sustituida hasta un 50 % por harina de la leguminosa. Respecto a los aminoácidos no esenciales, los más predominantes fueron asparagina, prolina y el ácido glutámico. De esta manera, las galletas C:B60 presentaron mayor concentración de aminoácidos esenciales y no esenciales respecto a C:B45. Sin embargo, la formulación de las galletas incorporó huevo a concentración constante en todos los tratamientos, lo que pudo aportar ácido glutámico, leucina, y lisina (Mori *et al.*, 2020).

Tabla 4.5. Perfil de aminoácidos y compuestos fenólicos de las galletas elaboradas a partir de harina compuestas de maíz y frijol C:B45 y C:B60

Composición de aminoácidos (mg·kg ⁻¹)	C:B45	C:B60
Arginina	268.82	370.28
Lisina	51.48	131.79
Isoleucina + Leucina	90.87	124.55
Fenilalanina	42.51	51.53
Treonina	29.31	37.46
Triptófano	28.14	24.97
Metionina	25.98	32.27
Valina	24.1	20.3

Composición de aminoácidos (mg·kg⁻¹)	C:B45	C:B60
Histidina	< 0.05	15.41
Asparagina	166.89	210.28
Prolina	219.52	182.41
Ácido glutámico	135.19	177.81
Tirosina	123.75	103.49
Ácido aspártico	58.08	71.34
Glutamina	27.37	33.71
Compuestos fenólicos (mg·kg⁻¹)		
Catequina	1.2	1.3
Epicatequina	0.4	0.5
Quercetina	0.5	0.7
Ácido cafeico	1.0	0.6
Ácido p-hidroxibenzoico	1.9	1.5
Ácido p-cumárico	1.8	0.8
Ácido carnósico	4.4	5.8

Respecto a la concentración y tipo de compuestos fenólicos, en los dos prototipos (C:B45 y C:B60) se identificaron flavonoides como catequina, quercetina y epicatequina. La catequina es característica de los frijoles de capa coloreada y también ha sido reportado por Ramírez-Jiménez *et al.*, (2014) como uno de los flavonoides de mayor abundancia en harinas de frijol. Aguilera *et al.*, (2011) identificaron quercetina en harinas de frijol que fueron sometidas a remojo, cocción y deshidratación. Adicionalmente, se identificaron ácidos fenólicos, en mayor proporción ácido carnósico, seguido de ácido p-hidroxibenzoico, ácido p-cumárico y ácido cafeico. Los compuestos hidroxibenzoicos han sido reportados por Aguilera *et al.*, (2011) como uno de los principales grupos fenólicos en el frijol Cannellini y Pinta.

Para la harina de frijol utilizada en este estudio, previamente se identificaron catequina, epicatequina, quercetina, lo cual evidencia que dichos compuestos fenólicos son resistentes a tratamientos térmicos como horneado (180°C, 15 minutos) (Mejía-Terán *et al.*, 2024b). Adicionalmente, los ácidos fenólicos (ácido carnósico, p-hidroxibenzoico, p-cumárico y cafeico) no fueron identificados previamente en las harinas de frijol, lo cual podría atribuirse a que las condiciones de procesamiento de horneado de las galletas generan la ruptura de paredes celulares o se produce degradación de compuestos fenólicos insolubles, lo que produce una mayor disponibilidad de los mismos (Aguilera *et al.*, 2011).

3.2.3. Análisis de textura instrumental

La textura instrumental medida por la fuerza máxima necesaria para romper las galletas como índice de la dureza (gf) de los prototipos de galletas C:B45 y C:B60 y los controles C y W se muestran en la Figura 4.3. El índice de dureza estuvo en el rango de 760.3 a 1780.5 gf con diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las galletas de los tratamientos C:B45 y C:B60, y el control positivo C, en orden ascendente el índice de dureza fue C, C:B60, C:B45 y W. No obstante, el índice de dureza de C:B45 con relación al control negativo-W no presentó diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$). Estos resultados son consistentes con lo presentado por Cappa *et al.*, (2020) quienes reportaron que galletas elaboradas con diferentes variedades de frijol tenían valores de dureza similares a las galletas que contenían trigo, lo cual presenta alta relevancia el diseño de productos funcionales sin afectación de su estructura.

De esta manera, la incorporación de frijol puede mejorar las características texturales de productos a base de cereales. Cheng & Bhat, (2016) encontraron que en galletas que incorporaron jering seed se presentó mayor resistencia a la rotura, lo cual podría asociarse con las interacciones entre proteína y almidón, mediante enlaces de hidrógeno que pueden generarse durante el desarrollo de la masa (Ezegbe *et al.*, 2023).

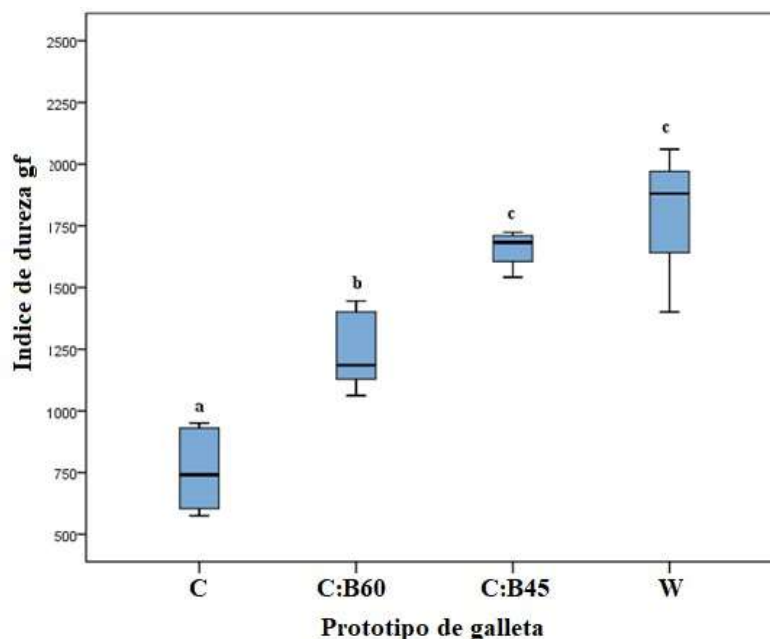


Figura 4.3. Perfil de textura, efecto de la incorporación de harina de frijol sobre la dureza de galletas elaboradas con harina de maíz. Values are means \pm SEM of five replicates.

