

Efecto de la formulación sobre la calidad del pan sin gluten con plátano verde y *Brosimum alicastrum*

Effect of the formulation on the quality of gluten-free bread with unripe plantain and *Brosimum alicastrum*

Lizbeth Alejandra Fernández-Martínez¹ , Enrique Sauri-Duch¹ , Carlos Rolando Ríos-Soberanis² , Gabriel Lizama-Uc¹ , Radamés Trejo-Valencia¹ , Víctor Manuel Moo-Huchin^{1*} 

¹Instituto Tecnológico de Mérida. Carretera Mérida-Progreso Km. 5, CP. 97120. Mérida, Yucatán, México.

²Centro de Investigación Científica de Yucatán, Calle 43 No. 130 x 32 y 34, CP. 97205. Mérida, Yucatán, México.

*Autor de correspondencia: victor.mh@merida.tecnm.mx

Nota científica

Recibido: 23 de enero 2024

Aceptado: 12 de julio 2024

RESUMEN. El objetivo de este estudio fue evaluar diferentes niveles de ingredientes y tiempos de mezclado para elaborar pan sin gluten con buena calidad física. El pan sin gluten se elaboró con harina compuesta de plátano verde y *B. alicastrum* con diferente nivel de agua (entre 80 y 115 mL), enzima transglutaminasa (entre 0.10 y 1.5%), concentrado proteico de calabaza (entre 1.0 y 10.0%) y tiempo de mezclado (entre 1.0 y 10 min). Se encontró que la variación del nivel de cada ingrediente y el tiempo de mezclado tiene un efecto significativo sobre el volumen específico, el porcentaje de área de alvéolos y la densidad alveolar. Se obtuvo pan con buena calidad física (volumen específico 1.62 cm³ g⁻¹, 1.40 alvéolos mm⁻² y 23.98% área alveolar) a partir de 115 mL de agua, 0.5% de enzima, 2% de concentrado proteico y un tiempo de mezclado de 3 min.

Palabras clave: Miga, concentrado proteico, calabaza, harina sin gluten, transglutaminasa.

ABSTRACT. The objective of this study was to evaluate different levels of ingredients and mixing times to elaborate gluten-free bread with good physical quality. The gluten-free bread was processed with flour composed of unripe plantain and *B. alicastrum* with different levels of water (between 80 and 115 mL), transglutaminase enzyme (between 0.10 and 1.5%), pumpkin protein concentrate (between 1.0 and 10.0%) and mixing time (between 1.0 and 10 min). It was found that varying the level of each ingredient and the mixing time has a significant effect on the specific volume, the percentage of alveoli area and the alveolar density. Bread with good physical quality (specific volume 1.62 cm³ g⁻¹, 1.40 alveoli mm⁻² and 23.98% alveolar area) was obtained from 115 mL of water, 0.5% enzyme, 2% protein concentrate and a time of 3 min mixing.

Key words: Crumb, protein concentrate, pumpkin, gluten-free flour, transglutaminase.

Como citar: Fernández-Martínez LA, Sauri-Duch E, Ríos-Soberanis CR, Lizama-Uc G, Trejo-Valencia R, Moo-Huchin VM (2024) Efecto de la formulación sobre la calidad del pan sin gluten con plátano verde y *Brosimum alicastrum*. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 11(3): e3986. DOI: 10.19136/era.a11n3.3986.

INTRODUCCIÓN

El pan es un alimento básico en todo el mundo y se utiliza una variedad de ingredientes y métodos de producción. El trigo es el grano principal para elaborar pan y contiene gluten que se compone de dos grupos de proteínas: glutenina y gliadina (Jacinto *et al.* 2020). El gluten proporciona funcionalidad a la matriz alimentaria e induce características específicas relacionadas con el desarrollo de una estructura de masa cohesiva y elástica. Además, el gluten imparte propiedades reológicas únicas a los productos horneados con levadura, cuya ausencia resulta en un importante inconveniente tecnológico (Nunes *et al.* 2020).

La enfermedad celíaca (EC) afecta al 1.4% de la población mundial, debido al consumo de productos que contienen gluten (trigo, cebada, centeno, entre otros) (Jacinto *et al.* 2020). La EC se caracteriza por una respuesta autoinmune con síntomas, que incluye inflamación del intestino delgado, el tratamiento de los pacientes celíacos consiste en evitar el consumo de alimentos que contengan gluten (Hernández-Aguirre *et al.* 2019). Actualmente, un número creciente de consumidores que no han sido diagnosticados con enfermedad celíaca pero que están eliminando el gluten de su dieta como una opción de estilo de vida saludable está aumentando (Nunes *et al.* 2020). Sin embargo, la disponibilidad de pan sin gluten de buena calidad es limitada y es un área nueva para la industria alimentaria (Hernández-Aguirre *et al.* 2019).

