

Desarrollo y evaluación de un panque con base en harina de sorgo blanco variedad rb-paloma

Development and evaluation of a pancake based on white sorghum flour variety rb-paloma

Juan José Figueroa González

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Zacatecas (México)

Guadalupe Rodríguez Castillejos*

Universidad Autónoma de Tamaulipas. Unidad Académica Multidisciplinaria Reynosa-Aztlán (México)

Simón Josías Téllez Luis

Universidad Autónoma de Tamaulipas. Unidad Académica Multidisciplinaria Reynosa-Rodhe (México)

Gonzalo Velázquez de la Cruz

Instituto Politécnico Nacional, CICATA Unidad Querétaro (México)

Blanca Isabel Sánchez Toledano

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Zacatecas (México)

Edgar Ledezma Orozco

Universidad Autónoma de Tamaulipas. Unidad Académica Multidisciplinaria Reynosa-Aztlán (México)

Ana Karen Rocha Olvera

Universidad Autónoma de Tamaulipas. Unidad Académica Multidisciplinaria Reynosa-Aztlán (México)

Recibido: 06 de marzo de 2025

Aceptado: 28 de enero de 2026

Publicado: 25 de septiembre de 2026

Resumen

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la goma xantana (GX) y la enzima transglutaminasa microbiana (MTG) en las propiedades físicas, de textura y proximales de un panqué a base de con harina de sorgo. Se elaboró un panqué de sorgo grano blanco variedad RB-Paloma, usando goma xantana

*Email: gcastillejos@docentes.uat.edu.mx



y transglutaminasa microbiana en concentraciones de 0/0 %, 0.25/0.25 % y 0.5/0.5 % de GX/MTG, respectivamente. La composición proximal encontrada, fue diferente en las formulaciones diseñadas. El volumen y peso se incrementaron conforme aumentó la concentración de GX y MTG. De igual manera, el perfil de textura mejoró conforme con la presencia de dichos aditivos. El uso de hidrocoloides como la GX y enzimas como la MTG pueden mejorar las características del panqué de sorgo.

Palabras clave: textura; panqué; Sorghum bicolor; goma xantana; transglutaminasa.

Abstract

The objective of this work was to evaluate the effect of xanthan gum (GX) and microbial transglutaminase enzyme (MTG) on the physical, textural and proximate properties of a sorghum flour-based bread. A white grain sorghum bread, RB-Paloma variety, was prepared using xanthan gum and microbial transglutaminase at concentrations of 0/0 %, 0.25/0.25 % and 0.5/0.5 % of GX/MTG, respectively. The proximate composition found, was different in the designed formulations. The volume and weight increased as the concentration of GX and MTG increased. Similarly, the texture profile improved with the presence of these additives. The use of hydrocolloids such as GX and enzymes such as MTG can improve the characteristics of sorghum bread.

Keywords: texture; bread; Sorghum bicolor; xanthan gum; transglutaminase.

Introducción

El sorgo es el quinto cereal más importante a nivel mundial, con respecto a la producción, y es ampliamente consumido en África y Asia (Rumler *et al.*, 2022); este cultivo presenta diversos usos tales como alimento para humanos (grano), alimento para animales (grano y biomasa), producción de bioetanol y jarabes (Ndlovu *et al.*, 2021). Aunque la ausencia de gluten hace que el sorgo sea un cereal de elección en la dieta de las personas intolerantes o alérgicos al gluten, también conduce a reológicas no deseadas tanto de la masa como en el pan (Jafari *et al.*, 2017); debido a las escasas propiedades viscoelásticas de la masa, atribuidas a la kafirina hidrofóbica, en contraste con las proteínas que se produce con el gluten (gluteninas y gliadinas), presentes en el trigo centeno o el triticale (Dube *et al.*, 2020). A pesar de esto, el pan sin gluten a base de sorgo representa una opción atractiva para mantener la calidad de vida de los pacientes celíacos o alérgicos a dicha proteínas (Honda *et al.*, 2021). Las técnicas de diagnóstico han evolucionado, por lo que actualmente pareciera haber un aumento de personas con celiaquía, se reporta que aproximadamente 2.9% de la población mundial es intolerante al gluten; por lo que la producción de panes libres de gluten tiene mayor demanda; sin embargo, las diferencias mencionadas en las proteínas conllevan a un reto en el mercado alimentario, que busca satisfacer al consumidor no solo en el sabor, sino la apariencia del producto. La falta de gluten tiene algunos efectos desagradables como mala textura, sabor, aroma, color y corta vida útil del pan; estas características pueden ser mejoradas con el uso de los hidrocoloides y/o enzimas (Motahar *et al.*, 2021). La variedad RB-Paloma se originó en el INIFAP Campo Experimental Valle de Culiacán, en Sinaloa, México; tiene como característica principal su alta tolerancia a hongos que afectan al sorgo y otros cereales. En cuanto a su composición nutricional destaca el contenido proteico superior al 10%, 3% de minerales, 7% de fibra; además, entre los aminoácidos destacan fenilalanina, triptófano, leucina, cistina, ácido glutámico (Monter *et al.*, 2012).

Los hidrocoloides tienen una amplia aplicación como aditivos alimentarios para mejorar la calidad de panes, pastas, entre otros alimentos; estos compuestos mejoran la capacidad de retención de CO₂ de la masa, aumenta la retención de agua y retardan la retrogradación del almidón aumentando la suavidad, el volumen específico y brillo del pan (Liu *et al.*, 2018; Ma *et al.*, 2022). La goma xantana (GX) es un polisacárido extracelular producido por *Xanthomonas campestris*; este no forma geles, pero su comportamiento pseudoplástico afecta las características reológicas de la masa sin gluten, imitando de esta manera las propiedades reológicas propias del gluten (Burešová *et al.*, 2016). La GX es resistente a la degradación enzimática y, además, confiere alta viscosidad (casi constante en un rango de pH y temperatura), mejora la masa del pan debido a la interacción entre la GX y las proteínas. Por otro lado, se ha reportado que aumenta la absorción de agua, mejora la capacidad de la masa para retener gas (aumentando así el volumen específico) y aumenta la actividad del agua de la miga (Matuda *et al.*, 2008).

Otra opción para mejorar las masas sin gluten son las enzimas como la transglutaminasa microbiana (MTG), es incluso utilizada en productos fermentados a base de harina de trigo como acondicionadores para promover redes de proteínas y mejorar sus características de calidad (Cao *et al.*, 2021). La MTG es responsable de la transferencia del grupo acilo, la desamidación y el entrecruzamiento de proteínas dentro o entre cadenas de glutamina (donante de grupo acilo) y restos peptídicos de lisina (aceptor de grupo acilo). Además, la enzima cataliza la adición de aminos libres a las proteínas uniéndose al residuo

de glutamina. También, en ausencia de amina libre, el agua se convierte en el aceptor del grupo acilo y los grupos γ -carboxamida se desamidán en residuos de ácido glutámico (Rodríguez Castillejos *et al.*, 2014; Fatima y Khare, 2018).

Tanto la GX como la MTG han sido utilizadas en la producción de pan, principalmente libre de gluten, con la finalidad de mejorar las propiedades reológicas, de textura, nutricionales e incluso sensoriales. El sorgo es un cereal poco consumido en México como alimento humano; sin embargo, es posible buscar alternativas que permitan dar valor agregado a este cereal e incrementar su consumo y rentabilidad. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la goma xantana y enzima transglutaminasa microbiana en las propiedades físicas, de textura y químico proximal del panqué producido con harina de sorgo.

1. Métodos, técnicas e instrumentos

El grano de sorgo blanco variedad RB-Paloma fue proporcionado por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Río Bravo, Tamaulipas, México. Se utilizó enzima transglutaminasa microbiana TG-EB3 (Shanghai Kinry Food Ingredients Co., Ltd, Shanghai, China) y goma xantana (Sigma Aldrich catálogo G1253) grado alimenticio.

1.1. Obtención de la harina de sorgo

El grano de sorgo se limpió, se lavó con agua potable y se secó en una estufa (Drying oven DHG-9145a, Lab Drying Equipment, Zhejiang, China) a $50 \pm 2^\circ\text{C}$ hasta alcanzar una humedad entre 12-13%. Posteriormente se molió en un molino de martillos (AZTECA No. 6, Tipo GP 100, Molinos Azteca, S. A. de C. V., Guadalupe, Nuevo León, México) con una criba de 0.4 mm y se tamizó con un tamiz de malla No. 80 (Manufacturers of Industrial and Commercial Supplies, St. Louis, MI, USA).

