

ESTUDIO DE VIDA ÚTIL DEL PAN DE MOLDE CON QUINUA Y SUERO LÁCTEO MEDIANTE ANÁLISIS DE FRACTALES

Paniagua, J
Vilcapoma, W
De la cruz, W
Pillaca, S

Ingeniería en Industrias Alimentarias-Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgia

Resumen

El análisis de fractales, que evalúa los cambios estructurales en una imagen, se utilizó como un método no destructivo para analizar la vida útil del pan de molde enriquecido con quinoa y suero lácteo. Para ello, se adquirieron 758 imágenes con un intervalo de tiempo de 0,5 horas utilizando un sistema de adquisición de imágenes desarrollado para este propósito con una tarjeta Arduino UNO. Estas imágenes fueron analizadas mediante una macro en el software ImageJ 1.53k para obtener los valores de la dimensión fractal. Además, se realizaron análisis fisicoquímicos para correlacionar el deterioro del pan. Los resultados mostraron dos puntos de inflexión significativos en los valores de la dimensión fractal a aproximadamente 200 y 285 horas, señalando cambios notables en la textura y estructura del pan, posiblemente relacionados con el deterioro. Se observó una correlación entre los valores de la dimensión fractal y los análisis de humedad, que mostraron una disminución respecto al valor inicial. Del mismo modo, se correlacionó la inflexión a 285 horas con la aparición de mohos. Finalmente, se destacó la importancia de una iluminación adecuada para obtener resultados precisos en el análisis de imágenes y se subrayó la relevancia de seleccionar el canal de color apropiado. Estas metodologías ofrecieron una comprensión más profunda del comportamiento del pan de molde enriquecido con harina de quinoa y suero lácteo, proporcionando información valiosa para futuras investigaciones sobre su conservación y calidad.

Palabras claves: Análisis de imágenes, ImageJ, dimensión fractal, pruebas no destructivas, Arduino UNO.

STUDY ON THE SHELF LIFE OF QUINOA AND WHEY BREAD USING FRACTAL ANALYSIS

Abstract

Fractal analysis, which assesses structural changes in an image, was employed as a non-destructive method to analyze the shelf life of quinoa and whey-enriched sandwich bread. For this purpose, 758 images were captured at 0.5-hour intervals using an image acquisition system designed with an Arduino UNO board. These images were analyzed using a macro in ImageJ 1.53k software to obtain fractal dimension values. Additionally, physicochemical analyses were conducted to correlate the bread's deterioration. Results indicated two significant inflection points in fractal dimension values at approximately 200 and 285 hours, indicating noticeable changes in texture and structure, potentially linked to spoilage. A correlation was observed between fractal dimension values and moisture analyses, which showed a decrease compared to the initial value. Similarly, the inflection at 285 hours correlated with mold appearance. Lastly, the importance of adequate lighting for accurate image analysis was emphasized, along with the relevance of selecting the appropriate color channel. These methodologies provided a deeper understanding of the behavior of quinoa and whey-enriched sandwich bread, offering valuable insights for future research on its preservation and quality.

Keywords: Image analysis, ImageJ, fractal dimension, non-destructive testing, Arduino UNO.

I. INTRODUCCIÓN

La quinoa (*Chenopodium quinoa*), un cultivo ancestral de las regiones andinas de América del Sur, se ha extendido a diversos países como Estados Unidos, Canadá, China e India, y es altamente valorada por su contenido proteico y su perfil nutricional rico en aminoácidos esenciales (Repo-Carrasco-Valencia et al., 2010; Stikic et al., 2012). Paralelamente,

el suero de leche, aunque es un subproducto nutritivo de la industria del queso que contiene minerales y proteínas valiosas, es frecuentemente desechado en los efluentes debido a la falta de aplicaciones industriales eficientes para su aprovechamiento (Navpreet et al., 2020). La combinación de estos dos ingredientes en la elaboración de pan de molde no solo aprovecha sus propiedades nutritivas, sino que también contribuye a una producción alimentaria

más sostenible, al reducir el desperdicio y mejorar el valor nutricional del pan (Elías et al., 2011).

Para determinar la vida útil de productos de panadería, tradicionalmente se han empleado métodos mayormente destructivos como análisis microbiológicos, pruebas de dureza, mediciones de humedad y métodos espectrofotométricos (Al-Ansi et al., 2022) the impact of highland barley germination on bread-making performance, shelf-life, and nutritional value was evaluated. Highland barley was germinated for 24, 48, and 72 h. Results showed that germination produced a functional bread with significantly enhanced nutritional value, as well as antimicrobial and antioxidant properties. Consuming 100 g of germinated highland barley bread per day provides the required minimum daily intake of β -glucan and γ -aminobutyric acid (GABA. Estos métodos, aunque efectivos, pueden ser costosos y laboriosos, y a menudo requieren la destrucción de las muestras analizadas. Además, se utilizan técnicas no destructivas como la evaluación de aceptabilidad sensorial y la medición del color mediante instrumentación (Korcari et al., 2021), que permiten evaluar la calidad del producto sin dañarlo.