3.2.4. Perfil sensorial

Los valores de las modas generados por el QDA para los prototipos de galletas se muestran en la Figura 4.4. Los resultados sugieren que en C:B45, el panel no detectó diferencias estadísticamente significativas en los ocho descriptores (salado, dulce, amargo, harina, mantequilla, farináceo, graso y oxidación residual) respecto al control positivo C ($p>0.05$). No obstante, el panel detectó diferencias marcadas en una unidad en los descriptores graso, oxidación residual respecto a C. En el prototipo C:B45, tampoco se detectó diferencias significativas en los ocho descriptores evaluados respecto a W ($p>0,05$). No obstante, se detectaron diferencias de una unidad en los descriptores amargo, mantequilla y oxidación residual.

Respecto a C:B60 el panel no detectó diferencias estadísticamente significativas ($p>0.05$) respecto a C y W en los descriptores evaluados. No obstante, el panel detectó una diferencia mayor a una unidad en el descriptor farináceo frente a C. Igualmente, el valor de intensidad en oxidación residual fue mayor en C:B60 a pesar de que no presentó diferencias significativas frente a C y W ($p>0,05$), esto podría atribuirse a descriptores de sabor relacionados a las legumbres que incrementan esta percepción.

En general, se puede inferir que los perfiles sensoriales de las galletas C:B45 y C:B60 son similares a los controles con harinas de maíz y trigo, en contraposición a los resultados reportados por otros investigadores en productos con la incorporación de leguminosas (Cappa *et al.*, 2020; Sparvoli *et al.*, 2021).

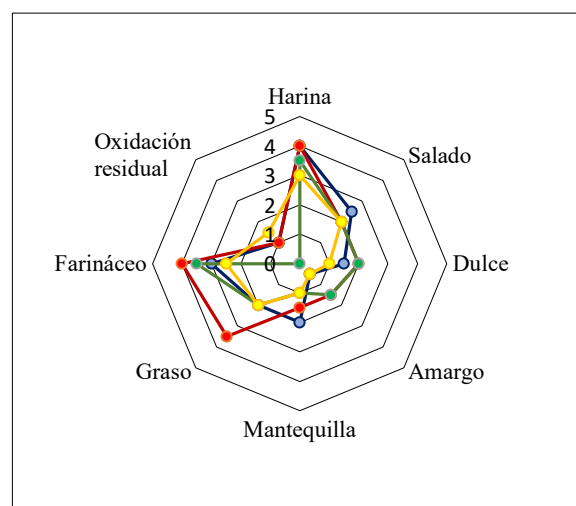


Figura 4.4. Análisis cuantitativo descriptivo de prototipos de galletas con harina compuesta de maíz y frijol (C:B45 -●-), (C:B60 -●-), harina de maíz (C -●-) y harina de trigo (W -●-).

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio mostraron que es viable sustituir harina de maíz por harina de frijol hasta en un 60% para la producción de galletas gluten free con potencial funcional, especialmente en términos de índice glicémico. Este hallazgo representa un equilibrio entre beneficios nutricionales y propiedades sensoriales sin comprometer las propiedades de textura deseadas.

Las galletas C:B45 y C:B60 presentaron perfiles nutricionales favorables, destacándose por su contenido de aminoácidos esenciales como lisina y arginina, así como la presencia de flavonoides como catequina y ácidos fenólicos como carnósico, cafeico, p-hidroxibenzoico y p-cumárico. Además, se observaron propiedades de textura influenciadas por el nivel de incorporación de harina de frijol, siendo las galletas C:B45 comparables en dureza a las galletas estándar de trigo.

Este estudio proporciona directrices técnicas para el desarrollo de un alimento diferenciado, listo para el consumo, como alternativa alimenticia dirigida a poblaciones con necesidades dietéticas específicas, tales como bajo índice glicémico y libre de gluten, al mismo tiempo que ofrece un valor nutricional agregado.

5. Disponibilidad de datos

Los datos generados o analizados durante este estudio están disponibles previa solicitud razonable del autor correspondiente.

6. Declaración de intereses

Los autores declaran que no tienen ningún potencial conflicto de intereses con respecto a la investigación, autoría o publicación de este artículo.

7. Agradecimientos

Este trabajo contó con el apoyo de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia-UNAD. Al Centro de Investigación y Desarrollo de la Industria Alimentaria Zenú. Al Ing. Darío Mejía por su apoyo en la ejecución experimental. Este trabajo fue apoyado por la Universidad Nacional Abierta y a Distancia de Colombia-UNAD bajo el [Beca ECAPMAPIE092022].

8. Declaración de contribución de autoría CRediT

Adriana Mejía Terán: ejecución experimental, análisis de datos, redacción el manuscrito, conceptualización del estudio y adquisición de financiamiento. **Carla Blanco-Lizarazo:** análisis de datos, análisis estadístico, redactó el manuscrito, revisó y conceptualizó el estudio.