1.2. Formulación y producción del panqué de sorgo

Se realizaron nuevas formulaciones con dos diferentes concentraciones de GX y MTG, con la finalidad de evaluar el efecto de ambos aditivos en las propiedades fisicoquímicas del pan. Los ingredientes para la formulación del panqué de sorgo (PS) fueron pesados por separado, la GX (0.25 y 0.50%) y MTG (0.25 y 0.5%) se agregaron al final de la mezcla; posteriormente, esta se vació en el molde y se horneó en una estufa de gas a 250°C por 45 min. El PS se dejó reposar en el horno por 30 min, se desmoldó y empacó en bolsas con cierre hermético hasta su análisis. De acuerdo con la concentración de GX/MTG añadida se obtuvieron nueve formulaciones (PS1 a PS9), las cuales se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1

Formulación e ingredientes (%) utilizados en la producción de panqué de sorgo.

Ingrediente	Tratamientos								
	PS1	PS2	PS3	PS4	PS5	PS6	PS7	PS8	PS9
Harina de sorgo	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Azúcar	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Aceite vegetal	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Huevo	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Bicarbonato de sodio	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
Leche	23	23	23	23	23	23	23	23	23
Sal	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Vainilla	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
GX	0	0	0	0.25	0.25	0.25	0.5	0.5	0.5
MTG	0	0.25	0.5	0	0.25	0.5	0	0.25	0.5

Nota. PS, panqué de sorgo; PS, sorghum pound cake.

1.3. Análisis físicos

Para todas las formulaciones se determinó el volumen (cm^3) por el método de desplazamiento de semillas (Tan *et al.*, 2011); el volumen específico se obtuvo de la relación del volumen entre el peso del panqué (cm^3/g). Para calcular el índice de volumen se realizó un corte central y vertical del panqué, es decir, al centro de éste; la altura se tomó con un vernier en tres diferentes puntos (B, C y D), donde C es la altura del punto central del panqué y los puntos B y D son la altura del panqué 2.5 cm siempre hacia la izquierda o derecha del punto central (C) del panqué, respectivamente; la suma de las tres alturas se utilizó para calcular el índice de volumen (Turabi *et al.*, 2008). El color de la miga se determinó con el método de 5 x 5 (cinco puntos diferentes de la muestra por cinco repeticiones para cada punto), con un colorímetro (Minolta Chroma Meter CR 300) utilizando los términos de luminosidad (L^*), a^* y b^* de la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE). Los valores de a^* y b^* obtenidos se utilizaron para el cálculo de hue y croma (Gómez *et al.*, 2008).

1.4. Análisis químico proximal

En el caso del contenido proximal se utilizaron métodos validados por la Association of Official Analytical Chemists (AOAC por sus siglas en inglés). El contenido de humedad, cenizas, grasa y fibra cruda se determinó por los métodos descritos por la AOAC (1990); humedad por secado en estufa (44-15.02), cenizas por combustión (008-03.01), fibra cruda (32-10.01), proteína por método de Kjeldahl (46-13.01), grasas por Soxhlet (30-10.01).

1.5. Análisis de textura

Para el análisis de perfil de textura (TPA) se utilizó un Texturómetro (Stable Micro Systems Texturometer, Modelo TAXT2i, Viena Court, England, UK) de la siguiente manera: los panqués fueron cortados de la corteza retirando la costra y una vez retirada se procedió a cortar con un tubo de cobre con un diámetro de 1.27 cm obteniendo cortes uniformes. Se utilizó una sonda cilíndrica de aluminio de 50 mm (5 cm) de diámetro, para la prueba de doble compresión (TPA) para una penetración del 70 % de profundidad a una velocidad de 60 mm/min, con 5 s de retardo entre la primera y segunda compresión.

1.6. Análisis estadístico

Las formulaciones se replicaron tres veces y todas las determinaciones se realizaron por triplicado en cada una de ellas; se reporta la media y desviación estándar de cada parámetro. Se realizó a un ANOVA y comparación de medias por Tukey ($p \leq 0.05$) con el software SAS versión 9.4 (SAS Institute Inc., NC, EE. UU.).

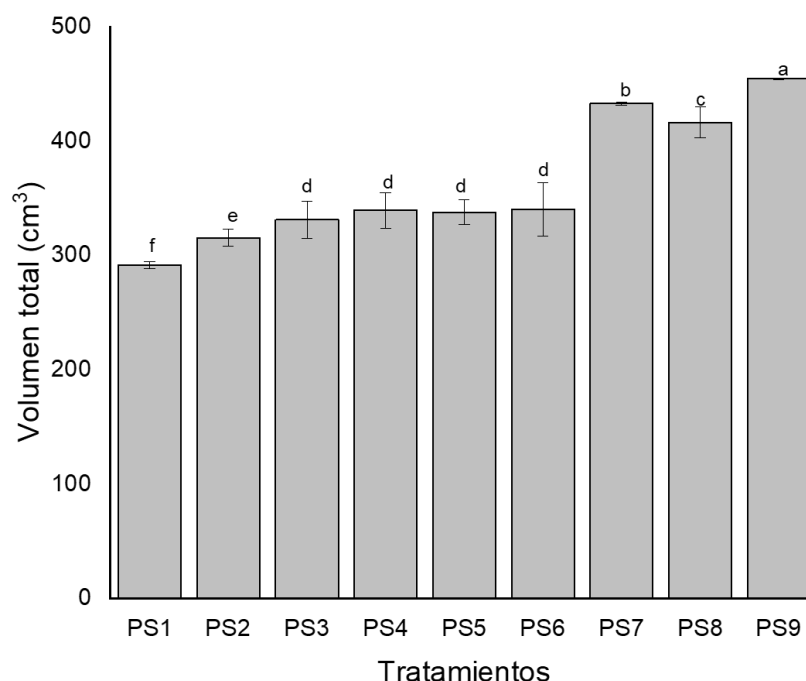
2. Resultados y discusión

2.1 Análisis físico del panqué de sorgo

El volumen total, volumen específico, índice de volumen y peso del panqué de sorgo son características físicas relacionadas a la calidad, y se requieren para el conocimiento sobre el efecto de aditivos, hidrocoloides o enzimas utilizados en la industria de la panificación. El volumen total (VT) del PS1 estuvo influenciado fue menor en comparación de todos los tratamientos; esto se debe a que no contenía MGT ni GX ($p < 0.05$); en el tratamiento PS8 ($291.3 \pm 3.2 \text{ cm}^3$), al cual se le agregó 0.5 GX/0.25 MTG; mientras que la adición de 0.5% de ambos aditivos (PS9) resultó en el mayor VT del panqué ($454.3 \pm 0.6 \text{ cm}^3$) (Figura 1). Conforme se incrementó la concentración de GX/MTG el VT aumentó; esto se puede atribuir a burbujas de aire que se forman en la pasta y que los aditivos añadidos evitan la ruptura durante y después del horneado, permitiendo un mayor volumen del producto. Con la adición de GX, se produce un aumento en la temperatura de gelatinización del almidón, el cambio de la masa del fluido (emulsión aireada) a sólido (estructura porosa) ocurre más tarde; esto ha sido demostrado en la producción de muffins preparadas con harina de arroz y zanahoria negra, en los cuales se observó un aumento de volumen por más tiempo (Singh *et al.*, 2016). Por otro lado, Gómez *et al.* (2007) reportó valores de 525 cm^3 en panes a los que se les agregó GX, siendo más altos a los comparados con el control, que reportó 460 cm^3 ($p < 0.05$). Por ello, diversos autores señalan la importancia de la GX para incorporar y retener aire en las mezclas (Mandala *et al.*, 2008; Kohajdová *et al.*, 2009). En panes de trigo los valores de VT oscilan entre 500 a $1,000 \text{ cm}^3$ (Sasaki, 2022) solamente el tratamiento PS9 tuvo valores cercanos a 500, lo cual se adjudica a la adición de GX y MTG.

Figura 1

Volumen total (VT) de las diferentes variaciones de panqué de sorgo.

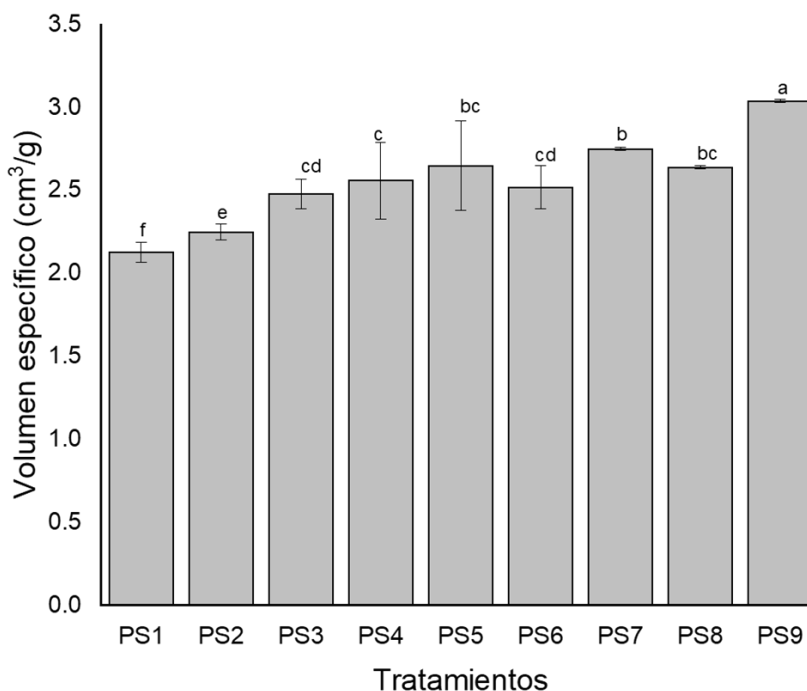


Nota. Letras minúsculas indican diferencia significativa ($p < 0.05$). Las barras verticales indican la desviación estándar.