Los métodos de análisis de la dimensión fractal (FD) permiten evaluar cambios en la imagen capturada de muestras específicas, abordando tanto cambios de color como alteraciones estructurales en alimentos como plátanos, champiñones, peras, manzanas (Al-Dairi et al., 2024; Quevedo et al., 2016) browning incidence, and grayscale values using machine vision to describe the bruise magnitude and quality of mechanically damaged 'Fard' bananas bruised from 20, 40, 60 cm drop heights by 66, 98, and 110 g ball weights conditioned at different storage temperatures (5, 13, 22 °C e incluso en productos hidrobiológicos (Chen & Feng, 2020). Estos métodos no solo proporcionan una herramienta para estudiar la evolución física de los alimentos durante el almacenamiento, sino que también permiten modelar la vida útil de estos productos de manera más precisa y detallada (Quevedo et al., 2016) pears and apples. In this study, three independent repetitions were fulfilled to describe enzymatic browning kinetic by using two colorimetric methods: (1. De este modo, la FD se ha mostrado eficaz para identificar cambios sutiles en la estructura de los alimentos, que pueden estar relacionados con su deterioro y calidad.

La importancia de esta investigación radica en la aplicación de pruebas no destructivas, utilizando el análisis de la FD para estudiar la vida útil del pan de molde con quinua y suero lácteo. El objetivo del presente estudio fue determinar la vida útil de

este pan mediante el análisis de la FD. Para ello, se caracterizaron los cambios físico-químicos (acidez total, color, humedad y actividad de agua) y se correlacionaron con el análisis de la FD en el pan de molde con quinua y suero lácteo. Esta investigación no solo aporta al conocimiento científico sobre la conservación de productos de panadería enriquecidos, sino que también tiene implicaciones prácticas para la industria alimentaria, mejorando la sostenibilidad y la calidad nutricional de los productos.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se llevó a cabo en el Laboratorio de Análisis de Alimentos y en el Centro Experimental de Panificación de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia (FIQM) de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga (UNSCH).

Elaboración del pan de molde

El pan de molde se preparó utilizando una sustitución parcial de harina de quinua y suero lácteo según lo descrito por Elías et al. (2011). La formulación consistió en 44,1 % de harina de trigo, 7,4 % de harina de quinua, 1,9 % de suero de leche, 1,1 % de sal, 5,4 % de azúcar rubia, 1,6 % de levadura instantánea, 6,4 % de manteca vegetal y 32,1 % de agua. Tras el horneado a 180 °C durante 30 minutos, los panes se enfriaron y se cortaron en rebanadas de 1,4 cm de grosor. Las rebanadas se empaquetaron en bolsas de polipropileno, con dos rebanadas por bolsa, para su posterior almacenamiento y análisis.

Evaluación fisicoquímica del pan de molde

Determinación de acidez

Se siguió la metodología recomendada en la norma técnica peruana N° 206.013:1981 (INDECOPI, 1981). Para ello, se pesaron 10 g de la muestra (m) y se añadieron a 100 ml de agua destilada, previamente hervida y enfriada. La mezcla se agitó ocasionalmente cada 10 minutos durante 1 hora y luego se filtró en un matraz de 200 ml. A la solución filtrada se le añadieron 5 gotas de fenolftaleína y se tituló inmediatamente con una solución de NaOH 0,1 N (V). La acidez obtenida se expresó como porcentaje de ácido láctico, utilizando la Ecuación (1).

$$\text{Acidez (\%)} = (V \cdot 0,1 \cdot 0,090 \cdot 100) / m \quad (1)$$

Análisis de color

Se siguió la metodología utilizada por Moreno & Pizarro (2013). para medir el color de la miga del pan de molde. Usando un colorímetro (Lovibond, RT100, Germany) colocado en un ángulo de 90°, se obtuvieron los parámetros de color L*, a* y b*. Además, se obtuvo los valores de Chroma (C) y hue° según lo sugiere Vilcapoma et al. (2023) y McLellan et al. (1995).

