UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INDUSTRIA Y PRODUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

Proyecto de investigación previo a la obtención del título de Ingeniero Agroindustrial

Título del Proyecto de Investigación:

CARACTERIZACIÓN DE LA POROSIDAD EN PAN DE MOLDE MEDIANTE TÉCNICAS DE ANÁLISIS DIGITAL 2D

Autor:

Lady Leonor Vergara Ortega

Director de Proyecto de Investigación:

Ing. Luis Alberto Egas Astudillo, PhD.

Quevedo-Los Ríos-Ecuador

2022

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, **Lady Leonor Vergara Ortega**, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad Técnica Estatal de Quevedo, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este documento, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Lady Leonor Vergara Ortega

CI: 0104750971

CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

El suscrito, **Ing. Luis Alberto Egas Astudillo, PhD.**, docente de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, certifica que el estudiante, Lady Leonor Vergara Ortega realizó el Proyecto de Investigación de grado titulado **"CARACTERIZACIÓN DE LA POROSIDAD EN PAN DE MOLDE MEDIANTE TÉCNICAS DE ANÁLISIS DIGITAL 2D"**, previo a la obtención del título de Ingeniero Agroindustrial, bajo mi dirección, habiendo cumplido con las disposiciones reglamentarias establecidas para el efecto.

LUIS ALBERTO EGAS ASTUDILLO

Firmado digitalmente por LUIS ALBERTO EGAS ASTUDILLO
Fecha: 2022.11.25 22:24:17 -05'00'

Ing. Luis Alberto Egas Astudillo PhD.

Ing. Luis Alberto Egas Astudillo, PhD.
DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

CERTIFICADO DEL REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO

El suscrito, Ing. Luis Alberto Egas Astudillo, PhD., mediante el presente cumplo en presentar a usted, el informe de proyecto de investigación cuyo tema es titulado "CARACTERIZACIÓN DE LA POROSIDAD EN PAN DE MOLDE MEDIANTE TÉCNICAS DE ANÁLISIS DIGITAL 2D".presentado por la estudiante Lady Leonor Vergara Ortega, egresada de la carrera de Ingeniería Agroindustrial, que fue revisado bajo mi dirección según resolución del Consejo Académico de Facultad de Ciencias de la Ingeniería que ha desarrollado de acuerdo al Reglamento de la Unidad de Titulación Especial de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo y cumple con el requerimiento de análisis de URKUND el cual avala los niveles de originalidad en un 99 % y similitud 1 %, del trabajo investigativo. Valido este documento para que la estudiante siga con los trámites pertinentes, de acuerdo con lo que establece el Reglamento.

URKUND

Documento	Tesis "Caracterización de la porosidad en pan de molde mediante técnicas de análisis digital 2d".docx [D150653127]
Presentado	23/11/2022 6:07:00
Presentado por	Luis Alberto Egas Astudillo (legasa@uteq.edu.ec)
Recibido	Legasa.uteq@analysis.urkund.com
Mensaje	Alrededor de 1% de este documento se compone de texto más o menos similar al contenido de 13 fuente(s), contiene 64 palabras y tiene un índice de similitud de 99 % con su principal fuente.

Por su atención deseo significar mis agradecimientos.

Cordialmente,

LUIS ALBERTO EGAS ASTUDILLO

Firmado digitalmente por LUIS ALBERTO EGAS ASTUDILLO
Fecha: 2022.11.25 22:24:17 -05'00'

Ing. Luis Alberto Egas Astudillo PhD.

Ing. Luis Alberto Egas Astudillo, PhD.
DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INDUSTRIA Y PRODUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Título:

"CARACTERIZACIÓN DE LA POROSIDAD EN PAN DE MOLDE MEDIANTE TÉCNICAS DE ANÁLISIS DIGITAL 2D"

Presentado al Consejo Directivo como requisito previo a la obtención del título de Ingeniero Agroindustrial.

Aprobado por:

José Vicente Villarroel Bastidas

Firmado digitalmente por José Vicente Villarroel Bastidas
Fecha: 2022.11.29 09:51:47 -05'00'

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL
Ing. José Vicente Villarroel Bastidas, MSc.

Firmado electrónicamente por:
LOGUARD SMITH ROJAS

MIEMBRO DEL TRIBUNAL
Ing. Loguard Smith Rojas Uribe, MSc.

AZUCENA ELIZABETH BERNAL GUTIERREZ

Digitally signed by AZUCENA ELIZABETH BERNAL GUTIERREZ
Date: 2022.11.29 09:04:40 -05'00'

MIEMBRO DEL TRIBUNAL
Ing. Azucena Elizabeth Bernal Gutiérrez, MSc.