El pan sin gluten muestra una textura quebradiza, color poco atractivo y otros problemas de calidad. El uso de harina sin gluten reduce la retención de gas y dificulta la obtención de un pan con alto volumen (Jacinto *et al.* 2020). Los consumidores prefieren un pan suave y fresco con una corteza dorada y una miga uniforme. Además, el pan sin gluten elaborado con almidón carece de diversos nutrientes y micronutrientes, como proteínas, fibra, minerales, vitaminas y antioxidantes (Utarova *et al.* 2024). Pero es posible añadir ingredientes estructurales (almidones, harina sin gluten, hidrocoloides, proteínas y aditivos) a la formulación de un pan libre de gluten con el propósito de mejorar su calidad, valor nutricional y capacidad antioxidante (Santamaria *et al.* 2023).

Un ingrediente alternativo al almidón en la formulación de un pan sin gluten es la harina rica en almidón resistente debido a sus beneficios para la salud y sus propiedades organolépticas (Nguyen *et al.* 2023). El plátano verde (*Musa paradisiaca* L.) se considera como una buena fuente de almidón resistente (30-40%) y su harina se ha utilizado como materia prima para modificar la textura y consistencia de los alimentos y producir alimentos de digestión lenta (Maseko *et al.* 2024). Además, el pan sin gluten se puede fortificar añadiendo otras harinas alternativas con propiedades antioxidantes. Como el árbol *B. alicastrum* (también conocido como Ramón) el cual produce semillas que se muelen para obtener harina libre de gluten y con alta capacidad antioxidante (Aguilar-Piloto *et al.* 2023). Además, la harina obtenida de las semillas se caracteriza por un alto contenido de fibra dietética, compuestos fenólicos y proteínas, la cual puede ser utilizada en un futuro como alimento funcional en México (Trujillo-Nava *et al.* 2023).

Se han investigado varios ingredientes estructurales en relación con la calidad del pan sin gluten, incluida la adición de diferentes hidrocoloides que pueden imitar las propiedades del gluten. También se ha utilizado psyllium (rica en fibra soluble), productos lácteos, huevo y proteínas de leguminosas como soya, chícharos y garbanzo (Tomić *et al.* 2020). Además, algunas enzimas

comerciales se incluyen en el pan sin gluten como reticulante, como la transglutaminasa. Esto favorece la formación de enlaces isopeptídicos mediante el entrecruzamiento de los grupos amino y acilo de las proteínas, mejorando el volumen y la textura del pan sin gluten (Kolotylo *et al.* 2023). Las proteínas y enzimas mejoran el comportamiento viscoelástico de la masa, aumentan su capacidad para retener gas durante el horneado e influyen en la expansión de la masa, lo que da como resultado un pan con mejor textura y aceptación sensorial (Santos *et al.* 2020). Por lo tanto, para el desarrollo de panes sin gluten, es importante evaluar otras fuentes de proteína vegetal no explotadas, como las semillas de calabaza chihua (*Cucurbita argyrosperma* Huber). La semilla de calabaza chihua es importante cultural y económicamente en la gastronomía del sureste de México, siendo una rica fuente de ácidos grasos, proteínas, fibra y minerales (Can-Cauich *et al.* 2021). De acuerdo con Ruiz-García *et al.* (2020), las semillas de *C. argyrosperma* muestran un alto contenido de proteínas (26-32%), lo que las convierte en un material alternativo para la obtención de un concentrado proteico como ingrediente estructural en pan libre de gluten. Considerando el creciente costo de la harina de trigo, la incidencia de la EC, los defectos de calidad de los panes sin gluten y el interés por el uso de harinas alternativas, el objetivo de la investigación fue evaluar la influencia de diferentes ingredientes y el tiempo de mezclado sobre la calidad física del pan sin gluten elaborado con harina compuesta de plátano verde y *B. alicastrum*. Este estudio contribuirá a generar opciones viables para el mercado de pan sin gluten.

MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención de ingredientes, concentrado proteico y enzima

La harina de semilla de *B. alicastrum* (HBA) (tamizado con una malla No. 100) se obtuvo del Laboratorio de Desarrollo de Alimentos del Instituto Tecnológico de Mérida, Yucatán (21°00'44" LN y 89°37'20" LO). La composición química proximal de HBA fue de 9.10, 4.05, 16.03, 1.77 y 24.84% para humedad, cenizas, proteínas, grasa cruda y fibra dietética total, respectivamente. La harina de plátano verde (HPV) se compró en la empresa Tabashito (Tabasco, México). El tamaño de partícula de HPV se redujo a través de un tamiz de malla No. 100 y la composición química de HPV fue de 9.07, 2.66, 4.24, 0.96 y 8.87% para humedad, cenizas, proteínas, grasa cruda y fibra dietética total, respectivamente.

La enzima transglutaminasa Moo Gloo RM se adquirió de Modernist Pantry LLC (Francia). Se utilizó levadura fresca *Saccharomyces cerevisiae*. Los siguientes ingredientes se compraron en un supermercado en Mérida, Yucatán, México: sal, azúcar estándar y aceite de oliva.