Determinación de humedad

La humedad se determinó según el método AOAC 14004. Se pesaron 2,0 g de muestra (m_i) en placas Petri y se secaron en una estufa (Memmert GmbH) a $100 \pm 3^\circ\text{C}$ hasta masa constante (aproximadamente 5 horas). Luego se enfriaron en una desecadora a temperatura ambiente y se volvieron a pesar (m_f). La humedad se expresó como porcentaje y se utilizando la Ecuación (2) para su cálculo.

$\text{Humedad (\%)} = (m_i - m_f) / m_i * 100 \quad (2)$

Actividad de agua

Se realizó la medición siguiendo el procedimiento recomendado por Cairns et al. (2023) the FARMUs project had three primary pillars: Innovate, Scale, and Connect. The project aims to close the gap between industry and consumers by peaking interest in sorghum, its nutritional and sustainable benefits, and consumption of sorghum-based products. The primary focus of this study was to develop and scale-up three gluten-free sorghum-based products for Kansas State Dining Services. The secondary objective was to evaluate the sensory and physical properties of these products to provide developmental and research experience for students. Preliminary testing involved identifying optimum ratios of sorghum flour, xanthan gum, starch, and eggs for proper binding. Whipped egg whites were tested at different levels for product volume and texture. Repetition and reformulation of the products provided various renditions of each product. Quantity equipment needs, staffing feasibility, ingredient availability, and cost were determined. Dining staff evaluated each product and once recipes were finalized, parameters (color, specific gravity, internal temperature, moisture loss, height/width, water activity). Se colocaron aproximadamente 2 gramos de muestra en los recipientes correspondientes y se empleó un equipo de medición de actividad de agua (Rotronic Instrument Corp., EE.UU.).

Análisis sensorial

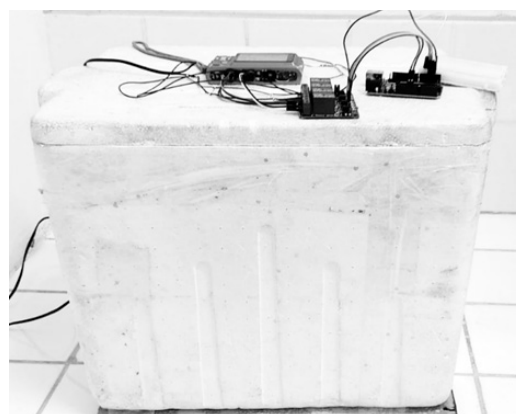
La evaluación sensorial fue realizada por panelistas previamente entrenados. Durante esta evaluación, los panelistas recibieron muestras de pan de molde complementado con harina de quinua y suero de leche en diferentes días de almacenamiento. Evaluaron la aceptabilidad general de cada muestra utilizando una escala hedónica semiestructurada de 9 puntos, valorando características como color, olor y sabor.

Determinación de la dimensión fractal (FD)

Sistema de adquisición de imágenes

La caja, diseñada con iluminación estandarizada según Quevedo et al. (2016) pears and apples. In this study, three independent repetitions were fulfilled to describe enzymatic browning kinetic by using two colorimetric methods: (1, albergaba una cámara fotográfica (Panasonic, Lumix, Japón) a 30 cm de la muestra. Dos lámparas LED a los lados aseguraban una iluminación uniforme. La activación de la cámara y las lámparas se programó cada 30 minutos mediante una tarjeta Arduino UNO, que controlaba automáticamente la captura de imágenes (Figura 11).

Figura 11.
Caja de adquisición de imágenes



Análisis de imágenes

Se empleó el software ImageJ versión 1.53k para llevar a cabo el análisis de imágenes (Muraleedharan et al., 2023). Para procesar cerca de 900 imágenes de manera eficiente, se desarrolló una macro que automatizó el análisis en lotes. Esta macro realizó varias etapas: en primer lugar, transformó las imágenes al sistema de color Yuv y luego separó exclusivamente el canal u*. A continuación, generó una escala de grises para facilitar el análisis. Finalmente, la macro ejecutó el análisis de la DF extrayendo la información relevante de las imágenes.

Análisis estadístico

Se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar las diferencias significativas ($\alpha=0,05$) de los resultados obtenidos (acidez, color, humedad, actividad de agua) con respecto al tiempo de almacenamiento. Posteriormente, se aplicó las comparaciones de medias por el método de Tukey usando el entorno de desarrollo integrado para R, Rstudio 2013.12.0 Build 369 (R Foundation for Statistical Computing, Viena, Austria). Se utilizó el programa Minitab® 18 (Pennsylvania, EE.UU) para determinar la vida útil, empleando la herramienta de pruebas de estabilidad.

