

PARÁMETROS FÍSICOS Y PREDICCIÓN DE TEXTURA UTILIZANDO MACHINE LEARNING EN FORMULACIONES DE PANES MULTIGRANO CON EXTRACTO DE YERBA MATE

DILIANA LUNA HERNÁNDEZ¹; BRUNA HARTWIG LINDEMANN²; SAVANA PEREIRA DE MEDEIROS³, LAYLA DAMÉ MACEDO⁴, BIANCA PIO AVILA⁵, MARCIA AROCHA GULARTE⁶

¹Universidad de Córdoba, Colombia – Dlunahernandez56@correo.unicordoba.edu.co

²Universidade Federal de Pelotas – brunalindemann701@gmail.com

³Universidade Federal de Pelotas – sahpereiramedeiros@gmail.com

⁴Universidade Federal de Pelotas – layladame@hotmail.com

⁵Universidade Federal de Pelotas – biancaagronomia@yahoo.com.br

⁶Universidade Federal de Pelotas – marciagularte@hotmail.com

1. INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de alimentos con propiedades funcionales ha impulsado a la industria de la panificación a incorporar ingredientes que mejoren tanto el perfil nutricional como las características funcionales de sus productos (PAUCARCHUCO et al., 2023). Entre estos ingredientes, destacan los cereales, pseudocereales y hierbas, que han demostrado un alto potencial para el enriquecimiento y mejora de las formulaciones de productos horneados, respondiendo a las expectativas de los consumidores que buscan alimentos más saludables (NAVARRO; PEREIRA, 2020; SOSTER et al., 2021a).

Dentro de este contexto, *Ilex paraguariensis* A., conocida popularmente como yerba mate, ha ganado relevancia como materia prima en el desarrollo de productos alimentarios funcionales, ampliando su uso más allá de las tradicionales bebidas como el chimarrão, té y tereré, en las que estuvo confinada durante años (CHAICOUSKI; LAZZAROTTO, 2021). La yerba mate, rica en antioxidantes y compuestos bioactivos, ha sido evaluada por su potencial para mejorar las propiedades físicas, tecnológicas y sensoriales de productos de panificación cuando se incorpora en distintos formatos, como polvo o extracto (COVINICH, 2021; SOSTER et al., 2021a).

La creciente investigación en aprendizaje automático e Inteligencia Artificial (IA) se ha vuelto evidente en el sector de procesamiento de alimentos. Estos métodos ofrecen ventajas significativas, como la validación de la estandarización de productos alimenticios y la optimización de parámetros necesarios para su procesamiento, incluyendo la selección adecuada de materias primas (KHAN, 2022). El aprendizaje automático, o *Machine Learning* (ML) por sus siglas en inglés, es una rama de la IA que permite a los sistemas aprender y mejorar automáticamente a partir de la experiencia, sin programación explícita (ARAÚJO et al., 2023). Esta tecnología ha demostrado ser efectiva para el análisis y modelado de datos en diversos campos, incluida la ciencia y la ingeniería de alimentos, facilitando decisiones informadas basadas en grandes volúmenes de datos y optimizando la calidad y funcionalidad de los productos (CHHETRI, 2024).

Este trabajo tiene como objetivo evaluar los parámetros físicos de dos formulaciones de pan multigrano con la adición de extracto de yerba mate y predecir su textura a partir de *Machine Learning* (aprendizaje automático).

2. METODOLOGÍA

El estudio se realizó en el Laboratorio de Panificación de la Universidad Federal de Pelotas, donde se formularon dos variantes de pan multigrano, diferenciadas por el contenido de extracto de yerba mate: la formulación A con 15% y la B con 10%, manteniendo los mismos ingredientes base. El extracto se obtuvo mediante la infusión de 100 g de yerba mate en 400 ml de agua a 50°C durante 10 minutos. La preparación del pan incluyó la mezcla de ingredientes secos, la adición de agua y levadura, seguida de la fermentación y cocción. La evaluación de las características físicas incluyó medir el color de la miga con un colorímetro Minolta, determinar el volumen específico por desplazamiento de semillas y analizar el número de alvéolos de la miga utilizando el software ImageJ.