El volumen específico (VE) es una de las características visuales más importantes de los productos de panadería de cereales e influye fuertemente en la elección de los consumidores (Benkadri *et al.*, 2021). Sin embargo, en los panes sin gluten, este puede variar según el tipo de harina, los aditivos y el proceso utilizado; el VE es un indicador de la cantidad de aire que se mantiene en el producto final, muestra una relación entre el contenido de agua, fallas en el batido y cocción, mala aireación provocando dificultad para masticar, sabor inadecuado y baja conservación (Gusmão *et al.*, 2019). En los panqués formulados en el presente estudio, el VE del PS9 tuvo el valor más alto ($3.0 \pm 0.01 \text{ cm}^3/\text{g}$) ($p \leq 0.05$) comparado con el resto de las formulaciones (Figura 2). El VE presente en los diferentes panqués de sorgo fueron de $2.3 \pm 0.05 \text{ cm}^3/\text{g}$ (PS2), $2.5 \pm 0.1 \text{ cm}^3/\text{g}$ (PS3), $2.6 \pm 0.2 \text{ cm}^3/\text{g}$ (PS4), $2.7 \pm 0.3 \text{ cm}^3/\text{g}$ (PS5), $2.5 \pm 0.1 \text{ cm}^3/\text{g}$ (PS6), $2.8 \pm 0.01 \text{ cm}^3/\text{g}$ (PS7) y $2.6 \pm 0.01 \text{ cm}^3/\text{g}$ (PS8). Cabe mencionar, que el comportamiento de VE tuvo un comportamiento similar al VT de los diferentes panqués de sorgo, conforme se incrementa la concentración de mezclas de GX/MTG se incrementa el VE. Lo anterior indica mayor capacidad de retener aire durante el horneado y su efecto sobre la temperatura de gelatinización del almidón (Gómez *et al.*, 2007). Los panes de trigo comerciales tienen valor de VE 3.5 y 5.5 cm^3/g ; para panes sin gluten el promedio de VE es de 2.2 a 2.9 cm^3/g , estos valores indican buena calidad del pan; esta diferencia se debe a que al mezclar la harina con agua y amasarse, la gliadina y glutenina interaccionan mediante puentes disulfuro formando una red que retiene el CO_2 (Monteiro *et al.*, 2021).

Figura 2

Volumen específico (VE) de las diferentes variaciones de panqué de sorgo.



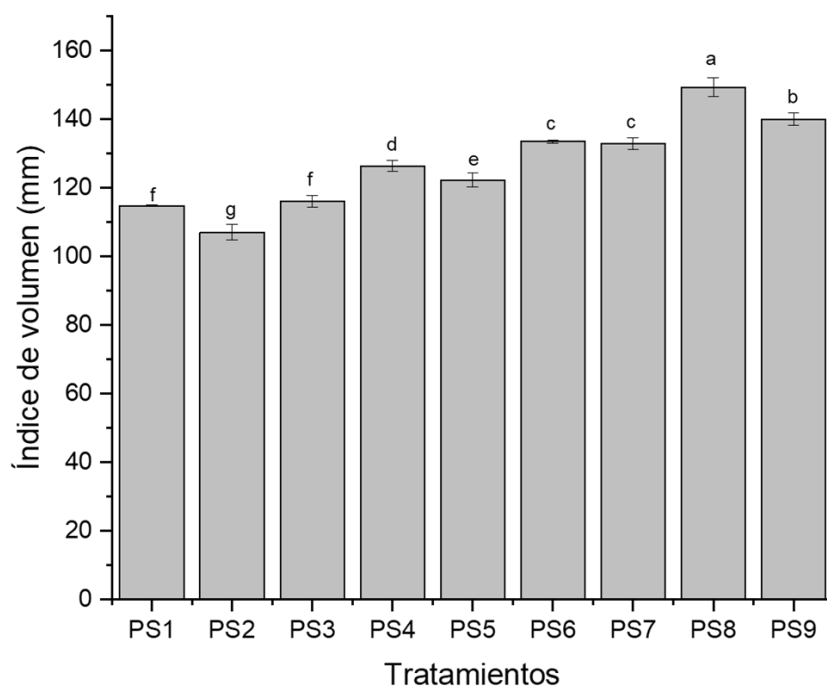
Nota. Letras minúsculas indican diferencia significativa ($p < 0.05$). Las barras verticales indican la desviación estándar.

Además, la GX actúa como un agente aglutinante que aumenta la viscoelasticidad de la masa, por lo tanto, la masa con propiedades viscoelásticas atraparé fácilmente el gas, por lo que el volumen durante la cocción es alto (Sutrisno *et al.*, 2021). Los valores más bajos de VE se presentaron en mezclas de GX/MTG (0/0 %) y en GX/MTG (0/0.25 %) con valores de 2.13 ± 0.06 y 2.25 ± 0.05 cm³/g para PS1 y PS2, respectivamente. En un estudio se evaluó el VE en panes elaborados con harina de sorgo tratada térmicamente (95 y 125 °C cada uno sometido a tiempos de 15, 30 y 45 min) presentó mayor valor de VE conforme se incrementaba el tiempo del tratamiento térmico comparado con el control (pan con harina sin tratamiento térmico). Este aumento de VE puede ser atribuido a la modificación de las proteínas en la HS al oxidarse los grupos sulfhidrilos libres (Marston *et al.*, 2016). Para panes tipo panque elaborados con harina de sorgo se reportaron valores de VE de 1.82 cm³/g (Hussein *et al.* 2012); en otro estudio se analizaron panque de harina de arroz a los cuales se les añadió GX, se obtuvieron valores de VE de 1.26 cm³/g (Turabi *et al.*, 2008); mientras que en panes de trigo y mijo a los que se agregó MTG se reportaron valores de VE de 1.94 a 2.11 cm³/g (Schoenlechner *et al.* 2013). Renzetti *et al.* (2008) reportaron valores de VE de 1.52 a 1.71 cm³/g en panes elaborados con sorgo haciendo uso de MTG, los cuales son menores a lo encontrado en el presente estudio.

En la Figura 3 se aprecia el índice de volumen (IV) o altura del pan; se observa que el valor de IV en la formulación PS2 (GX/MTG, 0/0.25 %) fue menor (6.8%), comparado con la PS1 (GX/MTG, 0/0 %) ($p \leq 0.05$). El PS8 (GX/MTG, 0.5/0.25 %) fue 23.1% más alto que el PS1, seguido del PS9 (17.9%) y PS7 (13.9%) con mezclas de GX/MTG de 0.5/0.5 y 0.5/0 %, respectivamente. Esto se puede atribuir a la capacidad de la GX para retener las burbujas de aire durante el horneado del panqué; además, el PS9 presentó un bajo nivel en el lado C; en ese sentido, Turabi *et al.* (2008) mencionan que se debe al colapso de la estructura del pan. Sung *et al.* (2020) prepararon panes de harina de arroz y suplementados con harina de chía al 10, 20 y 30 %, para los cuales reportaron valores de IV de 24.9, 24.1 y 21.2 mm, respectivamente. En los panques obtenidos se encontraron valores de VT y VE más altos en la formulación PS9 (0.5 % GX y 0.5% MTG) ($p \leq 0.05$), lo que sugiere que la adición de estos aditivos mejora esta propiedad en panes de sorgo o podría incluso hacerlo en panes libre de gluten.

Figura 3

Índice de Volumen (IV) de las diferentes variaciones de panqué de sorgo.