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Características del pan de molde

El pan de molde obtenido presenta características comparables a las de los productos comerciales. Tanto el color de la corteza como el de la miga son uniformes y atractivos, lo cual es esencial para la aceptación del consumidor. La distribución homogénea de los alveolos en la miga indica una buena fermentación y una textura adecuada. Estos resultados sugieren que la incorporación de harina de quinua y suero lácteo no afecta negativamente las características físicas del pan de molde, manteniendo su calidad y atractivo visual.

Además, Elías et al. (2011) llevaron a cabo un análisis de aceptación del pan de molde con la incorporación de estos ingredientes. Los resultados mostraron que, a los tres días de fabricado el producto, no se registraron rechazos, lo que indica que las características sensoriales del pan de molde elaborado fueron aceptables. Esto refuerza la viabilidad de utilizar harina de quinua y suero lácteo en la elaboración de pan de molde sin comprometer su aceptación por parte de los consumidores.

Propiedades fisicoquímicas del pan de molde

Acidez total

A los ocho días de almacenamiento, se observa un ligero incremento en el valor de acidez (Tabla 3). Este aumento sugiere que, a medida que se prolonga el tiempo de almacenamiento, la acidez del producto también aumenta. Este fenómeno posiblemente se deba al crecimiento microbiológico, el cual puede causar un ligero incremento en la acidez de la muestra (Vegas-Niño & Argomedeo-Reyes, 2022). Estos resultados coinciden con los obtenidos por Bustamante (2022), quien también observó un aumento de acidez con el tiempo de almacenamiento. Así, se puede inferir que el incremento de la acidez se debe a cambios bioquímicos, como la transformación de

azúcares en ácidos orgánicos, tal como lo sugiere Fierro & Jara (2010). Sin embargo, este cambio no es significativo ($p>0,05$) en los resultados obtenidos para la acidez.

Color

El parámetro de color luminosidad (L^*) aumentó con el tiempo de almacenamiento, alcanzando su valor más alto el octavo día (Tabla 3). Rodríguez et al. (2018) reportaron valores de luminosidad entre 68,40 y 66,73, ligeramente superiores a los obtenidos en nuestro experimento. Esto podría deberse a la inclusión de harina de quinua y suero de leche en el pan de molde, lo que incrementa su contenido proteico. Este aumento en el contenido proteico puede provocar la reacción de pardeamiento no enzimático conocida como reacción de Maillard (Korcari et al., 2021), resultando en colores más oscuros en el pan de molde elaborado en esta investigación. Por otro lado, el valor C obtenido fue estadísticamente similar ($p>0,05$) y relativamente bajo (Tabla 3), lo que indica que se encuentra en la parte central del círculo cromático indicando que la saturación de color es pequeña (McLellan et al., 1995).

El valor hue° indica el ángulo y, por lo tanto, la ubicación del color en el círculo cromático. Al inicio del almacenamiento, el color se encuentra muy cercano al amarillo. Al cuarto día, se desplaza hacia el verde y, finalmente, al octavo día, el ángulo se sitúa entre los colores azul y verde (Tabla 3). Esta relación entre el ángulo y la ubicación del color en el círculo cromático fue mencionada por McLellan et al. (1995). Estos resultados mostraron cambios en la miga del pan de molde.

Tabla 3.
Datos de la acidez expresada en porcentaje (%) como ácido láctico

Análisis	DÍAS		
	0	4	8
Acidez	0,112 ± 0,0009 ^a	0,111 ± 0,001 ^a	0,113 ± 0,0009 ^a
Humedad	33,4 ± 0,007 ^a	23,8 ± 0,010 ^b	22,8 ± 0,104 ^c
aw	0,851 ± 0,001 ^b	0,865 ± 0,004 ^a	0,872 ± 0,003 ^a
L*	49,0 ± 1,47 ^c	53,6 ± 1,10 ^b	61,4 ± 4,89 ^a
a*	0,519 ± 0,232 ^a	0,236 ± 0,227 ^b	-0,19 ± 0,234 ^c
b*	8,97 ± 0,972 ^a	9,47 ± 0,712 ^a	9,15 ± 1,29 ^a
C	8,99 ± 0,967 ^a	9,48 ± 0,709 ^a	9,16 ± 1,28 ^a
Hue°	86,6 ± 1,64 ^b	129 ± 78,0 ^b	241 ± 70,0 ^a

Las letras minúsculas distintas en cada fila indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Humedad