Referencias

- Adebayo-Oyetero, A.O., Olatidoye, O.P., Bamikole, T.J., Igene, C.O., Coker, O.J., 2021. Quality Characteristics of Complementary Food from Locally Fermented Maize Flour Blended with Sprouted Velvet Bean (*Mucuna utilis*) Flour in Nigeria. *Eur J Nutr Food Saf* 79–92. <https://doi.org/10.9734/ejnfs/2021/v13i130351>
- Aguilera, Y., Esteban, R.M., Benítez, V., Mollá, E., Martín-Cabrejas, M.A., 2009. Starch, functional properties, and microstructural characteristics in chickpea and lentil as affected by thermal processing. *J Agric Food Chem* 57, 10682–10688. <https://doi.org/10.1021/jf902042r>
- Aguilera, Y., Estrella, I., Benitez, V., Esteban, R.M., Martín-Cabrejas, M.A., 2011. Bioactive phenolic compounds and functional properties of dehydrated bean flours. *Food Research International* 44, 774–780. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.01.004>
- An, N. nan, Li, D., Wang, L. jun, Wang, Y., 2023. Microwave irradiation of corn kernels: Effects on structural, thermal, functional and rheological properties of corn flour. *Food Hydrocoll* 143. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108939>
- Augustin, L.S.A., Kendall, C.W.C., Jenkins, D.J.A., Willett, W.C., Astrup, A., Barclay, A.W., Björck, I., Brand-Miller, J.C., Brighenti, F., Buyken, A.E., Ceriello, A., La Vecchia, C., Livesey, G., Liu, S., Riccardi, G., Rizkalla, S.W., Sievenpiper, J.L., Trichopoulou, A., Wolever, T.M.S., Baer-Sinnott, S., Poli, A., 2015. Glycemic index, glycemic load and glycemic response: An International Scientific Consensus Summit from the International Carbohydrate Quality Consortium (ICQC). *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases* 25, 795–815. <https://doi.org/10.1016/j.numecd.2015.05.005>
- Beverly, R.L., 2024. Cereals and Derived Products. *Encyclopedia of Food Safety, Second Edition, Volume 1-4* 1–4, 1–9. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822521-9.00119-2>
- Biliaderis, 1991. The structure and interactions sf starch with food constituents. *Can J Physiol Pharmacol* 69, 60–78. <https://doi.org/https://doi.org/10.1139/y91-011>
- Cappa, C., Kelly, J., Ng, P., 2020. Baking performance of 25 edible dry bean powders: Correlation between cookie quality and rapid test indices. *Food Chem* 302, 125338. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125338>
- Cheng, Y.F., Bhat, R., 2016. Functional, physicochemical and sensory properties of novel cookies produced by utilizing underutilized jering (*Pithecellobium jiringa* Jack.) legume flour. *Food Biosci* 14, 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2016.03.002>
- Delamare, G.Y.F., Butterworth, P.J., Ellis, P.R., Hill, S., Warren, F.J., Edwards, C.H., 2020. Incorporation of a novel leguminous ingredient into savoury cookies reduces their starch

- digestibility: Implications for lowering the Glycaemic Index of cereal products. *Food Chem X* 5. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2020.100078>
- Englyst, H.N., Kingman, S.M., Cummings, J.H., 1992. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. *Eur J Clin Nutr* 46 Suppl 2, S33-50.
- Ezegbe, C.C., Onyeka, J.U., Nkhata, S.G., 2023. Physicochemical, amino acid profile and sensory qualities of cookie produced from a blend of wheat and velvet bean (*Mucuna pruriens*) flour. *Heliyon* 9. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15045>
- Granfeldt, Y., Bjorck, I., Drews, A., Tovar, J., 1992. An in vitro procedure based on chewing to predict metabolic response to starch in cereal and legume products. *American Journal of Clinical Nutrition* 59. <https://doi.org/10.1093/ajcn/59.3.777S>
- Hettiarachchi, H.A.C.O., Gunathilake, K.D.P.P., 2023. Physicochemical and functional properties of seed flours obtained from germinated and non-germinated *Canavalia gladiata* and *Mucuna pruriens*. *Heliyon* 9. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19653>
- ISO 6564:1985, 1985. Sensory analysis - Methodology - Flavour profile methods.
- Lee, J., Briggs Early, K., Kovesdy, C.P., Lancaster, K., Brown, N., Steiber, A.L., 2022. The Impact of RDNs on Non-Communicable Diseases: Proceedings from The State of Food and Nutrition Series Forum. *J Acad Nutr Diet* 122, 166–174. <https://doi.org/10.1016/j.jand.2021.02.021>
- Lin, T., Fernández-Fraguas, C., 2020. Effect of thermal and high-pressure processing on the thermo-rheological and functional properties of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) flours. *LWT* 127. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109325>
- Luhovyy, B.L., Mollard, R.C., Panahi, S., Nunez, M.F., Cho, F., Anderson, G.H., 2015. Canned navy bean consumption reduces metabolic risk factors associated with obesity. *Canadian Journal of Dietetic Practice and Research* 76, 33–37. <https://doi.org/10.3148/cjdpr-2014-030>
- Ma, Z., Boye, J.I., Simpson, B.K., Prasher, S.O., Monpetit, D., Malcolmson, L., 2011. Thermal processing effects on the functional properties and microstructure of lentil, chickpea, and pea flours. *Food Research International* 44, 2534–2544. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.12.017>
- Mecha, E., Correia, V., Bento da Silva, A., Ferreira, A., Sepodes, B., Figueira, M.E., Vaz Patto, M.C., Rosário Bronze, M., 2021. Improvement of wheat cookies' nutritional quality, by partial substitution with common bean and maize flours, sustained human glycemia and enhanced satiety perception. *Cereal Chem* 98, 1123–1134. <https://doi.org/10.1002/cche.10460>

- Mejía-Terán, A., Blanco-Lizarazo, C.M., Leiva Mateus, E., Sotelo-Díaz, I., 2024a. Techno-functional and physicochemical properties of corn flours as potential food ingredients. *Applied Food Research* 4. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2024.100427>
- Mejía-Terán, A., Blanco-Lizarazo, C.M., Leiva Mateus, J.E., Sotelo-Díaz, I., Mejía Terán, D., Geffroy, E., 2024b. Pretreatments and Particle Size on the Glycemic Index and Rheological and Functional Food Properties of Bean Flours. *Int J Food Sci* 2024. <https://doi.org/10.1155/2024/6336837>
- Monnet, A.F., Laleg, K., Michon, C., Micard, V., 2019. Legume enriched cereal products: A generic approach derived from material science to predict their structuring by the process and their final properties. *Trends Food Sci Technol* 86, 131–143. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.027>
- Mori, H., Takaya, M., Nishimura, K., Goto, T., 2020. Breed and feed affect amino acid contents of egg yolk and eggshell color in chickens. *Poult Sci* 99, 172–178. <https://doi.org/10.3382/ps/pez557>
- Ndagire, C.T., Muyonga, J.H., Manju, R., Nakimbugwe, D., 2015. Optimized formulation and processing protocol for a supplementary bean-based composite flour. *Food Sci Nutr* 3, 527–538. <https://doi.org/10.1002/fsn3.244>
- Ovando-Martínez, M., Osorio-Díaz, P., Whitney, K., Bello-Pérez, L.A., Simsek, S., 2011. Effect of the cooking on physicochemical and starch digestibility properties of two varieties of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) grown under different water regimes. *Food Chem* 129, 358–365. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.04.084>
- Ramírez-Jiménez, A.K., Reynoso-Camacho, R., Mendoza-Díaz, S., Loarca-Piña, G., 2014. Functional and technological potential of dehydrated *Phaseolus vulgaris* L. flours. *Food Chem* 161, 254–260. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.04.008>
- Rico, D., Cano, A.B., Martín-Diana, A.B., 2021. Pulse-cereal blend extrusion for improving the antioxidant properties of a gluten-free flour. *Molecules* 26. <https://doi.org/10.3390/molecules26185578>
- Salazar, D., Rodas, M., Arancibia, M., 2020. Production of tortillas from nixtamalized corn flour enriched with Andean crops flours: Faba-bean (*Vicia faba*) and white-bean (*Phaseolus vulgaris*). *Emir J Food Agric* 32, 731–738. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2020.v32.i10.2179>
- Senarathna, S., Mel, R., Malalgoda, M., 2024. Utilization of cereal-based protein ingredients in food applications. *J Cereal Sci*. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2024.103867>