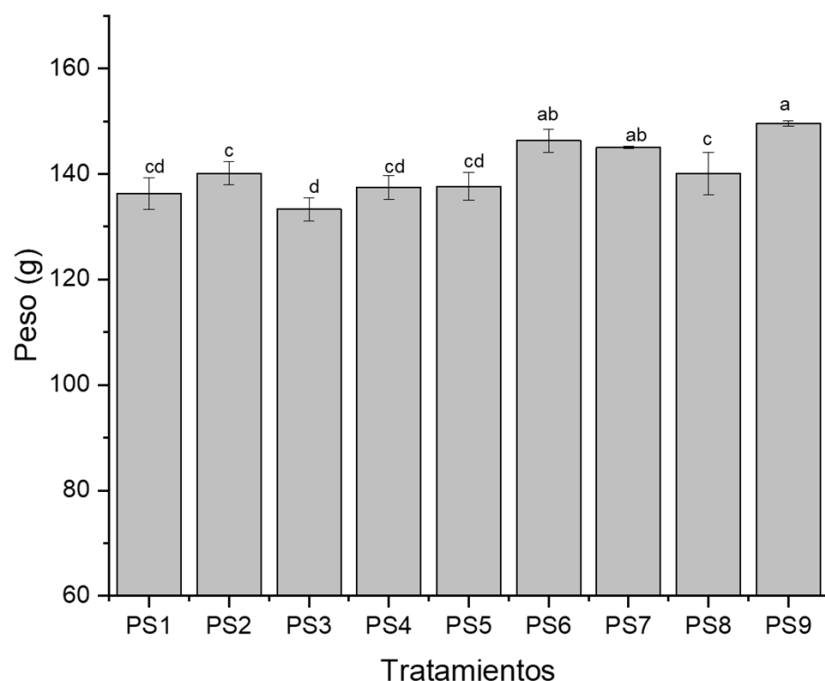
Nota. Letras minúsculas indican diferencia significativa ($p < 0.05$). Las barras verticales indican la desviación estándar.

En el peso no se presentaron diferencias significativas entre el PS9 (149.56 ± 0.57 g) y el PS6 (146.28 ± 2.17 g). El PS7 (GX/MTG, 0.5/0 %) fue estadísticamente diferente al resto de los tratamientos ($p \leq 0.05$), con un peso de 145.05 ± 0.15 g. El PS9 (GX/MTG, 0.5/0.5 %) presentó 8.8 % más en peso que el PS1 (Figura 4). Además, el PS6 (GX/MTG, 0.25/0.5 %) presenta 8.8 % de peso más que el PS1. El PS7 es 6 % más en peso que el PS1. Con lo anterior se le puede atribuir el efecto mayor alcanzado en peso a la

goma xantana y en menor proporción a la MTG. En panes elaborados con harina de arroz suplementada con HS al 20, 30 y 40 % presentaron un peso de 135.3, 137.6 y 138.6 g respectivamente (Gadallah, 2017). Para panes elaborados con harina (100 g) de sorgo reportaron un peso de 140 g y para panes con harina de arroz 125 g (Hussein *et al.*, 2012), mientras que en este estudio se presentaron valores de peso en PS de 133.3 a 149.56 g al utilizar solo 50 g de HS en base seca.

Figura 4

Peso de las diferentes variaciones de panqué de sorgo.



Nota. Letras minúsculas indican diferencia significativa ($p < 0.05$). Las barras verticales indican la desviación estándar.

En la Tabla 2, se observan los diferentes parámetros de color medidos en el PS. Los valores de a^* pueden ser positivos (rojo) o negativos (verde). Por lo tanto, en el panqué de sorgo se mantienen por debajo de 10, y van de 7.04 a 9.61 mostrando diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre ellos y tienden hacia un hue rojo similares a los reportados por (Phattanakulkaewmorie *et al.*, 2011). En pan para pastel sin gluten elaborados con harina de arroz, se presentan valores negativos de a^* encontrándose en el rango de las tonalidades verdes (Lazaridou *et al.*, 2007; Preichardt *et al.*, 2011). El PS8 y PS3 tuvieron los valores más altos de a^* , siendo diferentes a los demás tratamientos ($p \leq 0.05$). Alp y Bilgiçli (2008) obtuvieron valores de a^* de 1.67 sin enriquecimiento de proteína y 3.48 con enriquecimiento de harina de soya para panes de trigo adicionados con MTG. Los valores de b^* pueden ser positivos (amarillo) o negativos (azul), el valor se incrementó conforme aumenta la concentración de MTG y disminuyó con la presencia de GX y mezclas de GX/MTG; para el PS3 y el PS2 se obtuvieron valores de 39.20 ± 1.77 y 38.80 ± 1.95 respecti-

vamente, siendo estadísticamente iguales ($p \leq 0.05$). El PS7 presentó 16.2%, el PS8 24.1% y el PS9 16.3% menos que el PS3. Esto significa que a mayor concentración de GX los valores de b^* disminuyen y pueden proporcionar valores negativos tendiendo hacia un hue azul. Preichardt *et al.* (2011) reportó valores de b^* desde 30.48 hasta 32.26 en panes de arroz adicionados con GX; valores superiores a los reportado por Alp y Bilgigli (2008) reportaron que al adicionar MTG a panques elaborados con harina de trigo los valores de b^* son de 24.61 (sin enriquecimiento de proteína) y 28.94 (enriquecido con harina de soya). Ozturk, y Mert (2018) prepararon panques de maíz libres de gluten, a los cuales se les añadió 60, 70 y 80 g de almidón de maíz y 5 g de GX a cada muestra, reportando valores de L (87.1 a 92.3), de a (3.2 a 6.1) y de b (32.5 a 54.6). Phattanakulkaewmorie *et al.* (2011) reportaron valores de 3.5 a 17.23 para b^* en pan elaborado con harina de sorgo germinado y sin germinar. Sin embargo, el color que se ve el alimento se determina mediante el cálculo del Hue, en los panes formulados se encontraron valores de 72 a 77, lo que los sitúa en el cuadrante amarillo-verde del círculo cromático, más cercano al amarillo que al verde, lo cual es típico en productos horneados. Por tanto, la MTG presente en el panqué de sorgo, permite obtener valores de calidad referentes al color; esto se debe a que la enzima modifica la distribución de agua lo que podría afectar la corteza y luminosidad de la miga, dando valores más altos de L^* (Rodríguez-Castillejos *et al.*, 2018). En cuanto a la luminosidad (L^*), se observa que la adición de aditivos disminuye el valor, lo que significa que el pan se verá más oscuro.

Tabla 2

Parámetros de color presentes en la migaja del panqué de sorgo.

Panqué de sorgo	L^*	a^*	b^*	Hue	Saturación	Color
PS1	69.06±2.47 ^a	8.56±0.87 ^c	38.50±1.65 ^b	77.46±1.13 ^b	39.45±1.71 ^b	
PS2	65.28±3.91 ^b	9.05±0.92 ^b	38.80±1.95 ^{ab}	76.88±0.85 ^c	39.85±2.08 ^{ab}	
PS3	66.47±3.08 ^b	9.61±1.39 ^a	39.20±1.77 ^a	76.27±1.47 ^d	40.37±2.00 ^a	
PS4	49.78±4.14 ^d	8.43±0.53 ^{cd}	33.49±1.31 ^c	75.84±0.97 ^e	34.54±1.29 ^c	
PS5	51±4.85 ^d	8.24±0.85 ^d	33.63±1.48 ^c	76.22±1.43 ^d	34.64±1.48 ^c	
PS6	50.89±3.38 ^d	9.21±1.02 ^b	33.81±1.55 ^c	74.77±1.33 ^f	35.05±1.67 ^c	
PS7	56.11±2.70 ^e	6.9±0.36 ^e	32.82±1.07 ^d	78.11±0.50 ^a	33.54±1.09 ^d	
PS8	40.21±8.67 ^e	9.55±0.53 ^a	29.73±2.22 ^e	72.1±1.63 ^g	31.24±2.12 ^e	
PS9	55.8±2.43 ^c	7.04±0.41 ^e	32.78±0.94 ^d	77.87±0.67 ^a	33.53±0.95 ^d	

Nota. Se presenta media y DE. Columnas con la misma letra son estadísticamente iguales ($p \leq 0.05$). PS, panqué de sorgo. El color se calculó con los valores de L^* , a^* y b^* . Mean and SD are presented. Columns with the same letter are statistically equal ($p \leq 0.05$). PS, sorghum pound cake.

The color was calculated using the values of L^* , a^* and b^* .

2.2. Análisis de perfil de textura (TPA)

El análisis del perfil de textura proporciona una perspectiva para la evaluación objetiva de la textura de los productos y simula la mordedura de un ser humano con un ciclo de compresión doble (Cakmak *et al.*, 2021). Los promedios del TPA realizados en el panqué de sorgo, donde todos los tratamientos mostraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en cada parámetro, se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3

Medias y desviación estándar del TPA del panqué de sorgo (PS, tratamiento; columnas con la misma letra son estadísticamente iguales; prueba de Tukey ($p \leq 0.05$)).