Para predecir la dureza y cohesividad de las muestras, se aplicó el modelo Random Forest Regressor, que combina múltiples árboles de decisión. Luego, se utilizó el clasificador KNN para categorizar las muestras en "blanda", "media" y "dura". El modelo fue entrenado con datos de un pan sin yerba mate, utilizando las bibliotecas Pandas, Numpy, Scikit-learn y Matplotlib para el análisis y la visualización de los datos. Se emplearon métricas como MSE, MAE y R² para evaluar el rendimiento del modelo e identificar los factores que influyen en la textura de los panes.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 presenta los resultados de los análisis de colorimetría, volumen, masa y volumen específico de los panes FA y FB, elaborados con 15% y 10% de extracto de yerba mate, respectivamente.

Tabla 1. Resultados de colorimetría, volumen, masa y volumen específico de los panes FA (15% extracto de yerba mate) y FB (10% extracto de yerba mate).

Muestra	COLOR			Volumen (cm ³)	Volumen Específico (cm ³ /g)	Masa Húmeda (g)	Masa Seca (g)
	L*	a*	b*				
FA	48.116 ± 2.039	-6.470 ± 0.1656	21.048 ± 0.923 ^{ns}	163.67 ± 0.577	1.730 ± 0.291 ^{ns}	112.38 ± 12.28 ^{ns}	94.63 ± 15.94 ^{ns}
FB	60.156 ± 1.481	-1.760 ± 0.2928	20.621 ± 0.564 ^{ns}	155.67 ± 0.577	1.690 ± 0.116 ^{ns}	109.25 ± 7.48 ^{ns}	92.13 ± 6.29 ^{ns}

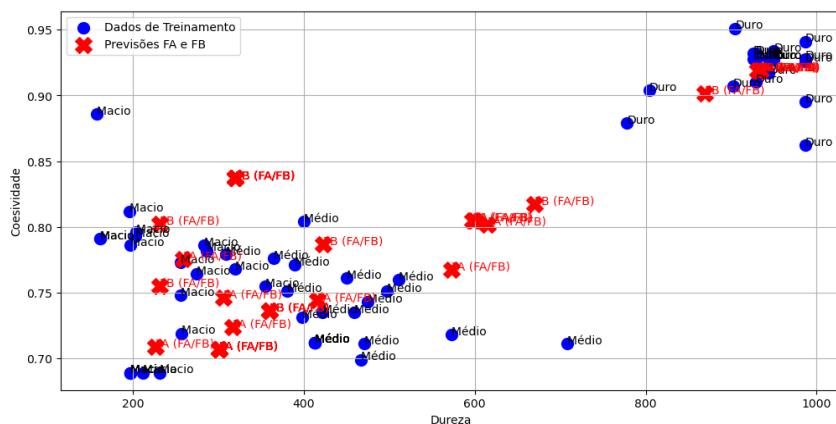
Media ± desviación estándar. No significativo (NS) por prueba t (p<0,05)

El análisis colorimétrico mostró diferencias significativas entre las formulaciones, principalmente en los parámetros L* (luminosidad) y a* (componente rojo-verde). La formulación con 15% de extracto de yerba mate (FA) tuvo un menor valor de L* (48,11) en comparación con la de 10% (FB), que presentó 60,15, indicando un mayor oscurecimiento en FA debido a la mayor concentración de extracto. El valor de a* fue más negativo en FA (-6,470) que en FB (-1,760), sugiriendo un tono más verdoso en la muestra con mayor cantidad de yerba mate. Estos resultados coinciden con lo observado por KNAPP et al. (2019), quienes también reportaron una reducción en los valores de L* y a* con el aumento de la concentración de extracto de yerba mate. Este efecto se atribuye a los compuestos

fenólicos y pigmentos naturales, como la clorofila, presentes en la yerba mate (OHTAKI et al., 2023). El volumen del pan fue ligeramente mayor en FA ($163,67 \text{ cm}^3$) en comparación con FB ($155,67 \text{ cm}^3$), posiblemente debido a la mayor hidratación proporcionada por el extracto de yerba mate. Sin embargo, el volumen específico no mostró diferencias significativas entre las formulaciones (FA: $1,730 \text{ cm}^3/\text{g}$; FB: $1,690 \text{ cm}^3/\text{g}$). Estudios sugieren que ingredientes antioxidantes, como la yerba mate, no afectan significativamente el volumen o la textura del pan (COVINICH, 2021; SOSTER et al., 2021b, 2021a). Además, la fibra de la quinua y la linaza puede mejorar la estabilidad de la red de gluten, mientras que la prehidratación de las semillas de chía con el extracto forma un gel que retiene mejor el agua y aumenta la elasticidad de la masa, favoreciendo una textura uniforme y estable (KESHANI et al., 2023).