QUEVEDO – LOS RÍOS – ECUADOR

2022

AGRADECIMIENTO

No hay palabras para describir el sentimiento que se tiene en el momento de haber cumplido con una de las metas más relevantes en la vida, siento enorme gratitud por las personas que han contribuido enormemente a mi formación profesional, para mis docentes que en cada uno de los periodos académicos brindaron dedicación en su gran labor de crear un futuro próspero para sus alumnos, yo fui parte de ello, y por eso gracias.

El pilar fundamental de una sociedad es la familia, infinitamente gracias, mamá, papá y hermanos, me han respaldado en todo momento y aunque han existido verdaderos retos en esta etapa de nuestra vida, puedo decirles que le agradezco a Dios por haber estado junto a ustedes, son mi más grande tesoro.

Lady Leonor Vergara Ortega

DEDICATORIA

Somos el resultado de años de aprendizaje continuo, somos un conjunto de valores, y el promedio de las personas con las que tratamos a diario. En alguna etapa de mi vida llegaste para ser uno de mis más grandes maestros, pusiste libros en mis manos, me enseñaste el valor de la lectura y así marcaste en mí, el inicio de un crecimiento constante no solo como ser humano, sino también académico. El haber culminado mi tercer nivel de estudios es un logro que te dedico con mucho cariño Diego León.

Lady Leonor Vergara Ortega

RESUMEN

La creciente necesidad de métodos de análisis de los alimentos en la industria hace factible este estudio basado en una metodología que se realiza desde tres pilares fundamentales como es el tecnológico, económico y social. La metodología describe los pasos a seguir desde la elaboración de las muestras pasando por el procesamiento del análisis digital de imágenes y la obtención de datos cuantitativos objetivamente. Mediante el software ImageJ se establecieron los parámetros de medición como el área, la esfericidad, seguidamente se procedió a la obtención de los datos que posteriormente se trataron en el software STATGRAPHICS del que se obtuvieron las tablas de frecuencias con las mediciones correspondientes. El principal resultado es la observación de poros de menor tamaño para el porcentaje de 0,5 % de levadura y que existe una amplia diferencia entre los poros de mayor tamaño entre este porcentaje y el 2 %, es decir que los poros más pequeños se forman con menor frecuencia a medida que se aumenta la lavadura.

Palabras clave: Levadura, análisis de imagen, pan molde.

ABSTRACT

The growing need for food analysis methods in the industry makes this study feasible based on a methodology based on three fundamental pillars: technological, economic and social. The methodology describes the steps to follow from the elaboration of the samples through the processing of the digital analysis of images and the obtaining of quantitative data objectively. Using ImageJ software, the measurement parameters such as area and sphericity were established, followed by obtaining the data, which were then processed in STATGRAPHICS software, from which the frequency tables with the corresponding measurements were obtained. The main result is the observation of smaller pore sizes for the 0.5 % yeast percentage and that there is a wide difference between the larger pore sizes between this percentage and 2 %, the smaller pores are formed less frequently as the washing is increased.

Keywords: Yeast, image analysis, mold bread.

TABLA DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS ii

CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN..... iii

CERTIFICADO DEL REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO..... iv

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TRIBUNAL v

AGRADECIMIENTO vi

DEDICATORIA vii

RESUMEN viii

ABSTRACT ix

TABLA DE CONTENIDO x

CÓDIGO BUBLÍN..... xvi

INTRODUCCIÓN..... 1

CAPÍTULO I 2

CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN 2

1.1. Problema de investigación. 3

1.2. Objetivos. 5

1.3. Justificación..... 6

CAPÍTULO II..... 7

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN 7

2.1. Marco conceptual. 8

2.1.1. Panificación..... 8

2.1.2. Pan de molde. 8

2.1.2. Ingredientes más comunes en panificación. 9

2.1.3. Proceso de Horneado..... 13

2.1.4. Gasificación del pan. 13

2.1.5. Propiedades morfogeométricas de los alimentos. 15

2.1.6. Esfericidad 17
2.1.7. Porosidad 17
2.1.8. Método de análisis 2D con imageJ. 18
2.2. Marco referencial. 20
CAPÍTULO III 22
METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN 22
3.1. Localización. 23
3.2. Tipos de investigación. 23
3.3. Método de investigación. 24
3.4. Fuentes de recopilación de información. 26
3.5. Diseño experimental. 26
3.7. Recursos humanos y materiales- 27
CAPÍTULO IV 30
RESULTADOS Y DISCUSIÓN 30
4.1. Desarrollo del método para medir porosidad en pan de molde mediante escaneo y procesamiento digitales 2D. 31
4.2. Determinación de la porosidad en el pan de molde a distintas concentraciones de levadura (0.5 %, 1 %. 1.5 % y 2 %). 34
4.3. Caracterización de la cinética de secado y su influencia en la porosidad del pan de molde. 37
CAPÍTULO V 40
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 40
5.1. Conclusiones. 41
5.2. Recomendaciones 42
CAPÍTULO VI 43
BIBLIOGRAFÍA 43
Bibliografía 43
CAPÍTULO VII 43