PS	Dureza (gf)	Masticabilidad (gf)	Gomosidad (gf)	Elasticidad	Cohesividad
PS1	3601.56 ± 139.93 ^a	± 929.80 ± 14.13 ^b	583.38 ± 18.96 ^c	1.56 ± 0.01 ^b	0.23 ± 0.00 ^g
PS2	3560.60 ± 214.31 ^a	± 1088.25 ± 65.94 ^{ab}	705.84 ± 49.30 ^b	1.75 ± 0.07 ^a	0.26 ± 0.00 ^f
PS3	2885.52 ± 732.37 ^b	± 991.78 ± 350.94 ^{ab}	997.81 ± 148.72 ^a	1.33 ± 0.22 ^c	0.31 ± 0.01 ^e
PS	1812.52 ± 99.03 ^c	446.46 ± 25.61 ^c	351.03 ± 8.93 ^e	1.27 ± 0.07 ^{cd}	0.28 ± 0.01 ^f
PS5	1151.12 ± 119.07 ^d	1258.49 ± 309.65 ^a	1023.72 ± 190.26 ^a	1.18 ± 0.02 ^d	0.99 ± 0.02 ^a
PS6	1873.94 ± 158.90 ^c	± 1233.04 ± 420.05 ^a	617.57 ± 72.96 ^{bc}	1.16 ± 0.00 ^d	0.41 ± 0.01 ^d
PS7	1084.11 ± 101.84 ^d	± 550.36 ± 56.99 ^c	505.30 ± 61.83 ^{cd}	1.22 ± 0.13 ^{cd}	0.49 ± 0.03 ^{bc}
PS8	1138.38 ± 56.08 ^d	524.81 ± 42.17 ^c	450.97 ± 29.08 ^{ed}	1.16 ± 0.00 ^d	0.47 ± 0.01 ^c
PS9	1015.42 ± 45.59 ^d	477.85 ± 60.93 ^c	394.47 ± 30.98 ^{ed}	1.16 ± 0.00 ^d	0.51 ± 0.04 ^b

Nota. Columnas con la misma letra son estadísticamente iguales ($p \leq 0.05$). PS, panqué de sorgo. Columns with the same letter are statistically equal ($p \leq 0.05$). PS, sorghum pound cake.

Se observa que conforme aumentó la concentración de GX disminuyó la dureza de los panes; la formulación sin aditivos tuvo los valores más altos (PS1 3601.56 ± 139.93 gf). Mientras que los tratamientos que presentaron menor dureza fueron PS7 (1084.11 ± 101.84 gf), PS8 (1138.38 ± 56.08 gf) y PS9 (1015.42 ± 45.29 gf). La disminución de la dureza puede estar relacionada con la cantidad de aire, aceite y goma incorporada en la masa sin gluten durante la mezcla (Sung y Chai, 2017). Los consumidores prefieren una dureza más baja, debido a que asocian una miga dura con un producto viejo (de Souza *et al.*, 2021).

Asimismo, la MTG puede aumentar la hidrofiliidad de las proteínas del gluten, lo que conduce a una mayor capacidad de retención de agua y un mayor contenido de agua en el pan. Por ello, los resultados mostraron que el uso de MTG y XG mejoraron esta propiedad al disminuir la dureza con respecto al pan base (PS1, sin aditivos).

El alto contenido de agua en el pan puede aumentar la vida útil y retrasar la retrogradación del almidón (Cao *et al.*, 2021), de esta manera, actuando en la disminución de la dureza del pan, principalmente cuando se utilizan mayores concentraciones de GX/MTG. Ronda *et al.*, (2009) reportó que la transglutaminasa disminuyó la dureza en panque elaborado con harina de arroz y que la mezcla de goma xantana y transglutaminasa podrían ser importantes para evitar el rápido envejecimiento de los panes. Renzetti *et al.* (2008) reportaron para el pan sin gluten de sorgo adicionado con MTG (0-0.10 U/g) valores de dureza de 23.13 a 26.73 N (equivalentes a 2358.6 a 2664.5 gf), valores mayores que el reportado en este trabajo. Además, en pan libre de gluten elaborado con harina de sorgo y quinua (3508.56 ± 129.45 gf) disminuyó la dureza (2795.51 ± 112.34 gf) cuando se le agregó 0.5% de MTG (Rodríguez *et al.*, 2018). La masticabilidad es definida por el producto de la gomosidad y la elasticidad (Pathaw *et al.*, 2021). Además, a nivel sensorial simula el periodo de tiempo necesario para masticar un alimento a una velocidad constante reduciendo su consistencia para ser tragado. El PS5 presentó 1258.49 ± 89.65 gf, seguido del PS6 (1233.04 ± 80.05 gf), el PS2 (1088.25 ± 65.94 gf), y el PS3 (991.78 ± 50.94 gf) siendo estadísticamente iguales ($p \leq 0.05$) entre ellos. El PS5 fue 37.97 % mayor que el PS1 (477.85 ± 60.93 gf). Onyango *et al.* (2010) reportó una masticabilidad de 817.35 a 937.10 gf sin MTG y usando 0.5 U/g de esta, obtuvo de 794.83 gf a 980.35 gf en pan preparado con almidón de casava (yuca o mandioca) y sorgo. La masticabilidad en PS1 disminuyó casi la mitad en PS7 (550.36 ± 56.99), PS8 (524.81 ± 42.17) y PS9 (477.85 ± 60.93) para mezclas de GX-MTG de 0.5/0, 0.5/0.25 y 0.5/0.5 % respectivamente.

A nivel sensorial, la gomosidad se refiere a la cantidad de movimiento requerido antes de que el alimento se desintegre; la gomosidad más alta fue registrada en la formulación PS5 (1023.72 ± 190.26 gf) seguido del PS3 con 997.81 ± 148.72 gf; siendo ambos estadísticamente iguales ($p \leq 0.05$). El PS4, el PS7, el PS8 y el PS9 presentaron valores de gomosidad de 351.03 ± 8.93 gf, 505.30 ± 61.83 gf, 450.97 ± 29.08 gf y 394.47 ± 30.98 gf, respectivamente. En panes elaborados con harina de sorgo suplementado con harina de quinua se reportaron valores de gomosidad de 574.3 ± 17.56 y 951.81 ± 106.43 gf en el pan control (sin MTG) y pan con MTG respectivamente (Rodríguez *et al.*, 2018). En cuanto a la masticabilidad del panqué de sorgo elaborado, esta aumentó con los tratamientos que contienen MTG y menor concentración de GX como son el PS3, el PS5 y el PS6.

La elasticidad más alta fue de 1.75 ± 0.07 , encontrada en la formulación PS2 siendo estadísticamente diferente ($p \leq 0.05$) al resto de los tratamientos. El PS2 contiene 0.25% de MTG, sin GX; lo cual indica que la MTG incrementa los valores de elasticidad en menor concentración (0.25 %) que cuando es utilizada a concentraciones de 0.5 % o acompañada con GX. Los valores altos de elasticidad están relacionados con la frescura y elasticidad del pan, con capacidad para regresar a su estado original después de ser estresado (Encina-Zelada *et al.*, 2018). En pan de capas adicionados con GX se reportaron valores de elasticidad para 0 días (0.91) y 2 días (0.89) después de ser horneados (Gómez *et al.*, 2007). En panques libres de gluten elaborados con harina de arroz, suplementados con 15, 30 y 45 % de aislado de proteína de arroz se reportó una elasticidad de 0.85, 0.83 y 0.74, comparados con el control que presentó una elasticidad de 0.89 (Sahagún *et al.*, 2018). En pan elaborado con diferentes genotipos de

sorgo se reportaron valores de elasticidad de 0.99 tanto en sorgo de color café, rojo y blanco (de Lacerda *et al.*, 2022). La mezcla de GX/MTG, 0.25/0.25 % (PS5) presentó 0.99 ± 0.02 seguido de la mezcla GX/MTG, 0.5/0.5 % (PS9) con 0.51 ± 0.04 de cohesión. Los demás PS presentaron valores de cohesividad entre 0.23 ± 0.00 y 0.49 ± 0.03 ; en un estudio de pan para pastel de chocolate con harina de sorgo se reportaron valores de cohesividad más altos al presente estudio (0.63 ± 0.01) (de Souza *et al.*, 2021). Panes elaborados con harina de sorgo-harina de quinua con MTG reportaron una cohesividad de 0.28 ± 0.01 , comparado con el control (sin presencia de MTG) que presentó 0.21 ± 0.01 (Rodríguez *et al.*, 2018). Arocha *et al.* (2012) reportaron para panes elaborados con mezcla de harina de avena y arroz, utilizando goma guar-fibra, valores mayores de cohesividad de 0.40 ± 0.1 , comparado con el control sin goma (0.31 ± 0.20). En panes sin gluten elaborados con mezclas compuestas de mandioca-sorgo y adicionados con MTG (0.5 U/g) reportaron valores de 0.47 a 0.58 (Onyango *et al.*, 2010). La cohesividad representa el punto límite hasta el cual puede deformarse el material antes de romperse (Osorio *et al.*, 2005); desde el punto de vista sensorial se refiere al nivel al cual el alimento se deforma antes de romperse cuando se mastica con los dientes molares.