La humedad es un factor determinante en la percepción sensorial de los productos, ya que influye en la textura, el sabor y la apariencia. Es así que, Cairns et al. (2023) the FARMUs project had three primary pillars: Innovate, Scale, and Connect. The project aims to close the gap between industry and consumers by peaking interest in sorghum, its nutritional and sustainable benefits, and consumption of sorghum-based products. The primary focus of this study was to develop and scale-up three gluten-free sorghum-based products for Kansas State Dining Services. The secondary objective was to evaluate the sensory and physical properties of these products to provide developmental and research experience for students. Preliminary testing involved identifying optimum ratios of sorghum flour, xanthan gum, starch, and eggs for proper binding. Whipped egg whites were tested at different levels for product volume and texture. Repetition and reformulation of the products provided various renditions of each product. Quantity equipment needs, staffing feasibility, ingredient availability, and cost were determined. Dining staff evaluated each product and once recipes were finalized, parameters (color, specific gravity, internal temperature, moisture loss, height/width, water activity) observaron que controlar la humedad mejoraba la calidad sensorial de los productos panarios. En nuestro estudio, la humedad disminuyó progresivamente, alcanzando un 22,8% al octavo día (Tabla 3). Esta disminución se correlaciona con cambios en las características físicas del pan de molde. La reducción de humedad es un patrón consistente durante el almacenamiento del pan. De manera similar, Al-Ansi et al. (2022) the impact of highland barley germination

on bread-making performance, shelf-life, and nutritional value was evaluated. Highland barley was germinated for 24, 48, and 72 h. Results showed that germination produced a functional bread with significantly enhanced nutritional value, as well as antimicrobial and antioxidant properties. Consuming 100 g of germinated highland barley bread per day provides the required minimum daily intake of β -glucan and γ -aminobutyric acid (GABA) encontraron que la humedad disminuye con el tiempo de almacenamiento, afectando también la calidad sensorial del pan.

Actividad de agua (aw)

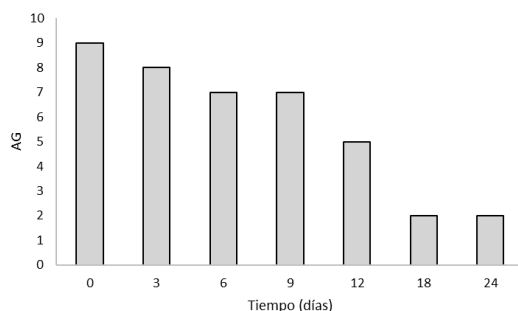
Los valores de actividad de agua obtenidos fueron relativamente similares a excepción de la muestra a cero días (Tabla 3). El valor de 0,872 obtenido al octavo día implica cierta posibilidad de crecimiento microbiano. Esto debido a que valores por debajo de 0,6 tienen mayor restricción al crecimiento de microorganismos que puedan perjudicar a las características del producto y al consumidor (Ocoro-Zamora & Ayala-Aponte, 2014). Por otra parte, se observó que la actividad de agua aumentó, mientras que la humedad se redujo. Este es un resultado contradictorio según lo reportó Al-Ansi et al. (2022) the impact of highland barley germination on bread-making performance, shelf-life, and nutritional value was evaluated. Highland barley was germinated for 24, 48, and 72 h. Results showed that germination produced a functional bread with significantly enhanced nutritional value, as well as antimicrobial and antioxidant properties. Consuming 100 g of germinated highland barley bread per day provides the required minimum daily intake of β -glucan and γ -aminobutyric acid (GABA).

Análisis sensorial

En la Figura 12 se puede apreciar que, según la escala hedónica, la aceptación general comienza con un valor de 9 y va disminuyendo a medida que pasan los días de almacenamiento del pan de molde. A partir del sexto día, se nota una disminución en la aceptación general, probablemente debido a la pérdida de humedad y una textura menos satisfactoria. Hacia el día 12 de almacenamiento, la aceptación general por parte de los panelistas disminuye significativamente, calificando el pan con un valor de cinco en la escala hedónica, justo en el límite de aceptación para el pan de molde. Esto se debe a la aparición de pequeñas manchas en el pan, indicando posiblemente el inicio del crecimiento de moho, lo cual se confirma en los días siguientes con la aparición de manchas verdes (moho). En los días posteriores, el moho en los panes de molde se incrementa, lo que lleva al rechazo por parte de los panelistas y a la obtención de puntajes bajos en la escala hedónica.

Figura 12.

Evaluación sensorial del pan de molde durante 24 días. AG: Aspecto general.



Durante la evaluación de la aceptación general del pan de molde a lo largo de los días de almacenamiento/evaluación, se encontraron diferencias altamente significativas ($p < 0,05$). Esto indica que existe una variación significativa en la percepción de la aceptación del pan de molde a medida que transcurre el período de almacenamiento/evaluación.