La semilla de calabaza chihua (sin cáscara) (*C. argyrosperma* Huber) se adquirió en el mercado Lucas De Galvéz en Mérida, Yucatán, México. Las semillas (sin cáscara) se prensaron mecánicamente con un tornillo (Komet CA59G, IBG Monforts Oekotec GmbH and Co. KG, Mönchengladbach, Germany) para eliminar parte del aceite siguiendo el procedimiento descrito por Can-Cauich *et al.* (2019). Luego, el aceite restante se eliminó mediante la extracción asistida por ultrasonidos (CScientific CS-UB100, México). Para lo cual, se mezclaron 10 g de semillas (previamente prensadas) con 90 mL de etanol (95%) y la muestra se colocó en un baño de ultrasonido. Las condiciones de extracción fueron 90% de amplitud, 30 °C y 50 min. Luego la muestra se filtró para

recuperar la harina y se secó en un horno de convección (FE-291, México) a 45 °C durante 72 h. Después del secado, la harina de la semilla de calabaza se procesó en un Nutribullet® (NBR-0601, 600 W, México), la harina resultante se utilizó para la obtención de un concentrado proteico mediante extracción alcalina y precipitación isoelectrica, según el procedimiento descrito por Shevkani *et al.* (2015).

Elaboración del pan HPV-HBA

Los ingredientes secos se mezclaron con la levadura fresca a velocidad 1 durante 1 min utilizando una batidora KitchenAid® Professional (Kitchen Aid, St., Joseph, Michigan, EE. UU.) con un accesorio batidor plano. A la mezcla se le añaden los ingredientes húmedos, primero aceite de oliva y luego agua a 35 °C. Se mezcló nuevamente a velocidad 2 durante 3 min. La masa homogénea se vertió en moldes antiadherentes (8.8 cm de largo x 3.8 cm de alto) y se fermentó durante 45 min a 35 °C con 85% de humedad relativa. Después de la fermentación, la masa se horneó en un horno eléctrico Black & Decker® (Black and Decker Inc. Baltimore, USA) a 190 °C durante 35 min (previo calentamiento del horno durante 15 min). Después de hornear, el pan se desmoldó, se enfrió a 25 °C durante 1 h y luego se analizó.

Experimento de un solo factor

Se realizó un experimento de un solo factor para determinar el nivel de cada ingrediente en la formulación para aumentar el volumen específico, el porcentaje de área de alvéolos y la densidad alveolar del pan. Los cuatro factores estudiados fueron la cantidad de agua, el tiempo de mezclado, la concentración de enzima transglutaminasa y la concentración del concentrado proteico de la semilla de calabaza chihua. Para cada tratamiento se consideró como base para el cálculo 100 g de harina compuesta de harina de plátano verde (88% p/p) y *B. alicastrum* (12% p/p). El agua (80, 90, 100, 110 y 115 mL), la enzima (0.1, 0.3, 0.5, 1.0 y 1.5%) y el concentrado proteico (1, 2, 5, 8 y 10%) se expresaron con base en 100 g de harina compuesta. Los niveles de tiempo de mezclado evaluados fueron 1, 3, 6, 8 y 10 min. Cada factor se probó en cinco niveles para un total de 20 experimentos, variando el nivel de un factor mientras se mantenía constante el nivel del otro factor. Para cada formulación de pan (con base en 100 g de harina compuesta) se utilizaron 3 g de aceite de oliva, 5 g de azúcar, 3 g de levadura fresca y 2 g de sal.

Volumen específico

El volumen específico de pan se determinó mediante el método de desplazamiento de mijo. El volumen específico ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$) se calculó como volumen (cm^3)/peso (g) de pan (Xie *et al.* 2022).

Estructura de la miga del pan

Se utilizó el análisis de imágenes para evaluar la estructura de la miga del pan siguiendo el procedimiento descrito por Scheuer *et al.* (2015). Se tomó una rebanada (de 1 cm de espesor) del centro de cada pan y se escaneó utilizando un escáner (Epson Perfection V200 Photo modelo J231C, USA). Las imágenes fueron analizadas con el software ImageJ v. 1.44c. Los valores de píxeles se convirtieron en unidades de distancia utilizando valores de longitud conocidos. Las imágenes fueron procesadas y convertidas a escala de grises de 8 bits con posterior ajuste del umbral, de las cuales se extrajeron y calcularon las siguientes propiedades de la miga de pan: el área de alvéolos

expresado como el porcentaje (%) del área total y la densidad alveolar reportado como el número de alvéolos por el área total analizada (mm²).

Análisis estadístico

Los resultados se analizaron mediante el análisis de varianza ANOVA unidireccional y cuando se detectaron diferencias estadísticas se realizó la comparación de medias mediante el método de Tukey ($p \leq 0.05$) utilizando el paquete estadístico Statgraphic® Centurión XVI (Manugistic, Inc., Rockville, MD, USA). Los resultados son el promedio de tres réplicas y se presentan en la figura como promedio y desviación estándar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 1 muestra que la variación del nivel del agua afectó significativamente la estructura y volumen específico del pan sin gluten elaborado con harina compuesta de plátano verde y *B. alicastrum* (HPV-HBA). El nivel de hidratación de la masa varía entre formulación de un pan y es un factor importante relacionado con el volumen específico como un indicador de la calidad del pan (Monteiro *et al.* 2021). En este estudio se encontró que el volumen específico del pan aumentó significativamente ($p \leq 0.05$) de 1.45 a 1.63 cm³ g⁻¹ al aumentar la cantidad de agua en la masa de 80 mL a 115 mL, respectivamente (Figura 1A). Este aumento de volumen específico está relacionado con la mayor interacción entre los componentes de la harina (almidón de plátano verde y almidón de *B. alicastrum*) y el agua, lo que provoca una mayor hidratación y efecto plastificante del agua, favoreciendo la expansión de la masa después de la fermentación (Srirejeki *et al.* 2018).