ANEXOS 43

Anexo A. Elaboración y preparación de las muestras. 44

1.1. Diagrama de flujo para la elaboración de pan de molde 44

1.2. Elaboración del pan molde en concentraciones de levadura 0.5 %, 1 %, 1.5 % y 2 %. 45

1.3. Muestras de pan de molde elaboradas a diferentes concentraciones de levadura. 45

1.4. Obtención y análisis de imágenes 46

1.5. Proceso para la obtención de los datos para la cinética de secado. 47

Anexo B. Tablas y gráficos 48

2.1. Datos estadísticos de las frecuencias según el área de los poros en los tratamientos. 48

2.2. Información de los parámetros para la cinética de secado. 56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Requisitos físicos y químicos para la harina de trigo 10

Tabla 2. Condiciones meteorológicas Finca Experimental "La María" 23

Tabla 3. Descripción de los tratamientos en estudio para el horneo. 27

Tabla 4. Esquema del análisis de varianza (DCA) para las variables en estudio. 27

Tabla 5. Modelado de la cinética de secado. 37

Tabla 6. Análisis de varianza (ANOVA) de la frecuencia absoluta según el área de los poros del pan de molde. 48

Tabla 7. Diferencia Mínima Significativa (LSD) con un nivel de significancia de 95% para los tratamientos (concentración de levadura 0,5 %, 1 %, 1,5 % y 2 %). 48

Tabla 8. Análisis de varianza (ANOVA) de la frecuencia acumulada según el área de los poros del pan de molde. 48

Tabla 9. Diferencia Mínima Significativa (LSD) al 95% para la frecuencia acumulada según el área de los poros 49

Tabla 10. Tabla de frecuencias absolutas con respecto al área de los poros. 50

Tabla 11. Tabla de frecuencias acumuladas con respecto al área de los poros. 52

Tabla 12. Tabla de frecuencias con respecto al área de los poros. 54

Tabla 13. Valores de la cinética de secado 56

Tabla 14. Parámetros del modelamiento matemático para la cinética de secado del pan de molde a diferentes concentraciones de levadura. 56

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Imagen desde la configuración del escáner..... 32

Figura 2. Esquema del proceso de umbralización. (A) imagen RGB formato tiff, (B) imagen a escala de grises (8 bits), (C) imagen aplicada la umbralización. 33

Figura 3. Frecuencia absoluta de los tratamientos..... 35

Figura 4. Frecuencia acumulada de los tratamientos..... 37

Figura 5. Representación del modelamiento matemático para la cinética de secado para las distintas concentraciones (0.5 %, 1 %. 1.5 % y 2 %). de levadura..... 39

Figura 6. Proceso de selección del formato para la adquisición de las imágenes 46