- Shen, Y., Li, Y., 2021. Acylation modification and/or guar gum conjugation enhanced functional properties of pea protein isolate. *Food Hydrocoll* 117. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106686>
- Sparvoli, F., Giofré, S., Cominelli, E., Avite, E., Giuberti, G., Luongo, D., Gatti, E., Cianciabella, M., Daniele, G.M., Rossi, M., Predieri, S., 2021. Sensory characteristics and nutritional quality of food products made with a biofortified and lectin free common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) flour. *Nutrients* 13. <https://doi.org/10.3390/nu13124517>
- Sparvoli, F., Laureati, M., Pilu, R., Pagliarini, E., Toschi, I., Giuberti, G., Fortunati, P., Daminati, M.G., Cominelli, E., Bollini, R., 2016. Exploitation of common bean flours with low antinutrient content for making nutritionally enhanced cookies. *Front Plant Sci* 7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00928>
- U.S. Department of Agriculture, 2020. Dietary Guidelines for Americans Make Every Bite Count With the Dietary Guidelines.
- West, C.E., Renz, H., Jenmalm, M.C., Kozyrskyj, A.L., Allen, K.J., Vuillermin, P., Prescott, S.L., MacKay, C., Salminen, S., Wong, G., Sinn, J., Stokholm, J., Bisgaard, H., Pawankar, R., Noakes, P., Kesper, D., Tulic, M., 2015. The gut microbiota and inflammatory noncommunicable diseases: Associations and potentials for gut microbiota therapies. *Journal of Allergy and Clinical Immunology* 135, 3–13. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jaci.2014.11.012>
- Yang, C., Zhong, F., Douglas Goff, H., Li, Y., 2019. Study on starch-protein interactions and their effects on physicochemical and digestible properties of the blends. *Food Chem* 280, 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.12.028>
- Yang, L., Wang, S., Zhang, W., Zhang, H., Guo, L., Zheng, S., Du, C., 2022. Effect of black soybean flour particle size on the nutritional, texture and physicochemical characteristics of cookies. *LWT* 164. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113649>
- Yu, W., Zou, W., Dhital, S., Wu, P., Gidley, M.J., Fox, G.P., Gilbert, R.G., 2018. The adsorption of α -amylase on barley proteins affects the in vitro digestion of starch in barley flour. *Food Chem* 241, 493–501. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.09.021>

Discusión global

En la actualidad la salud, la nutrición y la sostenibilidad están cada vez más interconectadas. Este proyecto de tesis abordó el diseño de un alimento funcional de bajo índice glicémico a base de maíz y frijol, dos materias primas de alta relevancia cultural y económica en la dieta latinoamericana, que tienen el potencial de ofrecer beneficios adicionales para la salud más allá de la nutrición básica. Bajo este contexto, a continuación, se discuten los principales hallazgos y su relevancia en relación con los objetivos propuestos.

Esta investigación evidenció que las propiedades funcionales, como el bajo índice glicémico, son el resultado de una sinergia de varios factores. Entre ellos se encuentran el pretratamiento, las variables del proceso (como temperatura y tiempo), así como los fenómenos que ocurren durante el procesamiento y la interacción de las macromoléculas. Por su parte, el fraccionamiento de la harina de frijol fue determinante para modular la digestibilidad del almidón. Se demostró que, a mayor diámetro de partícula se pueden obtener productos con un menor índice glicémico, lo que representa una tecnología transferible de bajo costo que le permite al sector de transformación responder a las necesidades del consumo. En contraste, el diámetro de partícula no mostró un efecto significativo en el índice glicémico del maíz. Esto podría deberse a que la diferencia en el diámetro de partícula en esta harina no fue lo suficientemente significativa como para afectar la digestibilidad del almidón.

Se observó que, a pesar de los diferentes pretratamientos, la harina de frijol presentó una menor tasa de digestibilidad del almidón en comparación con la harina de maíz crudo. Este comportamiento puede explicarse a la luz de hallazgos previos de diferentes autores, como Biliaderis (1991), quien señala que los almidones de cereales, como el maíz, exhiben un patrón de difracción de tipo A, lo que los hace más digeribles. En contraste, los almidones de leguminosas, como el frijol, presentan un patrón de difracción tipo C, lo que genera una mayor resistencia a la hidrólisis por parte de las enzimas digestivas. Esto pone de manifiesto que las propiedades funcionales de los productos son resultado de la naturaleza física y química de las materias primas utilizadas.

Asimismo, la tasa de digestibilidad del almidón puede verse afectada por la sinergia entre los componentes, especialmente entre almidón y proteína. La harina de frijol presentó una mayor fracción de proteína endógena, alrededor del 22%, en comparación con el maíz, que tuvo una fracción de 7,3%. Esta diferencia en contenido proteico pudo generar interacciones entre los

sustratos macromoleculares. La proteína insoluble en agua puede unirse a las enzimas amilolíticas, mientras que su matriz puede envolver las redes de almidón, dificultando así la gelatinización y limitando la acción enzimática.

El análisis sobre el potencial bioactivo de las harinas de frijol identificó compuestos fenólicos, como catequina, epicatequina y quercetina, en todos los pretratamientos y se demostró que estos compuestos son resistentes a temperaturas de horneado de 180 °C durante 15 minutos, dado que también se encontraron en el prototipo de galleta. Además, se observó que la temperatura influye en la estructura de los compuestos fenólicos, potenciando su actividad biológica, especialmente en el pretratamiento RCD3, que mostró las mayores concentraciones de flavonoides probablemente debido a la ruptura de paredes celulares durante la deshidratación a 120 °C. Aunque este pretratamiento fue descartado por su mayor índice glicémico, resalta las ventajas y un potencial uso de la harina de frijol por su contenido bioactivo. Además, en el prototipo de galletas se detectaron ácidos fenólicos, como el ácido carnósico y el ácido cafeico, que no habían sido identificados previamente, lo que demuestra la importancia de las condiciones de procesamiento en la modulación del índice glicémico y las propiedades bioactivas.