Al igual que con el volumen específico, al aumentar la cantidad de agua en la masa aumentó ($p \leq 0.05$) el porcentaje de área ocupada por los alvéolos (de 3.90 a 24.49%) y la densidad alveolar de la miga (de 0.85 a 1.12 alvéolos mm⁻²) del pan (Figura 1B y 1C, respectivamente). Este efecto se produce porque la interacción del almidón y el agua conduce a la formación de alvéolos interconectados en forma de red, formados por regiones ricas en amilosa y amilopectina, lo que aumenta la rigidez de los alvéolos y contribuye a la estructura final de la miga del pan (Gallagher 2008). Además Myhrvold y Migoya (2017) informó que durante el horneado, el agua de la masa se convierte en vapor y las burbujas de dióxido de carbono formadas durante la fermentación se expanden para formar la estructura final de la miga del pan. Con base en los resultados, se determinó que agregar 115 mL de agua en la formulación de pan HPV-HBA fue el mejor tratamiento.

Otro factor estudiado es el tiempo de mezclado de la masa (Figura 2), en donde el volumen específico del pan analizado resultó mayor (de 1.41 a 1.87 cm³ g⁻¹) ($p \leq 0.05$) a medida que se incrementó el tiempo (Figura 2A). Al respecto, Elgeti *et al.* (2015) explicaron que se incorpora aire en la masa de pan durante el mezclado. Mientras que O'shea *et al.* (2014) informaron que a medida que aumenta el tiempo de mezclado aparecen burbujas de gas más grandes y aumenta el volumen específico del pan, tal como se observó en esta investigación. Como resultado, estas grandes burbujas de aire conducen a la formación de pan con alvéolos de gran tamaño y mayor fracción de aire retenida (Cauvain 2007). El mayor volumen específico (alrededor de 1.9 cm³ g⁻¹) ($p \leq 0.05$) se

alcanzó entre los 8 y 10 min de mezclado, y el mayor porcentaje de área ocupada por los alvéolos (30.68%) se obtuvo a los 10 min de mezclado ($p \leq 0.05$) (Figura 2B). Desde un punto de vista tecnológico, se espera que un producto de panadería tenga un mayor volumen específico y una mayor fracción de alvéolos. Esto se debe a que afecta la percepción de suavidad del pan por los consumidores (Meybodi *et al.* 2015). El aumento excesivo de la fracción alveolar aumenta el tamaño de los alvéolos, reduciendo la densidad alveolar y la uniformidad, dando como resultado un pan con miga muy abierta, que visualmente puede ser rechazado por el consumidor (Villanueva *et al.* 2021). Mientras que Genevois-Carolina y De Escalada-Pla (2021) sugieren la obtención de panes con una estructura de miga compacta, con una alta densidad alveolar y al mismo tiempo con una distribución uniforme de los alvéolos. En este estudio, el pan HPV-HBA mostró una menor densidad alveolar (0.82 alvéolos mm^{-2}) a los 10 min de mezclado, mientras que el valor más alto ($p \leq 0.05$) se observó a los 3 min (1.25 alvéolos mm^{-2}) (Figura 2C). Por tanto, en el siguiente experimento de un solo factor, el tiempo de mezclado se fijó en 3 min.

La Figura 3 muestra que al añadir entre 0.5 y 1.0% de enzima transglutaminasa a la formulación se exhibió mayor ($p \leq 0.05$) volumen específico del pan (Figura 3A) (1.63 $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$), mayor fracción de aire de la miga (Figura 3B) (entre 25.38 y 26.44%, respectivamente) y valores de la densidad alveolar del pan entre 1.18 y 1.11 alvéolos mm^{-2} (Figura 3C), respectivamente. Además, se encontró que la adición de 1.5% de la enzima reduce significativamente el volumen específico (1.50 $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$) y la densidad alveolar del pan (0.98 $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$), debido a la alta reticulación de las proteínas, aumentando la resistencia de la masa a la expansión del gas (Moradi *et al.* 2021). El nivel de adición de la enzima necesario para formar una buena estructura de la miga de pan sin gluten depende de la fuente de proteína disponible, en donde, los residuos de aminoácidos como la lisina y la glutamina son los sustratos más eficientes para la reacción de entrecruzamiento catalizada por la enzima transglutaminasa (Gaspar y De Góes-Favoni 2015). En este estudio, la estructura del pan HPV-HBA sin gluten fue mejorado mediante el uso del concentrado proteico de calabaza y la presencia de enzima transglutaminasa al 0.5%. Por lo tanto, en los siguientes experimentos, la concentración de enzima se fijó en 0.5%.