Ambas formulaciones presentaron resultados similares en cuanto a la masa húmeda (FA: 112,38 g; FB: 109,25 g) y masa seca (FA: 94,63 g; FB: 92,13 g), sin diferencias significativas. Esto sugiere que el contenido de yerba mate no tuvo un impacto en la retención de humedad ni en el proceso de deshidratación del pan después de la cocción.

Figura 1 – Relación entre Dureza y Cohesividad: Datos Reales vs. Predicciones (FA y FB)



El gráfico comparativo entre los datos de entrenamiento y las predicciones para las muestras FA y FB muestra que el modelo Random Forest fue eficaz al estimar la dureza y cohesividad en función del número de poros. La buena correlación entre los datos reales (círculos azules) y las predicciones (cruces rojas) indica que el modelo capturó adecuadamente las características de textura, mostrando que ambas muestras, a pesar de sus diferencias de formulación, presentaron una textura similar (de blanda a media), probablemente debido a la similitud en ingredientes y cantidad de poros.

Esta similitud textural, atribuida al uso de ingredientes comunes y un proceso de producción uniforme, fue respaldada por las métricas de rendimiento del modelo, que demostraron un excelente ajuste entre las estimaciones y los datos reales. Con un MAE de 0,22, un MSE de 0,15 y un R^2 de 0,98, se confirma la precisión del modelo para predecir la textura de panes similares basándose en la cantidad de poros y sus características sensoriales.

4. CONCLUSIONES

El uso de extracto de yerba mate en panes afecta significativamente las características colorimétricas, aumentando el oscurecimiento y modificando el tono, pero no influye en el

volumen específico ni en las masas húmeda y seca. A pesar de las diferencias visuales, las propiedades texturales se mantuvieron similares. Además, el modelo Random Forest mostró ser eficaz para predecir la dureza y coesividad del pan a partir de la cantidad de poros, destacando el potencial de la inteligencia artificial para optimizar y personalizar el desarrollo de nuevos productos alimentarios.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, S. O. et al. Machine Learning Applications in Agriculture: Current Trends, Challenges, and Future Perspectives. **Agronomy** 2023, v. 13, n. 12, p. 2976, 2023.
- CHAICOUSKI, A.; LAZZAROTTO, M. Aplicabilidade de extractos de erva-mate (*Ilex paraguariensis*) em diferentes alimentos. **Evidência**, v. 21, n. 1, p. 49–62, 28 jul. 2021.
- CHHETRI, K. B. Applications of Artificial Intelligence and Machine Learning in Food Quality Control and Safety Assessment. **Food Engineering Reviews**, v. 16, n. 1, p. 1–21, 2024.
- COVINICH, M. Parámetros físicos, químicos y sensoriales de panes formulados con un subproducto de la industrialización de la yerba mate. 2021. 1–85 f. Tesis de Maestría presentada para obtener el título de “Magíster en Tecnología de los Alimentos” – Universidad Nacional de Misiones, Posadas, Misiones.
- KESHANI, P. et al. Nutritional Effects of Adding Quinoa to Bread: A Systematic Review. **Shiraz E Medical Journal**, v. 24, n. 5, p. 1-10, 2023
- KHAN, R. Artificial intelligence and machine learning in food industries: A study. **J Food Chem Nanotechnol**, v. 7, n. 3, p. 60–67, 2022.
- KNAPP, M. A. et al. Yerba mate extract in active starch films: Mechanical and antioxidant properties. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 43, n. 3, p. e13897, 2019.
- NAVARRO, J.; PEREIRA, S. Elaboración y caracterización de pan de molde a base de harina de chia y quinua. **Revista GIPAMA**, v. 2, n. 1, p. 44–53, 2020.
- OHTAKI, V. M. et al. Ultra-refined yerba mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil) as a potential naturally colored food ingredient. **Scientia Agricola**, v. 80, 2023.
- PAUCARCHUCO, J. et al. Pan funcional enriquecido con harina de quinua negra germinada (*Chenopodium quinoa*) y berries andinos Tarmeños. **Advances in Science and Innovation**, v. 2, n. 2, p. 1–9, 2023.
- SOSTER, G.; VOLPATO, M.; et al. Effect of yerba mate (*Ilex paraguariensis*) leaves on dough properties, antioxidant activity, and bread quality using whole wheat flour. **Journal of Food Science**, v. 86, n. 10, p. 4354–4364, 2021a.
- SOSTER, G.; VOLPATO, M; et al. The addition of yerba mate leaves on bread dough has influences on fermentation time and the availability of phenolic compounds? **LWT**, v. 146, p. 1-9, 202b.