Por otro lado, a diferencia de otros estudios que consideran al maíz como un alimento de alto índice glicémico, se demostró que la harina contiene una alta fracción de almidón resistente, y que se clasificó como un alimento de bajo índice glicémico. Este hallazgo sugiere que la hidrólisis del almidón en el maíz está influenciada por varios factores, incluyendo el tipo de molienda y las condiciones de tratamiento, procesos como la cocción, puede convertir el maíz en un alimento de alto índice glicémico. Esto ha sido respaldado por investigaciones de autores como Caballero-Rothar et al. (2022), Lal et al. (2021) y Singh et al. (2020). Así, la harina de maíz se presenta como un ingrediente alimentario prometedor, con propiedades funcionales que la convierten en un candidato ideal para aplicaciones en la industria alimentaria. Es particularmente adecuada para la fabricación de productos enfocados en la salud, que requieren alta solubilidad en agua y mayor capacidad de emulsión, así como una mejor retención de agua en comparación con las harinas convencionales.

Asimismo, la transformación de las semillas de frijol y el grano de maíz en harinas amplía su rango de aplicación y estimula el consumo, mejorando la calidad nutricional de diversos productos alimenticios procesados. Esto se traduce en ventajas como un mayor tiempo de conservación, propiedades organolépticas deseables y mejoramiento en la calidad nutricional,

funcional y de propiedades bioactivas, además de facilitar las condiciones de manipulación, almacenamiento y transporte.

Esta investigación demostró que sustituir harinas de maíz por harinas de frijol en el diseño de alimentos modificó las propiedades fisicoquímicas, aumentando la retención de agua, pero reduciendo el índice de gelificación y capacidad de emulsificación, no obstante fue favorable en la modulación de la digestibilidad del almidón mostrando en el prototipo una relación inversa con el porcentaje de incorporación de harina de frijol, clasificándolo como un alimento de bajo índice glicémico, en contraste con el prototipo de trigo que se clasificó de alto índice glicémico. Además, la inclusión de harinas de frijol mejoró la composición nutricional, elevando los niveles de proteínas, aminoácidos y compuestos fenólicos. Estos hallazgos confirman la hipótesis respecto a que una matriz alimentaria con base maíz y frijol por la interacción de sus componentes, conservó las propiedades funcionales respecto a la tasa de digestibilidad y en consecuencia se redujo el índice glicémico, sin comprometer las propiedades sensoriales y texturales del producto final.

Al cumplir con los objetivos propuestos, este trabajo proporciona una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones industriales que pueden contribuir a la mejora de la salud pública y a la seguridad alimentaria, particularmente en regiones como Colombia, donde estos cultivos hacen parte de la dieta básica. El diseño de productos alimentarios que sean tanto saludables como culturalmente relevantes es esencial para abordar los desafíos globales de salud y nutrición, esta tesis ofrece un ejemplo concreto de cómo se puede lograr este objetivo mediante la innovación con el uso de ingredientes tradicionales, para la obtención de un alimento de bajo índice glicémico, libre de gluten y con un valor nutricional agregado, promoviendo así mejores hábitos alimenticios.

Conclusiones globales

Esta investigación demostró que, desde una perspectiva holística y científica, una matriz alimentaria formulada a partir de maíz y frijol puede generar una interacción adecuada de sus componentes, preservando las propiedades nutricionales y tecno-funcionales de las materias primas. Se logró obtener un alimento con un bajo índice glicémico, que presentó propiedades bioactivas, nutricionales y sensoriales óptimas para el consumo.

El uso de cereales enriquecidos con leguminosas provenientes de materias primas regionales representa una alternativa prometedora para el diseño de alimentos de bajo índice glicémico. Esta estrategia no solo fomenta hábitos alimentarios saludables al aumentar el consumo de leguminosas, sino que también contribuye a la promoción de la salud pública. Al promover la calidad alimentaria de las poblaciones menos favorecidas, este enfoque está en línea con los principios del desarrollo sostenible.

Recomendaciones

Por otra parte, se recomienda:

Las investigaciones futuras sobre el diseño de un alimento funcional podrían evaluar las interacciones que se generan con otros componentes como fibras, lípidos y compuestos bioactivos, también se debe considerar evaluar la vida útil de los alimentos y determinar el valor biológico.

Estudios futuros pueden beneficiarse de la combinación de las técnicas de digestión *in vitro* de almidón utilizadas en el presente estudio, con enfoques de modelado entre ellos ensayos *in vivo*.

Las futuras investigaciones sobre esta área podrían centrarse en el diseño de nuevos productos alimenticios a base de fracciones de harina de frijol y maíz con propiedades nutricionales funcionales.

Extender la presente investigación a una segunda fase, mediante la implementación de una línea o procesos de transferencia tecnológica en zonas productoras de maíz y frijol. Iniciativa que permitirá que los productores apliquen los resultados obtenidos, con el uso de prácticas locales orientando una producción diversificada y con generación de valor agregado diferenciado. Al aunar esfuerzos, se promoverá el desarrollo sostenible del territorio, a través de la apropiación social del conocimiento, respondiendo de manera asertiva a las necesidades alimentarias de la comunidad.