El efecto de los niveles de adición de concentrado proteico de semilla de calabaza chihua en la formulación de un pan HPV-HBA se puede observar en la Figura 4. La adición de 2-5% de concentrado proteico aumentó significativamente el volumen específico del pan (Figura 4A), alrededor de 1.6 $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$, pero niveles superiores al 5% redujeron significativamente el porcentaje de área ocupada por alvéolos (18.87%) (Figura 4B) y el volumen específico (1.49 $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$). Cuando se adicionaron 2% de concentrado proteico a la formulación se observó una tendencia a incrementar la densidad alveolar del pan (Figura 4C) (1.41 alvéolos mm^{-2}). Lo que coincide con Phongthai *et al.* (2016), quienes encontraron que suplementar un pan sin gluten con 2% de concentrado de proteína de salvado de arroz dio un porcentaje de área de alvéolos de 21.47%, valor que es similar a lo obtenido en este estudio (23.98%). Otro estudio encontró que la adición de albúmina de huevo y proteína de papa al pan elaborado con almidón de maíz aumentaba el volumen específico en comparación con el uso de otras fuentes de proteínas como arroz, soya y lupino (2-4%) (Waziroh *et al.* 2023). La capacidad de los alvéolos para formarse y retener gas está relacionada con el tipo de proteína involucrada. Estas proteínas deben poder hincharse y desnaturalizarse a altas temperaturas de tal forma que puedan proporcionar un soporte estructural

al almidón (Ziobro *et al.* 2013). Las proteínas extraídas de las semillas de calabaza ya han mostrado propiedades funcionales como alta solubilidad, capacidad espumante y retención de agua (Vinayashree y Vasu 2021). La propiedad espumante de la proteína tiene la capacidad de disminuir la tensión superficial, aumentar la estabilidad del sistema de múltiples fases y aumentar la retención de gas (Horstmann *et al.* 2017). Algunos autores consideran que si la masa del pan se vuelve demasiado fuerte, la expansión del gas será limitada y, finalmente, el aumento de la elasticidad de la masa puede reducir la retención de gas, lo que afectará la formación de miga de pan (Ziobro *et al.* 2016). Con base en los resultados, se determinó que agregar un 2% de concentrado de proteína de calabaza chihua a la fórmula fue el mejor tratamiento para este experimento de un solo factor.

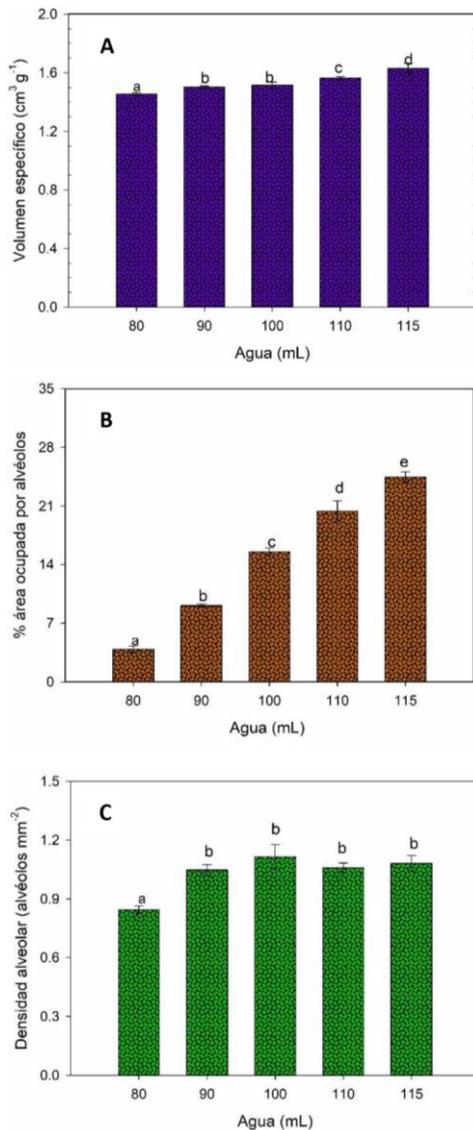


Figura 1. Influencia de la cantidad de agua incorporada a la masa de pan sin gluten (HPV-HBA). A) Volumen específico, B) Porcentaje de área ocupada por alvéolos y C) Densidad alveolar.