Vida útil del pan de molde

La Figura 13 muestra que la vida útil del pan de molde con sustitución parcial de harina de quinua y suero de leche es de 11,71 días, con un nivel de confianza del 95%, lo que equivale aproximadamente a 12 días. Este resultado es similar al estudio realizado por Elías et al. (2011), quien, utilizando la distribución de Weibull, determinó que la vida útil en anaquel del pan de molde con sustitución parcial de harina de quinua precocida y suero de leche es

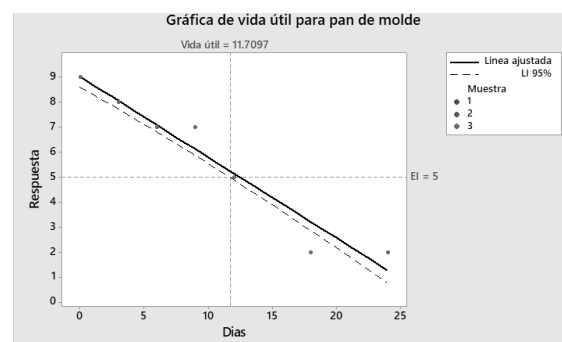
de 11,7 días.

Por otro lado, Bustamante (2022) encontró que la vida útil del pan de molde blanco es de entre 15,473 y 15,486 días, lo cual es superior a lo determinado en nuestra investigación. Esta diferencia probablemente se deba a los insumos o adjuntos utilizados en nuestro caso.

Normalmente, el pan de molde blanco elaborado comercialmente tiene una vida útil de más de 21 días, según su fecha de producción y vencimiento. Esto se debe principalmente al uso de conservantes, humectantes y otros aditivos que permiten alargar la vida útil del producto.

Figura 13.

Gráfica de vida útil de pan de molde



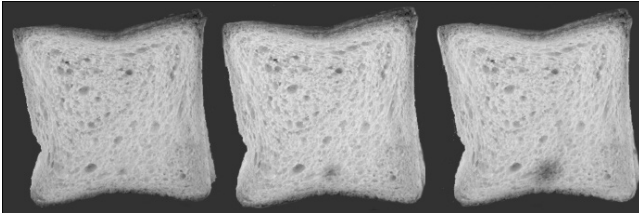
Dimensión fractal

Para asegurar una adquisición de imágenes uniforme y sin perturbaciones durante el análisis, se acondicionó una caja donde se colocaron las muestras (Figura 11). En este sentido, Pedreschi et al. (2006) mencionan que se deben de tomar en cuenta la iluminación y su intensidad, esta debe ser uniforme en toda la muestra para obtener mejores resultados. Además, la tarjeta Arduino UNO combinado con diferentes técnicas de análisis de imágenes pudieron brindar resultados satisfactorios (Flores et al., 2017). Es así que se pudo lograr resultados favorables con la imagen adquirida con este sistema (Figura 14).

El enmohecimiento de las muestras es claramente visible a medida que avanza el tiempo (Figura 14), lo cual representa un aspecto relevante para el análisis mediante fractales. Además de este cambio notable, existen cambios más sutiles que pueden ser detectados por la FD (Haralick et al., 1973). Estos cambios imperceptibles también son de interés para nuestra investigación.

Figura 14.

Imágenes adquiridas del pan de molde con respecto al tiempo



Una de las imágenes tratadas para el análisis de imágenes se muestra en la Figura 15. De manera visual podemos observar un punto con mayor coloración oscura. Y esto se ve reflejado en el análisis de imágenes realizadas a cada fotografía tomada de los panes de molde con respecto pasó el tiempo.

Figura 15.

Imagen en la escala de grises del pan de molde

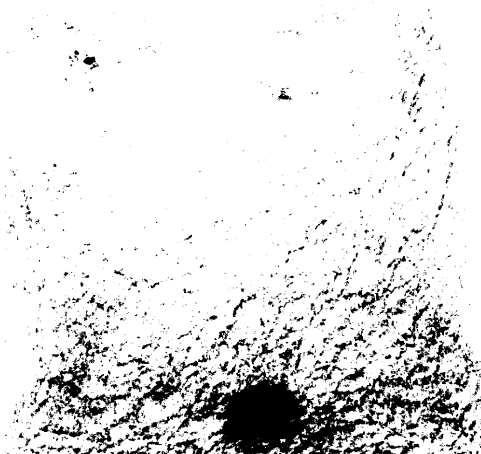
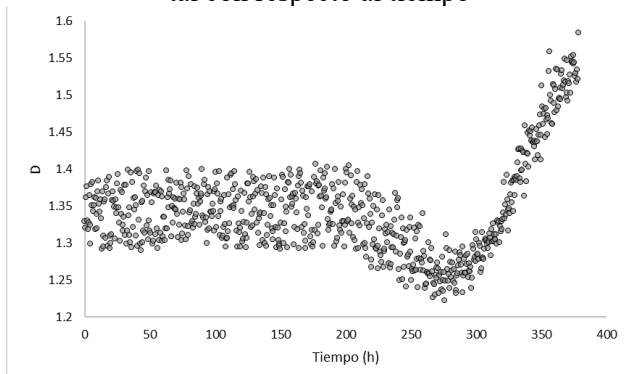


Figura 16.