Referencias

- Augustin, L. S. A., Kendall, C. W. C., Jenkins, D. J. A., Willett, W. C., Astrup, A., Barclay, A. W., Björck, I., Brand-Miller, J. C., Brighenti, F., Buyken, A. E., Ceriello, A., La Vecchia, C., Livesey, G., Liu, S., Riccardi, G., Rizkalla, S. W., Sievenpiper, J. L., Trichopoulou, A., Wolever, T. M. S., ... Poli, A. (2015). Glycemic index, glycemic load and glycemic response: An International Scientific Consensus Summit from the International Carbohydrate Quality Consortium (ICQC). *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 25(9), 795–815. <https://doi.org/10.1016/j.numecd.2015.05.005>
- Amaya, J.B. (2019). Estudio de la dosificación del almidón extraído del banano en un polímero de tipo termoplástico», *Rev. Colomb. Quim.*, 48(1), 43–51. <http://dx.doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v48n1.74469>
- Bessada, S. M. F., Barreira, J. C. M., & Oliveira, M. B. P. P. (2019). Pulses and food security: Dietary protein, digestibility, bioactive and functional properties. *Trends in Food Science and Technology*, 93, 53–68. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.08.022>
- Chávez-Murillo, C. E., Veyna-Torres, J. I., Cavazos-Tamez, L. M., de la Rosa-Millán, J., & Serna-Saldívar, S. O. (2018). Physicochemical characteristics, ATR-FTIR molecular interactions and in vitro starch and protein digestion of thermally-treated whole pulse flours. *Food Research International*, 105, 371-383. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.11.029>
- Choe, U., Osorno, J. M., Ohm, J. B., Chen, B., & Rao, J. (2022). Modification of physicochemical, functional properties, and digestibility of macronutrients in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) flours by different thermally treated whole seeds. *Food Chemistry*, 382, 132570. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132570>
- Fernandes, J. M., Madalena, D. A., Vicente, A. A., & Pinheiro, A. C. (2021). Influence of the addition of different ingredients on the bioaccessibility of glucose released from rice during dynamic in vitro gastrointestinal digestion. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 72(1), 45–56. <https://doi.org/10.1080/09637486.2020.1763926>
- Guo, P., Yu, J., Wang, S., Wang, S., & Copeland, L. (2018). Effects of particle size and water content during cooking on the physicochemical properties and in vitro starch digestibility of milled durum wheat grains. *Food Hydrocolloids*, 77, 445-453. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.10.021>

- Kamalasundari, S., Babu, R., & Umamaheswari, T. (2019). Effect of domestic processing methods on anti-nutritional factors and its impact on the bio-availability proteins and starch in commonly consumed whole legumes. *Asian Journal of Dairy and Food Research*, 38, 67-72. <https://doi.org/10.18805/ajdfr.dr-1410>
- Mann, J., Cummings, J. H., Englyst, H. N., Key, T., Liu, S., Riccardi, G., Summerbell, C., Uauy, R., van Dam, R. M., Venn, B., Vorster, H. H., & Wiseman, M. (2007). FAO/WHO Scientific Update on carbohydrates in human nutrition: Conclusions. *European Journal of Clinical Nutrition*, 61, S132–S137. <https://doi.org/10.1038/sj.ejcn.1602943>
- MinSalud. (2015). *Encuesta Nacional de la Situación Nutricional en Colombia 2015 - ENSIN*.
- Mondal, D., Awana, M., Mandal, S., Pandit, K., Singh, A., Syeunda, C. O., Thandapilly, S. J., & Krishnan, V. (2024). Functional foods with a tailored glycemic response based on food matrix and its interactions: Can it be a reality? *Food Chemistry: X*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101358>
- Naiker, T. S., Baijnath, H., Amonsou, E. O., & Mellem, J. J. (2020). The effect of soaking, steaming, and dehydration on the microstructure, physicochemical properties and in vitro starch digestibility of flour produced from *Lablab purpureus* (L.) Sweet (hyacinth bean). *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(5), e14430. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14430>
- Obadi, M., Li, C., Li, Q., Li, X., Qi, Y., & Xu, B. (2020). Relationship between starch fine molecular structures and cooked wheat starch digestibility. *Journal of Cereal Science*, 95, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.103047>
- Pellegrini, N., Vittadini, E., & Fogliano, V. (2020). Designing food structure to slow down digestion in starch-rich products. *Current Opinion in Food Science*, 32, 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.01.010>
- Polanco Puerta, M. F., Mejía Terán, A. L., & Prada, Y. (2023). Frijol UNAD DOSQ – ZANDÚ, nueva variedad de frijol arbustiva para el clima medio y frío moderado. *Notas De Campus*, 1, 4–18. <https://doi.org/https://doi.org/10.22490/notas.6002>
- Roasa, J., De Villa, R., Mine, Y., & Tsao, R. (2021a). Phenolics of cereal, pulse and oilseed processing by-products and potential effects of solid-state fermentation on their bioaccessibility, bioavailability and health benefits: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 116, 954–974. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.08.027>

- Rosa-Millán, J. De, Heredia-olea, E., Perez-carrillo, E., Guajardo-flores, D., Román, S., & Serna-saldívar, O. (2019). Effect of decortication, germination and extrusion on physicochemical and in vitro protein and starch digestion characteristics of black beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *LWT - Food Science and Technology*, 102, 330–337. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.12.039>
- Tas, A. A., & Shah, A. U. (2021). The replacement of cereals by legumes in extruded snack foods: Science, technology and challenges. *Trends in Food Science and Technology*, 116, 701-711. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.08.016>
- Tian, Y., Li, M., Liu, X., Jane, J., Guo, B., & Dhital, S. (2021). Storage temperature and time affect the enzyme resistance starch and glycemic response of cooked noodles. *Food Chemistry*, 344. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128702>
- Yang, C., Zhong, F., Goff, H. D., & Li, Y. (2019). Study on starch-protein interactions and their effects on physicochemical and digestible properties of the blends. *Food chemistry*, 280, 51-58. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.12.028>

Anexos

Anexo 1. Artículo publicado.

Mejía Terán, A., & Blanco-Lizarazo, C. M. (2021). Considerations for functional food design based on starch-protein interactions: a systematic review. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 72(8), 1009-1018. <https://doi.org/10.1080/09637486.2021.1905784>

The screenshot shows the Taylor & Francis Online interface. At the top, there is a navigation bar with the journal title 'International Journal of Food Sciences and Nutrition' and the issue information 'Volume 72, Issue 8'. Below this, the article title 'Considerations for functional food design based on starch-protein interactions: a systematic review' is prominently displayed. The authors 'Adriana Mejía Terán & Carla María Blanco-Lizarazo' are listed below the title. The article is categorized as a 'Comprehensive review'. On the left side, there are statistics: 731 Views, 3 CrossRef citations to date, and 1 Altmetric. Below the article title, there are several buttons for 'Full Article', 'Figures & data', 'References', 'Citations', 'Metrics', 'Reprints & Permissions', and 'Read this article'. The article's DOI is also provided.