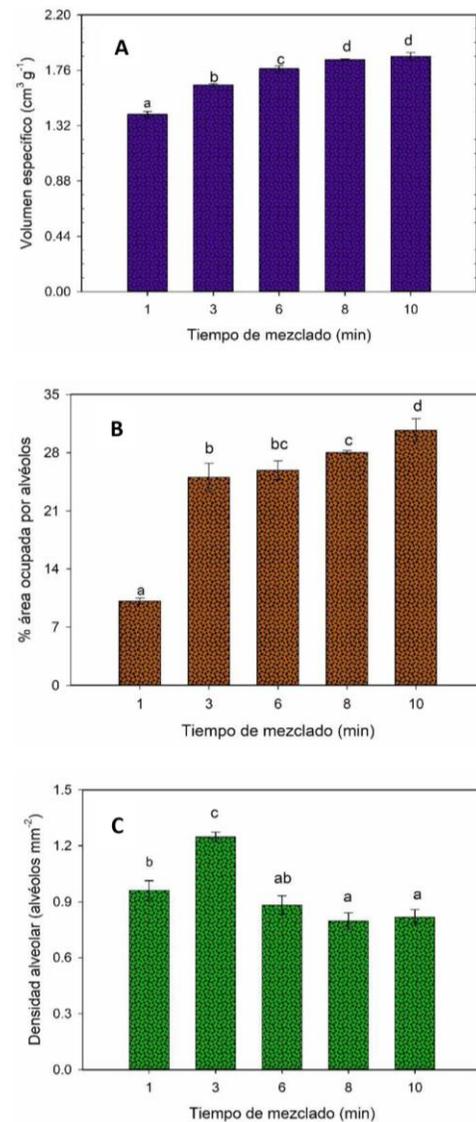


Figura 2. Influencia del tiempo de mezclado de la masa de pan sin gluten (HPV-HBA). A) Volumen específico, B) Porcentaje de área ocupada por alvéolos y C) Densidad alveolar.

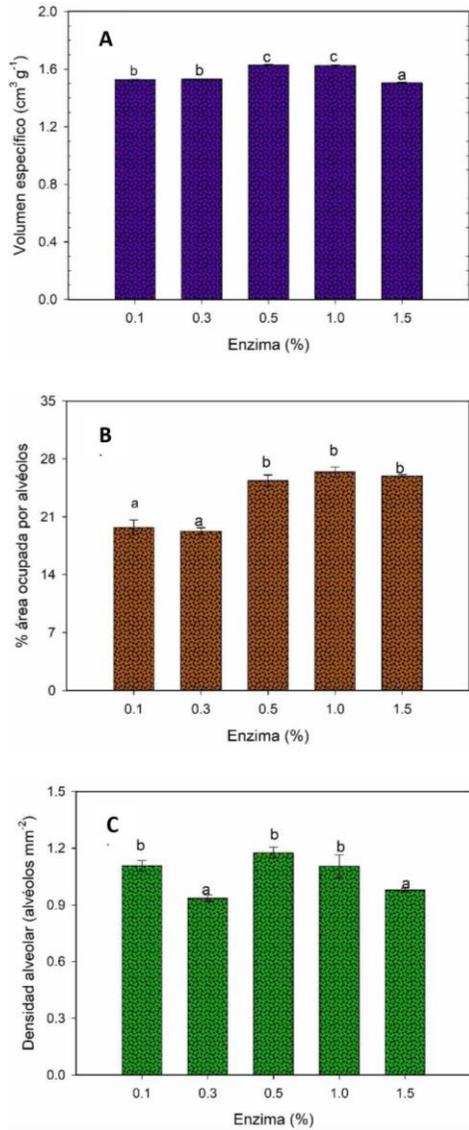


Figura 3. Influencia de la enzima transglutaminasa incorporada a la masa de pan sin gluten (HPV-HBA). A) Volumen específico, B) Porcentaje de área ocupada por alvéolos y C) Densidad alveolar

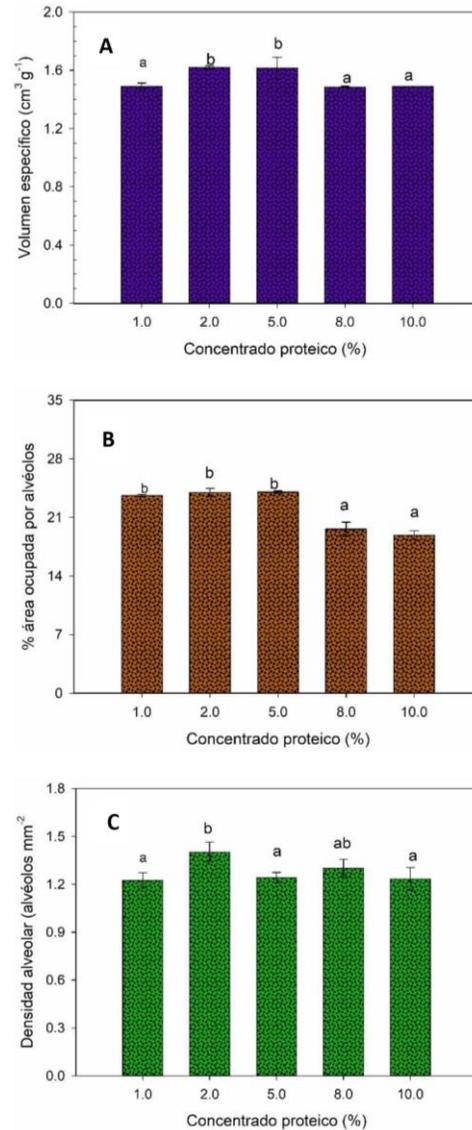


Figura 4. Influencia del concentrado proteico de calabaza incorporada a la masa de pan sin gluten (HPV-HBA). A) Volumen específico, B) Porcentaje de área ocupada por alvéolos y C) Densidad alveolar

Los factores investigados (enzima, concentrado de proteínas de calabaza, agua y tiempo de mezclado) influyeron significativamente en el volumen específico, el porcentaje de área de alvéolos y la densidad alveolar del pan HPV-HBA. El experimento de un solo factor arrojó un tratamiento para la elaboración de un pan sin gluten con buena calidad de miga a partir de harina compuestas de plátano verde y *B. alicastrum*. Esto implica agregar 115 mL de agua, 0.5% de enzima, 2% de concentrado de proteína de calabaza chihua y un tiempo de mezclado de 3 min. Esta investigación contribuirá al desarrollo de nuevos productos de panadería sin gluten utilizando harinas alternativas e ingredientes novedosos.