Análisis de la dimensión fractal con respecto al tiempo



Al evaluar los valores obtenidos mediante el análisis fractal (D), se identificaron dos momentos en los que se observan cambios notables: aproximadamente a las 200 horas (octavo día) y a las 285 horas (duodécimo día) (Figura 16). Estos puntos de in-

flexión sugieren eventos significativos en la evolución de las características del pan de molde durante estos intervalos de tiempo, lo que podría estar relacionado con procesos como el deterioro, cambios en la textura o alteraciones en la estructura interna del pan. Esta información es crucial para comprender mejor el comportamiento del pan de molde complementado con harina de quinua y suero de leche a lo largo del tiempo.

Haralick et al. (1973) mencionan que el análisis de la FD es eficaz para detectar cambios en una imagen en comparación con un punto inicial, y este método es eficiente para trabajos que requieren la determinación de textura. En este sentido, se pudo relacionar estos resultados con los análisis de humedad (Tabla 3), donde se observa que la humedad es baja en comparación con el valor inicial. Asimismo, al duodécimo día del análisis, el análisis sensorial (Figura 12) reportó un bajo nivel de aceptación general y se observaron los primeros indicios de enmohecimiento (Figura 14).

IV. CONCLUSIONES

En los panes de molde con sustitución de quinua y suero lácteo, se observan varios cambios: una disminución en los valores de humedad e incremento de la actividad de agua. Del mismo modo, se observó un descenso en los valores de aceptación general según la escala hedónica, mientras que el color no muestra cambios significativos.

Se determinó que la vida útil del pan de molde parcialmente sustituido con harina de quinua y suero de leche es de 11,71 días, con un nivel de confianza del 95% y límites de especificación de 5,0. Además, utilizando pruebas no destructivas y análisis de imágenes fractales, se encontró que la vida útil del pan de molde complementado con harina de quinua y suero de leche es de 285 horas, equivalentes a 11,875 días.

Finalmente, se recomienda realizar estudios adicionales para desarrollar un modelo matemático que se ajuste a los datos de la dimensión fractal obtenida. Esto permitirá realizar simulaciones más precisas de la vida útil de los alimentos.

V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Ansi, W., Zhang, Y., Alkawry, T. A. A., Al-Adeeb, A., Mahdi, A. A., Al-Maqtari, Q. A., Ahmed, A., Mushtaq, B. S., Fan, M., Li, Y., Qian, H., Lianzhan, Y., Qifeng, P., & Wang, L. (2022). Influence of germination on bread-making behaviors, functional and shelf-life properties, and