Sample our
Food Science & Technology
Journals
-> Sign in here to start your access
to the latest two volumes for 14 days

Abstract

This systematic review aims to discuss the considerations in the design of starch-based foods from protein interactions, according to their functional, technological, and nutritional effects. Thereof, a systematic search for articles published in English, without excluding material by year, location, or author. Scopus and PubMed were the databases consulted. The results showed a decrease in gelatinisation, gelation, and viscosity of food matrices and a reduction in hydrolysis and starch digestibility rate by adding protein. Furthermore, found effects from other components such as phenolic compounds. In conclusion, in food design, protein interaction can modulate the starch digestibility rate, which also modifies technological, structural, and nutritional properties, depending on the physicochemical nature of ingredients, the percentage of protein incorporation, and processing conditions.

Q Keywords: Digestibility resistant starch polysaccharide digestion food matrix

Ethical statements

This review is exempt because no human participant was recruited.

Disclosure statement

Anexo 2. Artículo publicado






Mejía-Terán, A., Blanco-Lizarazo, C. M., Leiva Mateus, J. E., Sotelo-Díaz, I., Mejía Terán, D., & Geffroy, E. (2024). Pretreatments and Particle Size on the Glycemic Index and Rheological and Functional Food Properties of Bean Flours. *International Journal of Food Science*, 2024. <https://doi.org/10.1155/2024/6336837>

Hindawi
International Journal of Food Science
Volume 2024, Article ID 6336837, 14 pages
<https://doi.org/10.1155/2024/6336837>



Research Article

Pretreatments and Particle Size on the Glycemic Index and Rheological and Functional Food Properties of Bean Flours

Adriana Mejía-Terán ^{1,2}, Carla María Blanco-Lizarazo ³, Jairo Eduardo Leiva Mateus ⁴,
Indira Sotelo-Díaz ⁵, Darío Mejía Terán ⁶, and Enrique Geffroy⁴

¹Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE), Instituto Tecnológico de Costa Rica, Universidad Nacional, Universidad Estatal a Distancia, San Jose, Costa Rica

²Grupo Interinstitucional de Investigación en Ciencias Agropecuarias, Forestales y Agroindustriales del Trópico, Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Bogotá, Colombia

³Centro de investigación y desarrollo cárnico CI+D, Industria de Alimentos Zenú, Medellín, Colombia

⁴Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad de México, CDMX 4510, Mexico

⁵Grupo de Alimentación, Gestión de Procesos y Servicio, Universidad de La Sabana, Chia, Colombia

⁶Grupo de Estudios Ambientales Aplicados, Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Bogotá, Colombia

Correspondence should be addressed to Carla María Blanco-Lizarazo; cmblanco@zenu.com.co

Received 26 December 2023; Revised 9 April 2024; Accepted 2 May 2024; Published 20 May 2024

Academic Editor: Mattia Spano

Copyright © 2024 Adriana Mejía-Terán et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The beans' protein and slow-digesting carbohydrate content make it an appealing choice for healthy food development. However, its properties are influenced by the flour extraction processes. This study is aimed at evaluating the effect of particle size and three pretreatments—drying (D), soaking + cooking + dehydrating 3 h (SCD3), and soaking + cooking + dehydrating 24 h (SCD24)—on the estimated glycemic index (eGI) compared with raw bean flour (R). The methodology covered water absorption (WAI), water solubility (WSI), amylose content, starch digestibility, eGI, phenolic quantification, and rheology. The results showed that WAI correlated negatively with WSI and amylose, varying among pretreatments and sizes. WAI increased as $D < SCD24 < SCD3 < R$. Glucose release (HI) differed between fine (125 μm) and coarse fractions (242 μm), with SCD24 and R showing the lowest eGI (22.8–24.2). SCD3 had the highest flavonoid concentration, while R and D had more quercetin-3-glucoside. SCD24 displayed higher elastic/viscous moduli than R. Bean flours from all treatments had low GI and contained bioactive polyphenols (catechin, epicatechin, ferulic acid, quercetin). The optimal treatment was SCD24, particularly in the coarse fraction, showing potential for functional food development and novel applications such as precision nutrition.

Anexo 3. Artículo publicado.

Mejía-Terán, A., Blanco-Lizarazo, C. M., Leiva Mateus, E., & Sotelo-Díaz, I. (2024). Techno-functional and physicochemical properties of corn flours as potential food ingredients. *Applied Food Research*, 4(1). <https://doi.org/10.1016/j.afres.2024.100427>



Techno-functional and physicochemical properties of corn flours as potential food ingredients

Adriana Mejía-Terán^{a,b}, Carla María Blanco-Lizarazo^{c,*}, Eduardo Leiva Mateus^d, Indira Sotelo-Díaz^e

^a Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE), Instituto Tecnológico de Costa Rica, Universidad Nacional, Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica

^b Grupo Interinstitucional de Investigación en Ciencias Agropecuarias, Forestales y Agroindustriales del Trópico, Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Bogotá, Colombia

^c Centro de investigación y desarrollo cárnico CI+D, Industria de Alimentos Zenú, Medellín, Colombia

^d Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM), Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México

^e Grupo de Alimentación, Gestión de Procesos y Servicio, Universidad de La Sabana, Chía, Colombia

ARTICLE INFO

Keywords:

Techno-functional assessment
In vitro digestion
Gluten-free flours
Rheological properties

ABSTRACT

Background and Objectives: corn plays a crucial role in food security and nutrition. This study aimed to assess the impact of three corn cultivars (Advanta, Leptra, and Porva) and varying particle sizes of flours on estimated glycemic index (eGI), techno-functional properties, and rheological behaviors, crucial in defining their technological properties.

Findings: WAI and WSI presented differences among particle sizes for Advanta and Leptra corn flours, whereas Porva flour displayed consistent results regardless of particle sizes. Notably, while Advanta and Leptra did not showed differences in eGI and its fractions, Advanta (174.4 μm) demonstrated the lowest eGI at 32.21, alongside higher water-holding capacity (WHC) compared to wheat flours. Further findings included an initial Emulsification Activity Index (EAI) of 40.55 m^2/g and a minimum gelation concentration (LGC) of 12 %. Additionally, rheological characterization indicated a non-Newtonian and pseudoplastic behavior.

Conclusions: this study presented a corn flour with high resistant starch content and low glycemic index with functional properties that could be applied to manufacture healthy food requiring high water solubility, greater emulsification capacity, and water retention capacity greater than conventional flours.