AGRADECIMIENTOS

Al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento del proyecto 17120.23-P “Desarrollo y evaluación de un pan libre de gluten con harina compuesta de plátano verde y *Brosimum alicastrum* para mejorar las propiedades antioxidantes y calidad de la miga”.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

LITERATURA CITADA

- Aguilar-Piloto G, Negrón-Díaz AC, Huchin VMM, Ramírez-Sucre MO, Delgadillo-Díaz M, Cuevas-Glory LF, Sauri-Duch E (2023) Ultrasound-assisted extraction (UAE) of phenolic compounds from *Brosimum alicastrum* fruit and their antioxidant capacity. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 10(NEIII): 3655. <https://doi.org/10.19136/era.a10nNEIII.3655>
- Can-Cauich C, Sauri-Duch E, Cuevas-Glory L, Betancur-Ancona D, Ortiz-Vázquez E, Ríos-Soberanis C, Chel-Guerrero L, González-Aguilar G, Moo-Huchin V (2021) Physicochemical properties and stability of pumpkin seed oil as affected by different extraction methods and species. *International Food Research Journal* 28(1): 148-160. <https://doi.org/10.47836/ifrj.28.1.15>
- Can-Cauich C, Sauri-Duch E, Moo-Huchin VM, Betancur-Ancona D, Cuevas-Glory LF (2019) Effect of extraction method and specie on the content of bioactive compounds and antioxidant activity of pumpkin oil from Yucatan, Mexico. *Food Chemistry* 285: 186-193. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.153>
- Cauvain SP (2007) Bread—the product. In: Cauvain SP, Young LS (eds) *Technology of breadmaking*. Springer. Boston, MA, USA. pp. 1-19. https://doi.org/10.1007/0-387-38565-7_1
- Elgeti D, Jekle M, Becker T (2015) Strategies for the aeration of gluten-free bread—A review. *Trends in Food Science & Technology* 46(1): 75-84. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.07.010>
- Gallagher E (2008) Formulation and nutritional aspects of gluten-free cereal products and infant foods. In: Arendt E, Dal Bello F (eds) *Gluten-free cereal products and beverages*. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands. pp. 321-346. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373739-7.X5001-1>
- Gaspar ALC, de Góes-Favoni SP (2015) Action of microbial transglutaminase (MTGase) in the modification of food proteins: A review. *Food Chemistry* 171(15): 315-322. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.019>
- Genevois-Carolina E, de Escalada-Pla MF (2021) Soybean by-products and modified cassava starch for improving alveolar structure and quality characteristics of gluten-free bread. *European Food Research and Technology* 247: 1477-1488. <https://doi.org/10.1007/s00217-021-03725-x>
- Hernández-Aguirre M, Islas-Hernández J, Sánchez-Pardo M, Rodríguez-Ambríz S, Osorio-Díaz P (2019) Response surface methodology for optimization of gluten-free bread made with unripe banana flour. *Journal of Food Measurement and Characterization* 13: 1652-1660. <https://doi.org/10.1007/s11694-019-00082-y>
- Horstmann SW, Foschia M, Arendt EK (2017) Correlation analysis of protein quality characteristics with gluten-free bread properties. *Food & function* 8(7): 2465-2474. <https://doi.org/10.1039/C7FO00415J>