2.3. Composición química

La composición proximal del panqué de sorgo se muestra en la Tabla 4, se observan diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre los componentes químicos de las diferentes variaciones del panqué. El contenido de humedad varió de 8.38 a 8.79%; no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos ($p \leq 0.05$). El contenido de cenizas mostró diferencias significativas ($p \leq 0.05$), en los tratamientos PS7 (2.1 ± 0.76) y PS4 (3.1 ± 0.35).

Tabla 4

Composición químico proximal en base seca del panqué de sorgo (%/100 g de muestra).

PS	Humedad	Cenizas	Grasa	Fibra	Proteína	Carbohidratos
PS1	8.7 ± 0.22^a	2.6 ± 0.06^{ab}	14.1 ± 1.22^a	10.3 ± 0.25^{ab}	14.6 ± 0.36^{ab}	59.4 ± 1.44^a
PS2	8.7 ± 0.99^a	2.5 ± 0.08^{ab}	14.6 ± 1.18^a	10.2 ± 0.01^{ab}	14.8 ± 0.35^{ab}	57.8 ± 1.47^b
PS3	8.4 ± 0.03^a	2.4 ± 0.14^{ab}	15.7 ± 0.54^a	9.8 ± 0.11^b	14.7 ± 0.51^{ab}	59.1 ± 0.10^a
PS4	8.6 ± 0.30^a	3.1 ± 0.35^a	15.6 ± 1.50^a	10.1 ± 0.16^{ab}	14.4 ± 0.37^{ab}	56.7 ± 1.11^{bc}
PS5	8.4 ± 0.29^a	2.5 ± 0.39^{ab}	15.0 ± 1.08^a	10.3 ± 0.24^{ab}	14.6 ± 0.22^{ab}	57.2 ± 0.98^b
PS6	8.7 ± 0.23^a	2.6 ± 0.17^{ab}	15.4 ± 1.02^a	10.3 ± 0.11^{ab}	15.2 ± 0.33^a	56.8 ± 0.83^{bc}
PS7	8.4 ± 0.07^a	2.1 ± 0.76^b	13.4 ± 0.29^a	10.5 ± 0.27^a	14.5 ± 0.18^{ab}	59.4 ± 0.58^a
PS8	8.5 ± 0.32^a	2.4 ± 0.21^{ab}	14.4 ± 0.69^a	10.1 ± 0.15^{ab}	14.2 ± 0.15^b	57.8 ± 0.77^b
PS9	8.9 ± 0.37^a	2.5 ± 0.13^{ab}	13.5 ± 0.19^a	10.5 ± 0.18^a	14.3 ± 0.16^b	59.2 ± 0.26^a

Nota. Medias y DE. Columnas con la misma letra son estadísticamente iguales ($p \leq 0.05$). PS, panqué de sorgo. Means and SD. Columns with the same letter are statistically equal ($p \leq 0.05$). PS, sorghum pound cake

Arocha *et al.* (2012), encontraron valores de cenizas de 1.4 a 1.8% en panques elaborados con harina de arroz. De acuerdo con Ng'uni *et al.* (2011) el sorgo es fuente de minerales como el magnesio, calcio y zinc; por lo tanto, el alto contenido de cenizas comparado con el panque de arroz confirma una mayor cantidad de minerales. El calcio, zinc y magnesio ayudan a reducir la probabilidad de formación de cálculos renales, reducen la presión sanguínea alta y otros problemas del corazón, reducen el síndrome premenstrual, estreñimiento crónico y trastornos del sueño (Afkhami *et al.*, 2008); por lo que tenemos en el sorgo un alimento funcional. En cuanto al contenido de grasa en el panqué de sorgo no mostró diferencias significativas ($p \leq 0.05$), oscilando su valor entre 13.4 y 15.67 %. Haas *et al.* (2021) elaboraron panes elaborados con harinas compuestas de tef/almidón de casava/arroz reportando un contenido de lípidos de 7.8 %, comparado con el control (100 %, harina de tef) que presentó 7.7 (%). Shih *et al.* (2006) reportó para un panqué de harina de arroz un total de 0.26%. En panes donde se sustituye el azúcar por estevia y, además, contiene goma xantana, presenta valores de grasa de 28.4 % (Manisha *et al.*, 2012). El panqué de sorgo se elaboró con aceite vegetal, el cual se compone de grasas mono o poliinsaturada, aunque incrementa el consumo de calorías. Además, el sorgo es rico en ácido linoleico, oleico, palmítico, y linolénico (Dicko *et al.*, 2006; Treviño-Salinas *et al.*, 2019); estos ácidos grasos ofrecen beneficios importantes para el corazón y no aumentan los niveles plasmáticos de colesterol.

Por otro lado, el contenido de fibra presentó diferencias significativas ($p \leq 0.05$) para las diferentes variaciones de PS: el PS3 (9.8 ± 0.1) fue el tratamiento que presentó valores más bajos; mientras que el PS 7 (10.5 ± 0.27) y PS9 ($10.49 \% \pm 0.18$) presentaron ligeramente más contenido en fibra. La goma xantana es empleada en panificación debido a sus propiedades como agente emulsificante, su capacidad de retención de agua y sus propiedades de adhesión y formación de películas. La GX y MTGasa forman una red de agua que aumenta la estabilidad de los compuestos químicos, evitando pérdidas durante la cocción. El contenido de proteína en el panqué de sorgo presentó diferencias significativas ($p \leq 0.05$), con valores de 14.3 ± 0.16 a 15.2 %. Las prolaminas llamadas también kafirinas del sorgo son ricas en ácido glutámico y aminoácidos no polares (leucina, prolina y alanina), pero deficiente en el aminoácido esencial lisina (De Mesa-Stonestreet *et al.*, 2010); en ausencia de lisina la enzima forma enlaces entre glutamina y agua. Estos enlaces mejoran el volumen y la textura del pan, pero no tiene efectos sobre el aumento de enlaces entre aminoácidos. Andrade *et al.* (2018) presentó valores de proteína de 9.2 % en panes libres de gluten de harina de haba con 0.5 % de GX, mientras que el control (sin GX) presentó 9.04 % de proteína. Asimismo, en harinas compuestas de maíz/frijol Mat con 0.20 % de GX, utilizadas en la elaboración de panque sin gluten reportaron valores de proteína de 8.1 a 12.5 % (Vedantam *et al.*, 2021). Por otro lado, las panquecas elaboradas con harina de trigo y trozos de zanahoria presentaron contenidos de proteína de 7.51 a 9.48 % (Gamboa *et al.*, 2007).

El contenido de carbohidratos presentes en el PS es estadísticamente diferente ($p \leq 0.05$) en las diferentes variaciones de PS. Gamboa *et al.* (2007) reportaron un contenido de 35.30 a 48.16 % de carbohidratos en panquecas de trigo con trozos de zanahoria. Shih *et al.* (2006) elaboraron un panqué de harina de arroz con valores arriba de 40 % de carbohidratos. En panque libres de gluten elaborados con harina de arroz y suplementados con harina de semillas de chía al 0, 10, 20 y 30 % reportaron un contenido de carbohidratos de 50.4, 47.9, 46.1 y 44.7 % respectivamente (Sung *et al.*, 2020). El contenido de carbohidratos desde el punto de vista nutricional es importante en este tipo de alimentos

debido a las múltiples funciones de los carbohidratos en el cuerpo; principalmente porque evitan la formación de cuerpos cetónicos. El sorgo contiene almidón resistente por lo que puede ser consumido por pacientes con obesidad y diabetes (Dicko *et al.*, 2006).

La adición combinada de GX y MTG en masas sin gluten aumenta la retención de gas, trayendo un aumento en el volumen total y específico; además brinda una menor retrogradación del almidón teniendo como resultado una miga con mejor porosidad (menos densa) y suave. También se ha asociado a un mejor aspecto visual y control de humedad; lo anterior mejora las propiedades de los panes obtenidos. En los últimos años se ha hipotetizado que la MTG añadida a alimentos libre de gluten podría aumentar la permeabilidad intestinal o activas respuestas inmunológicas derivadas de la formación de complejos proteicos; la evidencia clínica directa en humanos aún no es clara. (Lerner y Matthias, 2020). Sin embargo, las formulaciones desarrolladas tuvieron concentraciones de MTG más bajas que lo reportado en productos de panificación (Safavi y Gharekhani, 2019).