Significance and Novelty: the study on intrinsic and extrinsic factors that can modulate the glycemic index of corn becomes crucial. This exploration holds the potential to design healthy commercially viable products.

Anexo 4. Artículo finalizado, versión en idioma inglés en proceso de sometimiento.

Mejía Terán, A., & Blanco-Lizarazo, C. M. (2024). Design of a low glycemic index functional food from bean and corn composite flours based on their techno-functional properties

Design of a low glycemic index functional food from bean and corn composite flours based on their techno-functional properties

Adriana Mejía-Terán^{1,2}, Carla María Blanco-Lizarazo^{3*}

¹Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE), Instituto Tecnológico de Costa Rica, Universidad Nacional, Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica.

²Grupo Interinstitucional de Investigación en Ciencias Agropecuarias, Forestales y Agroindustriales del Trópico, Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Bogotá, Colombia.

³Centro de investigación y desarrollo cárnico CI+D, Industria de Alimentos Zenú, Medellín, Colombia.

*Corresponding author: cmblanco@zenu.com.co

Authors ORCID:

Mejía-Terán, Adriana: 0000-0002-9044-7548

Blanco-Lizarazo, Carla María: 0000-0002-6463-3056

Abstract

The aim of this study was to evaluate the techno-functional characteristics of composite flours made from Advanta corn and UNAD-dos Zandú bean to design a low glycemic index product. The composite flours were formulated by replacing corn flour with 15% (C:B15), 30% (C:B30), 45% (C:B45), and 60% (C:B60) bean flour. Controls included corn (C) and wheat (W) flours. Water-holding capacity, emulsifying activity, and least gelation concentration were analyzed to select cookies as the matrix. The cookies' estimated glycemic index (eGI), amino acids, phenolic compounds, sensory profile, and texture were assessed. All four corn-based cookies qualified as low-GI foods. However, C:B45 and C:B60 had higher proportions of arginine, lysine, and phenolic compounds. These two prototypes also exhibited higher hardness compared to C, though their sensory profiles were comparable to the controls. In conclusion, a low glycemic index cookie with enhanced nutritional properties was successfully developed.

Keywords: gluten-free, product design, functional food, technological properties.

Anexo 5. Eventos y socialización de resultados. Ponencia oral

Mejía Terán, A., y Polanco Puerta, M., (2021). *Estudio funcional y caracterización fisicoquímica de frijol variedad UNAD-DOS ZANDU para ser incorporado en una matriz alimentaria* [Ponencia oral]. II Simposio Internacional y V Simposio Nacional de Desarrollo Rural, Agroecología y Sostenibilidad: Agroecología y Sostenibilidad: Movimientos Sociales para la consolidación de la Soberanía Alimentaria. Bogotá, Colombia.



The certificate features a yellow and orange decorative background. At the top right, there are logos for UNAD (Universidad Nacional Abierta y a Distancia) and its 45th anniversary. The main text is in orange and black, certifying the participation of Adriana Luzely Mejía Terán from UNAD. It mentions her participation in the II International Symposium and V National Symposium on Rural Development, Agroecology, and Sustainability, specifically for her oral presentation on the functional and physicochemical characterization of the UNAD-DOS ZANDU bean variety. Below the text, there are three signatures and names: Juliaiba Ángel Osorio (Vicerrectora VIDER), Alba Luz Serrano Rubiano (Decano ECJP), and Jordano Salamanca Bastidas (Decano ECAPMA). A QR code is located in the bottom right corner. A small photo of a woman holding yellow beans is on the left side.

UNAD Universidad Nacional Abierta y a Distancia 45 AÑOS

La Vicerrectoría de Inclusión Social para el Desarrollo Regional y Proyección Comunitaria VIDER, la Escuela de Ciencias Jurídicas y Políticas ECJP y la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente ECAPMA, certifica que:

Adriana Luzely Mejía Terán
UNAD

Participó del **II Simposio Internacional y V Simposio Nacional de Desarrollo Rural, Agroecología y Sostenibilidad: Movimientos Sociales para la Consolidación de la Soberanía Alimentaria**, con la ponencia: **Estudio funcional y caracterización fisicoquímica de frijol variedad UNAD-DOS ZANDU para ser incorporado en una matriz alimentaria**


Julialba Ángel Osorio
Vicerrectora VIDER


Alba Luz Serrano Rubiano
Decano ECJP


Jordano Salamanca Bastidas
Decano ECAPMA

Dado en Bogotá, el 14 de mayo de 2021



Libro de Memorias

Vinasco Guzmán, M. C., Cabrera Otálora, M. I., Montenegro Gómez, S. P. ., & Méndez Pedroza, N. M. . (2021). II Simposio Internacional y V Simposio Nacional de Desarrollo Rural, Agroecología y Sostenibilidad: Agroecología y Sostenibilidad: Movimientos Sociales para la consolidación de la Soberanía Alimentaria. *Memorias*, 1-262.

<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/memorias/article/view/5491>

Anexo 6. Eventos y socialización de resultados. Ponencia oral

Mejía Terán, A., y Polanco Puerta, M., (2022). *Frijol UNAD-dos Zandu, ingrediente alternativo para el Desarrollo de alimentos de bajo índice glucémico* [Ponencia oral]. Congreso Internacional de Ciencias Agrarias y Ambientales. "Una mirada integral a la Seguridad Alimentaria en el contexto mundial. Bogotá, Colombia.

IV Congreso Internacional de Ciencias Agrarias y Ambientales
"Una mirada integral a la Seguridad Alimentaria en el contexto mundial"
CICAA 2022 9, 10 y 11 de Noviembre de 2022
Bogotá, Colombia.



La Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

Certifica la participación de Adriana Mejía Terán

CC No. 27.087.427

Como ponente del trabajo titulado **FRIJOL UNAD-DOS ZANDU, INGREDIENTE ALTERNATIVO PARA EL DESARROLLO DE ALIMENTOS DE BAJO ÍNDICE GLUCÉMICO**

En el marco del IV Congreso Internacional de Ciencias Agrarias y Ambientales
"Una mirada integral a la Seguridad Alimentaria en el contexto mundial"

9, 10 y 11 de noviembre de 2022, Bogotá, Colombia

Jordano Salamanca Bastidas

Decano Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