- Jacinto G, Stieven A, Maciel MJ, Souza CFVd (2020) Effect of potato peel, pumpkin seed, and quinoa flours on sensory and chemical characteristics of gluten-free breads. *Brazilian Journal of Food Technology* 23. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.16919>
- Kolotylo V, Piwowarek K, Kieliszek M (2023) Microbiological transglutaminase: Biotechnological application in the food industry. *Open Life Sciences* 18(1): 20220737. <https://doi.org/10.1515/biol-2022-0737>
- Maseko KH, Regnier T, Meiring B, Wokadala OC, Anyasi TA (2024) Musa species variation, production, and the application of its processed flour: A review. *Scientia Horticulturae* 325: 112688. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112688>
- Meybodi N, Mohammadifar M, Feizollahi E (2015) Gluten-free bread quality: A review of the improving factors. *Journal of Food Quality & Hazards Control* 2(3): 81-85.
- Monteiro JS, Farage P, Zandonadi RP, Botelho RB, de Oliveira LdL, Raposo A, Shakeel F, Alshehri S, Mahdi WA, Araújo WM (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>
- Moradi M, Bolandi M, Arabameri M, Karimi M, Baghaei H, Nahidi F, Eslami Kanafi M (2021) Semi-volume gluten-free bread: effect of guar gum, sodium caseinate and transglutaminase enzyme on the quality parameters. *Journal of Food Measurement and Characterization* 15: 2344-2351. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-00823-y>
- Myhrvold N, Migoya F (2017) *Modernist bread*. 1 st Edition. Editorial The Cooking Lab. Spain. 2500p.
- Nguyen SN, Drawbridge P, Beta T (2023) Resistant starch in wheat-, barley-, rye-, and oat-based foods: A review. *Starch-Stärke* 75(9-10): 2100251. <https://doi.org/10.1002/star.202100251>
- Nunes MC, Fernandes I, Vasco I, Sousa I, Raymundo A (2020) Tetraselmis chuii as a sustainable and healthy ingredient to produce gluten-free bread: Impact on structure, colour and bioactivity. *Foods* 9(5): 579. <https://doi.org/10.3390/foods9050579>
- O'Shea N, Arendt E, Gallagher E (2014) State of the art in gluten-free research. *Journal of Food Science* 79(6): R1067-R1076. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12479>
- Phongthai S, D'Amico S, Schoenlechner R, Rawdkuen S (2016) Comparative study of rice bran protein concentrate and egg albumin on gluten-free bread properties. *Journal of Cereal Science* 72: 38-45. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.09.015>
- Ruiz-García JL, Villalobos-González A, Cetzal Ix W, López-Hernandez MB, Rangel-Fajardo MA, García-Sandoval JÁ (2020) Análisis proximal de accesiones de calabaza chihua en la Península de Yucatán. *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 11(8): 1725-1736. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i8.1931>
- Santamaria M, Garzon R, Rosell CM (2023) Gluten-free bakery products. In: Shewry P, Koksel H, Taylor JRN (eds) *ICC Handbook of 21st century cereal science and technology*. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands. pp. 385-390. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95295-8.00012-5>
- Santos FG, Aguiar EV, Centeno ACL, Rosell CM, Capriles VD (2020) Effect of added psyllium and food enzymes on quality attributes and shelf life of chickpea-based gluten-free bread. *LWT-Food Science and Technology* 134: 110025. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110025>
- Scheuer PM, Ferreira JAS, Mattioni B, Miranda MZd, Francisco Ad (2015) Optimization of image analysis techniques for quality assessment of whole-wheat breads made with fat replacer. *Food Science and Technology* 35: 133-142. <https://doi.org/10.1590/1678-457X.6560>
- Shevkani K, Singh N, Kaur A, Rana JC (2015) Structural and functional characterization of kidney bean and field pea protein isolates: A comparative study. *Food Hydrocolloids* 43: 679-689. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.07.024>
- Srirejeki S, Manuhara G, Amanto B, Atmaka W, Laksono P (2018) The effect of water volume and mixing time on physical properties of bread made from modified cassava starch-wheat composite flour. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 333(1): 012072. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/333/1/012072>

- Tomić J, Torbica A, Belović M (2020) Effect of non-gluten proteins and transglutaminase on dough rheological properties and quality of bread based on millet (*Panicum miliaceum*) flour. *LWT-Food Science and Technology* 118: 108852. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108852>
- Trujillo-Nava IJ, Negrete-Hernández J, García-Arrazola R, Dávila Ú, Gimeno M (2023) Characterization of the ramon tree seed (*Brosimum alicastrum* Swartz.) as a potential food source. *Agrociencia* 57(7): 1-16. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v57i7.2771>
- Utarova N, Kakimov M, Gajdzik B, Wolniak R, Nurtayeva A, Yeraliyeva S, Bembenek M (2024) Development of gluten-free bread production technology with enhanced nutritional value in the context of Kazakhstan. *Foods* 13(2): 271. <https://doi.org/10.3390/foods13020271>
- Villanueva M, Abebe W, Collar C, Ronda F (2021) Tef [*Eragrostis tef* (Zucc.) Trotter] variety determines viscoelastic and thermal properties of gluten-free dough and bread quality. *LWT-Food Science and Technology* 135: 110065. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110065>
- Vinayashree S, Vasu P (2021) Biochemical, nutritional and functional properties of protein isolate and fractions from pumpkin (*Cucurbita moschata* var. Kashi Harit) seeds. *Food Chemistry* 340(15): 128177. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128177>
- Waziroh E, Bender D, Jäger H, Schönlechner R (2023) Ohmic baking of gluten-free bread: role of non-gluten protein on GF bread structure and properties. *International Journal of Food Science & Technology* 58(2): 595-609. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16206>
- Xie X, Cai K, Yuan Z, Shang L, Deng L (2022) Effect of mealworm powder substitution on the properties of high-gluten wheat dough and bread based on different baking methods. *Foods* 11(24): 4057. <https://doi.org/10.3390/foods11244057>
- Ziobro R, Juszczak L, Witczak M, Korus J (2016) Non-gluten proteins as structure forming agents in gluten free bread. *Journal of Food Science and Technology* 53: 571-580. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-2043-5>
- Ziobro R, Witczak T, Juszczak L, Korus J (2013) Supplementation of gluten-free bread with non-gluten proteins. Effect on dough rheological properties and bread characteristic. *Food Hydrocolloids* 32(2): 213-220. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.01.006>