3. Conclusiones

El desarrollo de este tipo de productos es fundamental ya que ofrecen una mejora en la calidad de vida de las personas particularmente de bajos recursos y con deficiencias nutricionales o que padezcan intolerancia o alergias a productos con base en harina de trigo y por lo tanto, el sorgo sería una buena alternativa para el desarrollo de productos. La GX y MTG mejoraron las propiedades físicas y textura del pan; con base a esto, el tratamiento PS9 (0.5 % GX y 0.5 % MTG) es la mejor. El contenido de grasa presente en el panqué se refiere a ácidos grasos insaturados, los panques tuvieron un alto contenido de proteína; al ser un producto libre de gluten puede ser consumido incluso por pacientes celiacos

Agradecimientos

El primer autor agradece a la SECIHTI México, por el apoyo brindado a través de la beca de posgrado para el estudio de investigación. Se agradece a la Universidad Autónoma Tamaulipas, Reynosa-Aztlán y al Instituto Politécnico Nacional, CICATA Querétaro por el apoyo de las instalaciones y laboratorios. Así mismo al INIFAP Campo experimental Río Bravo por la donación de la materia prima.

Fuentes de financiamiento

El presente proyecto fue financiado por recursos propios.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no hay conflicto de intereses.

Referencias

- AACC. 2000. Approved methods of the American Association of Cereal Chemists, Volumes 1-2 Tenth Edition.
- Afkhami, A., Madrakian, T., y Abbasi-Tarighat, M. 2008. Simultaneous determination of calcium, magnesium and zinc in different foodstuffs and pharmaceutical samples with continuous wavelet transforms. *Food chemistry*, 109(3), 660-669. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.12.078>
- Alp, H., y Bilgiçli, N. 2008. Effect of transglutaminase on some properties of cake enriched with various protein sources. *Journal of food science*, 73(5), S209-S214. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2008.00760.x>
- Andrade, F. J. E. T., Albuquerque, P. B. S., Moraes, G. M. D., Farias, M. D. P., Teixeira-Sá, D. M. A., Vicente, A. A., y Carneiro-da-Cunha, M. G. 2018. Influence of hydrocolloids (galactomannan and xanthan gum) on the physicochemical and sensory characteristics of gluten-free cakes based on fava beans (*Phaseolus lunatus*). *Food & function*, 9(12), 6369-6379. <https://doi.org/10.1039/C8FO01448E>
- AOAC. 1990. Official Methods of Analysis. 15th ed. Association of Official Analytical Chemists. Washington, D.C.
- Arocha, G. M., de la Hera, E., Gómez, M., y Rosell, C. M. 2012. Effect of different fibers on batter and gluten-free layer cake properties. *LWT-Food science and technology*. 48(2), 209-214. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.03.015>
- Benkadri, S., Salvador, A., Sanz, T., y Nasreddine Zidoune, M. 2020. Optimization of xanthan and locust bean gum in a gluten-free infant biscuit based on rice-chickpea flour using response surface methodology. *Foods*, 10(1), 12. <https://doi.org/10.3390/foods10010012>
- Burešová, I., Masaříková, L., Hřivná, L., Kulhanová, S., y Bureš, D. 2016. The comparison of the effect of sodium caseinate, calcium caseinate, carboxymethyl cellulose and xanthan gum on rice-buckwheat dough rheological characteristics and textural and sensory quality of bread. *LWT-Food Science and Technology*, 68, 659-666. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.01.010>
- Cakmak, H., Mama, M., y Yilmaz, S. M. 2021. Determination of the effects of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) sprouts powder on the gluten-free cupcake quality. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(5), e15435. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15435>
- Cao, Y., Jiang, L., Suo, W., Deng, Y., Zhang, M., Dong, S., Peng, G., Shanfeng, Ch., y Li, H. 2021. Influence of emulsifiers and enzymes on dough rheological properties and quality characteristics of steamed bread enriched with potato pulp. *Food Chemistry*, 360, 130015. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130015>
- de Lacerda, de O. L., de Oliveira, G. T., de Alencar, E. R., Queiroz, V. A. V., y de Alencar Figueiredo, L. F. 2022. Physical, chemical, and antioxidant analysis of sorghum grain and flour from five hybrids to determine the drivers of liking of gluten-free sorghum breads. *LWT*, 153, 112407. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112407>

- De Mesa-Stonestreet, N. J., Alavi, S., y Bean, S. R. 2010. Sorghum proteins: the concentration, isolation, modification, and food applications of kafirins. *Journal of food science*. 75(5), R90-R104. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01623.x>
- de Souza, L. N., da Silva Paulino, H. F., Barlati Vieira da Silva, T., Bona, E., Leimann, F. V., Marques, L. L. M., ... y Fuchs, R. H. B. 2021. How does the replacement of rice flour with flours of higher nutritional quality impact the texture and sensory profile and acceptance of gluten-free chocolate cakes? *International Journal of Food Science & Technology*, 56(4), 2019-2029. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14833>
- Dicko, M. H., Gruppen, H., Traore, A. S., Voragen, A. G. J., y Van Berkel, W. J. H. 2006. Sorghum grains as human food in Africa: relevance of content of starch and amylase activities. *African journal of biotechnology*. 5: 384-395. <https://academicjournals.org/journal/AJB/article-full-text-pdf/E1F4A4F5586>
- Dube, N. M., Xu, F., y Zhao, R. 2020. The efficacy of sorghum flour addition on dough rheological properties and bread quality: A short review. *Grain y Oil Science and Technology*, 3(4), 164-171. <https://doi.org/10.1016/j.gaost.2020.08.001>
- Duodu, K. G., Taylor, J. R. N., Belton, P. S., y Hamaker, B. R. 2003. Factors affecting sorghum protein digestibility. *Journal of Cereal Science*, 38: 117-131. [https://doi.org/10.1016/S0733-5210\(03\)00016-X](https://doi.org/10.1016/S0733-5210(03)00016-X)
- Encina-Zelada, C., Teixeira, J., Monteiro, F. C., Gonzales-Barron, U., y Cadavez, V. 2018. Effect of xanthan gum on physicochemical and textural properties of gluten-free batter and bread. In 10th *International Conference on Simulation and Modelling in the Food and Bio-Industry* (pp. 204-209). EUROSIS. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.05.070>
- Fatima, S. W., y Khare, S. K. 2018. Current insight and futuristic vistas of microbial transglutaminase in nutraceutical industry. *Microbiological research*, 215, 7-14. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2018.06.001>
- Gadallah, M. G. 2017. Rheological, organoleptical and quality characteristics of gluten-free rice cakes formulated with sorghum and germinated chickpea flours. *Food and Nutrition Sciences*, 8(5), 535-550. <https://doi.org/10.4236/fns.2017.85037>
- Gamboa, L., González, M., y Hurtado, E. 2007. Valoración nutricional y sensorial de panquecas elaboradas a base de harina de trigo (*Triticum aestivum* L.) zanahoria (*Daucus carota* L.). *IDESIA* (Arica). 25: 47-52. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292007000100005>
- Gómez, M., Oliete, B., Rosell, C. M., Pando, V., y Fernández, E. 2008. Studies on cake quality made of wheat-chickpea flour blends. *LWT-Food Science and Technology*, 41(9), 1701-1709. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.11.024>
- Gómez, M., Ronda, F., Caballero, P.A., Blanco, C. A., y Rosell, C. M. 2007. Functionality of different hydrocolloids on the quality and shelf-life of yellow layer cakes. *Food Hydrocolloids*. 21: 167-173. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2006.03.012>
- Gusmão, T. A. S., de Gusmão, R. P., Moura, H. V., Silva, H. A., Cavalcanti-Mata, M. E. R. M., y Duarte, M. E. M. 2019. Production of prebiotic gluten-free bread with red rice flour and different microbial transglutaminase concentrations: modeling, sensory and multivariate data analysis. *Journal of food science and technology*, 56(6), 2949-2958. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03769-8>