- overall quality of highland barley bread. *LWT - Food Science and Technology*, 159, 113200. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113200>
- Al-Dairi, M., Pathare, P. B., Al-Yahyai, R., Jayasuriya, H., & Al-Attabi, Z. (2024). Banana fruit bruise detection using fractal dimension based image processing. *Food Chemistry*, 455(May), 139812. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139812>
- Bustamante, B. (2022). Aplicación de dos metodologías (de punto de corte y de riesgos acumulados de Weibull) para la determinación de la vida útil del pan de molde blanco. *Revista de Invest. Agropecuaria Science and Biotechnology*, 02(02), 25–38. <https://doi.org/10.24127/riagrop.20222.826>
- Cairns, A., Brazington, S., Gragg, E., Holmes, A., Vavra, C., Whitehair, K., & Getty, K. (2023). Development and scale-up of gluten-free sorghum-based bakery goods for K-state Dining Services. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14(November), 100840. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100840>
- Chen, Z., & Feng, A. (2020). The quality evaluation method of tilapia fillets stored at 3 and –2°C based on fractal dimension changes. *Journal of Food Process Engineering*, 43(7), e13407. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jfpe.13407>
- Elías, C., Salas V., W., De Mendiburu D, F., & De la Cruz Q., W. (2011). Estimación del tiempo de vida útil de pan de molde con incorporación de Harina de Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) y suero, usando la distribución de Weibull. *Anales Científicos*, 72(1), 27–33. <https://doi.org/10.21704/ac.v72i1.874>
- Fierro, H., & Jara, J. (2010). *Estudio de la vida útil del pan de molde blanco* [Escuela Superior Politécnica del Litoral]. <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/9093/1/TESINAES-POL.pdf>
- Flores, Á. M., Medina, A., Mayorquín, J., & García, O. (2017). Detección de Objetos a Color en Tiempo Real con Técnicas de Visión Artificial y Arduino. *Artículo Re-*
- vista de Prototipos Tecnológicos Marzo*, 3(7), 1–6. www.ecorfan.org/spain
- Haralick, R., Shanmugam, K., & Dinstein, I. (1973). Textural Features for Image Classification. *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*, 6, 610–621.
- INDECOPI. (1981). Determinación de la acidez. In *NTP 206.013:1981* (pp. 1–6).
- Korcari, D., Secchiero, R., Laureati, M., Marti, A., Cardone, G., Rabitti, N. S., Ricci, G., & Fortina, M. G. (2021). Technological properties, shelf life and consumer preference of spelt-based sourdough bread using novel, selected starter cultures. *LWT - Food Science and Technology*, 151(April), 112097. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112097>
- McLellan, M. R., Lind, L. R., & Kime, R. W. (1995). Statistical analysis for multi-quadrant hunter L,a,b data. *Food Quality*, 18(3), 235–240.
- Moreno, S., & Pizarro, Y. (2013). Sustitución Parcial de la Harina de Coronta de Maíz Morado (*Zea Mays* L.) por Harina de Trigo en las Características Tecnofuncionales del Pan Artesanal. In *Universidad Nacional del Centro del Perú*. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/5992>
- Muraleedharan, V., Rajan, S. C., & R, J. (2023). Determining the limits of traditional box-counting fractal analysis in leaf complexity studies. *Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 304(February), 152300. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2023.152300>
- Navpreet, K., Poorva, S., Jaimni, S., Bababode, A. K., & Shubhneet, K. (2020). Recent developments in purification techniques and industrial applications for whey valorization: A review. *Chemical Engineering Communications*, 207(1), 123–138. <https://doi.org/10.1080/00986445.2019.1573169>
- Ocoro-Zamora, M. U., & Ayala-Aponte, A. A. (2014). Influence of thickness on the drying of papaya puree (carica papaya L.) through refractance windowtm technology. *Dyna. Revista de La Facultad de Minas de La Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín*, 80(182), 147–154.

- <http://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/31560>
- Pedreschi, F., León, J., Mery, D., & Moyano, P. (2006). Development of a computer vision system to measure the color of potato chips. *Food Research International*, 39(10), 1092–1098. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2006.03.009>
- Quevedo, R., Pedreschi, F., Bastias, J. M., & Díaz, O. (2016). Correlation of the fractal enzymatic browning rate with the temperature in mushroom, pear and apple slices. *LWT - Food Science and Technology*, 65, 406–413. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.08.052>
- Repo-Carrasco-Valencia, R., Hellström, J. K., Pihlava, J. M., & Mattila, P. H. (2010). Flavonoids and other phenolic compounds in Andean indigenous grains: Quinoa (*Chenopodium quinoa*), kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*) and kiwicha (*Amaranthus caudatus*). *Food Chemistry*, 120(1), 128–133. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.09.087>
- Rodríguez, G., Avellaneda, S., Pardo, R., Villanueva, E., & Aguirre, E. (2018). Bread loaf enriched with extruded cake from sachu inchi (*Plukenetia volubilis* L.): Chemistry, rheology, texture and acceptability. *Scientia Agropecuaria*, 9(2), 199–208. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.02.04>
- Stikic, R., Glamoclija, D., Demin, M., Vucelic-Radovic, B., Jovanovic, Z., Milojkovic-Opsenica, D., Jacobsen, S.-E., & Milovanovic, M. (2012). Agronomical and nutritional evaluation of quinoa seeds (*Chenopodium quinoa* Willd.) as an ingredient in bread formulations. *Journal of Cereal Science*, 55(2), 132–138. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcs.2011.10.010>
- Vegas-Niño, R., & Argomedo-Reyes, Z. (2022). Efecto del factor de severidad y tiempo de almacenamiento sobre las características fisicoquímicas de Pasta Desamargada de Tarwi. *Cantua*, 18(1), 9–14. <https://doi.org/10.51343/cantu.v18i1.891>
- Vilcapoma, W., de Bruijn, J., Elías-Peñañiel, C., Espinoza, C., Farfán-Rodríguez, L., López, J., & Encina-Zelada, C. R. (2023). Optimization of Ultrasound-Assisted Extraction of Dietary Fiber from Yellow Dragon Fruit Peels and Its Application in Low-Fat Alpaca-Based Sausages. *Foods*, 12(15). <https://doi.org/10.3390/foods12152945>