- Haas, R. V., Homem, R. V., Farias, D. V., Schmidt, H. D. O., Rockett, F. C., Venzke, J. G., ... y Oliveira, V. R. D. 2022. Potential of teff (*Eragrostis tef*) flour as an ingredient in gluten-free cakes: chemical, technological and sensory quality. *International Journal of Food Science & Technology*, 57(4), 2051-2059. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15431>
- Honda, Y., Inoue, N., Kurita, M., y Okunishi, T. 2021. Alpha-glutelin degradation and its hydrolysate by protease enhance the specific volume of gluten-free rice starch bread. *Journal of Cereal Science*, 102, 103338. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.103338>
- Hussein, A. M., Hegazy, N. A., y Ibrahim, T. A. 2012. Production and evaluation of gluten-free cakes. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 6(12), 482-491. <https://www.ajbasweb.com/old/ajbas/2012/Nov%202012/482-491.pdf>
- Jafari, M., Koocheki, A., y Milani, E. 2017. Effect of extrusion cooking of sorghum flour on rheology, morphology and heating rate of sorghum–wheat composite dough. *Journal of Cereal Science*, 77, 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.07.011>
- Kohajdová, Z., Karovičová, J., y Schmidt, Š. 2009. Significance of emulsifiers and hydrocolloids in bakery industry. *Acta Chimica Slovaca*. 2(1), 46-61. https://acs.fchpt.stuba.sk/papers/acs_0035.pdf
- Lazaridou, A., Duta, D., Papageorgiou, M., Belc, N., y Biliaderis, C. G. 2007. Effects of hydrocolloids on dough rheology and bread quality parameters in gluten-free formulations. *Journal of food engineering*, 79(3), 1033-1047. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.03.032>
- Lerner, A., Matthias, T. (2020). Processed food additive microbial transglutaminase and its cross-linked gliadin complexes are potential public health concerns in celiac disease. *International journal of molecular sciences*, 21(3), 1127. <https://doi.org/10.3390/ijms21031127>
- Liu, X., Mu, T., Sun, H., Zhang, M., Chen, J., y Fauconnier, M. L. 2018. Influence of different hydrocolloids on dough thermo-mechanical properties and in vitro starch digestibility of gluten-free steamed bread based on potato flour. *Food Chemistry*, 239, 1064-1074. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.047>
- Ma, M., Mu, T., Sun, H., y Zhou, L. 2022. Evaluation of texture, retrogradation enthalpy, water mobility, and anti-staling effects of enzymes and hydrocolloids in potato steamed bread. *Food Chemistry*, 368, 130686. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130686>
- Mandala, I., Karabela, D., y Kostaropoulos, A. 2007. Physical properties of breads containing hydrocolloids stored at low temperature. I. *Effect of chilling*. *Food hydrocolloids*. 21(8), 1397-1406. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2006.11.007>
- Manisha, G., Soumya, C., y Indrani, D. 2012. Studies on interaction between stevioside, liquid sorbitol, hydrocolloids and emulsifiers for replacement of sugar in cakes. *Food Hydrocolloids*. 29(2), 363-373. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.04.011>
- Marston, K., Khouryieh, H., y Aramouni, F. 2016. Effect of heat treatment of sorghum flour on the functional properties of gluten-free bread and cake. *LWT-Food Science and Technology*., 65, 637-644. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.08.063>

- Matuda, T. G., Chevallier, S., de Alcântara Pessôa Filho, P., LeBail, A., y Tadini, C. C. 2008. Impact of guar and xanthan gums on proofing and calorimetric parameters of frozen bread dough. *Journal of cereal science*, 48(3), 741-746. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2008.04.006>
- Monteiro, J. S., Farage, P., Zandonadi, R. P., Botelho, R. B., de Oliveira, L. D. L., Raposo, A., ... & Araújo, W. M. 2021. A systematic review on gluten-free bread formulations using specific volume as a quality indicator. *Foods*, 10(3), 614. <https://doi.org/10.3390/foods10030614>
- Montes-García, N., Williams-Alanís, H., Moreno-Gallegos, T., Cisneros-López, M. E., & Pecina-Quintero, V. 2012. 'RB-Paloma', variedad de sorgo blanco para producción de grano y forraje. *Rev fitotec mex.* 35(2), 185-187. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-73802012000200011&script=sci_arttext
- Motahar, S. F. S., Ariaeenejad, S., Salami, M., Emam-Djomeh, Z., y Mamaghani, A. S. A. 2021. Improving the quality of gluten-free bread by a novel acidic thermostable α -amylase from metagenomics data. *Food Chemistry*, 352, 129307. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129307>
- Ndlovu, E., van Staden, J., y Maphosa, M. 2021. Morpho-physiological effects of moisture, heat and combined stresses on Sorghum bicolor [Moench (L.)] and its acclimation mechanisms. *Plant Stress*, 2, 100018. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2021.100018>
- Ng'uni, D., Geleta, M., Johansson, E., Fatilh, M., y Bryngelsson, T. 2011. Characterization of the Southern African sorghum varieties for mineral contents: prospects for breeding for grain mineral dense lines. *African Journal of Food Science*. 5: 436-445. https://academicjournals.org/article/article1379604100_Ng%C3%BAni%20et%20al.pdf
- Onyango, C., Mutungi, C., Unbehend, G., y Lindhauer, M. G. 2010. Rheological and baking characteristics of batter and bread prepared from pregelatinised cassava starch and sorghum and modified using microbial transglutaminase. *Journal of Food Engineering*. 97(4), 465-470. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.11.002>
- Ozturk, O. K., y Mert, B. 2018. The use of microfluidization for the production of xanthan and citrus fiber-based gluten-free corn breads. *LWT*, 96, 34-41. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.05.025>
- Pathaw, P. M. S., Mahanta, C. L., y Bhattacharya, S. 2021. Characteristics of gluten-free rice batter and baked cake made from the flour of heat-moisture-treated paddy of pigmented rice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(3), e15206. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15206>
- Phattanakulkaewmorie, N., Paseephol, T., y Moongngarm, A. 2011. Chemical compositions and physico-chemical properties of malted sorghum flour and characteristics of gluten free bread. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 5(7), 532-538. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1080728>
- Preichardt, L. D., Vendruscolo, C. T., Gularte, M. A., y Moreira, A. D. S. 2011. The role of xanthan gum in the quality of gluten free cakes: improved bakery products for coeliac patients. *International journal of food science & technology*, 46(12), 2591-2597. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2011.02788.x>

- Renzetti, S., Dal, B. F., y Arendt, E. K. 2008. Microstructure, fundamental rheology and baking characteristics of batters and breads from different gluten-free flours treated with a microbial transglutaminase. *Journal of Cereal Science*. 48:33-45. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2007.07.011>
- Rodríguez, C. G., Lizarazo, C., Ortega, A. G. P., García, N. M., y Salazar, R. R. 2018. Effects of transglutaminase on the proximal and textural properties of gluten-free bread of sorghum and quinoa. *Rev. la Fac. Agron*, 35(2), 188-201. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/agronomia/articulo/view/27271/27905>
- Ronda, F., Gómez, M., Caballero, P. A., Oliete, B., y Blanco, C. A. 2009. Improvement of quality of gluten-free layer cakes. *Food Science and Technology International*. 15: 193-202. <https://doi.org/10.1177/1082013208105170>
- Safavi, N., & Gharekhani, M. (2019). The Effect of Sodium Caseinate and Microbial Transglutaminase Enzyme on Rheological, Physical and Sensorial Properties of Corn-based Gluten Free Bread. *Research and Innovation in Food Science and Technology*, 7(4), 365-376. <https://doi.org/10.22101/JRIFST.2019.02.23.742>
- Sasaki, T. 2022. Influence of xanthan gum and gluten on in vitro digestibility and textural properties of rice bread. *Int J food sci technol*. 57(4), 2376-2383. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15593>
- Schoenlechner, R., Szatmari, M., Bagdi, A., y Tömösközi, S. 2013. Optimisation of bread quality produced from wheat and proso millet (*Panicum miliaceum* L.) by adding emulsifiers, transglutaminase and xylanase. *LWT-Food Science and Technol*. 51: 361-366. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.10.020>
- Shih, F. F., Truong, V. D., y Daigle, K. W. 2006. Physicochemical properties of gluten-free pancakes from rice and sweet potato flours. *Journal of Food Quality*. 29: 97-107. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.2005.00059.x>
- Singh, J. P., Kaur, A., y Singh, N. 2016. Development of eggless gluten-free rice muffins utilizing black carrot dietary fibre concentrate and xanthan gum. *Journal of Food Science and Technology*, 53(2), 1269-1278. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-2103-x>
- Sung, W. C., Chiu, E. T., Sun, A., y Hsiao, H. I. 2020. Incorporation of chia seed flour into gluten-free rice layer cake: effects on nutritional quality and physicochemical properties. *Journal of Food Science*, 85(3), 545-555. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14841>
- Sung, W. C., y Chai, P. S. 2017. Effect of flaxseed flour and xanthan gum on gluten-free cake properties. *Journal of Food and Nutrition Research*, 5(10), 717-728. <https://doi.org/10.12691/jfnr-5-10-1>
- Sutrisno, A., Yuwono, S. S., y Ikarini, I. 2021. Effect of glucomannan and xanthan gum proportion on the physical and sensory characteristic of gluten-free bread. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 924, No. 1, p. 012028). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/924/1/012028>
- Tan, M. C., Chin, N. L., y Yusof, Y. A. 2011. Power ultrasound aided batter mixing for sponge cake batter. *Journal of Food Engineering*. 104: 430-437. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.01.006>

- Turabi, E., Sumnu, G., y Sahin, S. 2008. Rheological properties and quality of rice cakes formulated with different gums and an emulsifier blend. *Food Hydrocolloids*. 22: 305-312. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2006.11.016>
- Vedantam, S. K., Sagili, J. L., Dikkala, P. K., y Sridhar, K. 2021. Functional, thermal, pasting, and rheological properties of gluten-free maize composite flour: Effect of moth bean flour and hydrocolloid addition. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(12), e16104. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16104>