ÍNDICE DE FOTOS

Foto 1. Pan de molde..... 9

Foto 2. Corte característico del pan de molde..... 9

Foto 3. Cortado de 1.5 cm por rebanada 31

Foto 5. Colocación de la muestra en el escáner 31

Foto 6. Imagen digitalizada en formato tiff. 33

Foto 7. Masa en reposo por 10 minutos 45

Foto 8. Proceso de fermentación…… 45

Foto 9. Masa fermentada 45

Foto 10. Pan horneado y cortado..... 45

Foto 11. Pan 2 % de levadura..... 45

Foto 12. Pan 1,5 % de levadura..... 45

Foto 13. Pan 2 % de levadura 46

Foto 14. Pan 1,5 % de levadura..... 46

Foto 15. Masa en los moldes 47

Foto 16. Masa fermentada…. 47

Foto 17. Proceso de Horneado 47

Foto 18. Proceso para cinética secado..... 47

Foto 19. Masas horneadas completamente..... 47

CÓDIGO BUBLÍN

Título:	Caracterización de la porosidad en pan de molde mediante técnicas de análisis digital 2D		
Autor:	Lady Leonor Vergara Ortega		
Palabras claves:	Levadura	Análisis de imagen	Pan molde
Fecha de publicación:	2022		
Editorial:	**Quevedo: UTEQ-2022**		
Resumen:	**Resumen.** La creciente necesidad de métodos de análisis de los alimentos en la industria hace factible este estudio basado en una metodología que se realiza desde tres pilares fundamentales como es el tecnológico, económico y social. La metodología describe los pasos a seguir desde la elaboración de las muestras pasando por el procesamiento del análisis digital de imágenes y la obtención de datos cuantitativos objetivamente. Mediante el software ImageJ se establecieron los parámetros de medición como el área, la esfericidad, seguidamente se procedió a la obtención de los datos que posteriormente se trataron en el software STATGRAPHICS del que se obtuvieron las tablas de frecuencias con las mediciones correspondientes. El principal resultado es la observación de poros de menor tamaño para el porcentaje de 0,5 % de levadura y que existe una amplia diferencia entre los poros de mayor tamaño entre este porcentaje y el 2 %, es decir que los poros más pequeños se forman con menor frecuencia a medida que se aumenta la lavadura. **Abstract.** The growing need for food analysis methods in the industry makes this study feasible based on a methodology based on three fundamental pillars: technological, economic and social. The methodology describes the steps to follow from the elaboration of the samples through the processing of the digital analysis of images and the obtaining of quantitative data objectively. Using ImageJ software, the measurement parameters such as area and sphericity were established, followed by obtaining the data, which were then processed in STATGRAPHICS software, from which the frequency tables with the corresponding measurements were obtained. The main result is the observation of smaller pore sizes for the 0.5 % yeast percentage and that there is a wide difference between the larger pore sizes between this percentage and 2 %, the smaller pores are formed less frequently as the washing is increased.		
Descripción:	77 hojas; dimensiones, 29 x 21 cm + CR-ROM 6162		
URI:			

INTRODUCCIÓN

Por lo general los métodos de análisis se van desarrollando cada vez más a gran rapidez debido al crecimiento en la comercialización de los productos industrializados y en especial, el de la industria panificadora al ser un producto de alta demanda. En el país 9 de cada 10 ecuatorianos consumen pan, derivando en una cifra de consumo per cápita de 30 kilos por año [1].

Con el fin de favorecer a la tendencia mundial de ofrecer productos con mayor calidad, esta investigación ha desarrollado una metodología que permite la medición textural del pan de molde variando los niveles de levadura que dio como resultado una porosidad diferente. Por otra parte, se tiene el software en el que se trabaja con gran cantidad de formatos de imagen diferentes, ya que es un excelente visor de imágenes y permite también varias operaciones basadas en píxeles.

ImageJ puede realizar conteo de estructuras en una imagen bidimensional. Para muchos pasos en el análisis de imágenes, es importante dividir la imagen en dos componentes separados, esto quiere decir, separar la señal de interés de la no. Después de segmentar la imagen en los dos componentes, queda una máscara o imagen binaria. Las imperfecciones en la imagen pueden dar como resultado espacios en los objetos o pequeñas discontinuidades en las estructuras. Las imágenes digitales son cuadrículas bidimensionales de valores de intensidad de píxeles con el ancho y el alto de la imagen definidos por el número de píxeles en X y Y dirección. Una imagen se construye usando píxeles, donde cada píxel tiene un valor que está codificado por bits.

TIFF es un formato de imagen de tramas versátil y flexible. Por ejemplo, para realizar un análisis morfométrico no basta con conocer la magnificación del objetivo que estamos utilizando, sino que es fundamental que la imagen este correctamente calibrada. La dimensión fractal es una propiedad que caracteriza la desigualdad de una imagen.

El objetivo de este fue establecer el método para rastrear la conectividad entre vacíos en panes utilizando medidas de análisis digital 2D para establecer definitivamente la morfología de la estructura celular en migas de pan y relacionar la estructura celular con las propiedades físicas de los panes.

CAPÍTULO I

CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Problema de investigación.

1.1.1. Planteamiento del problema.

El conocimiento de la estructura interna de los productos de panadería se ve limitado por métodos de análisis que carecen de exactitud, por ejemplo, el análisis sensorial que es un proceso largo y depende de la percepción individual de cierto grupo de personas, por otro lado, existen métodos experimentales que suelen ser costosos. En general los métodos de análisis de alimentos se realizan de forma que desintegran los alimentos para poder obtener resultados que sean objetivos y confiables, sin embargo, por estos métodos invasivos se pierden datos acerca de la microestructura de los alimentos que pueden ser cuantificables y aportar información relevante sobre el procesamiento y calidad de los alimentos. El uso de herramientas para la caracterización a nivel de microestructura de los alimentos es mayormente costoso como, por ejemplo, la microtomografía de Rayos X o microscopía electrónica de barrido (SEM). Por lo cual el estudio de la microestructura de los alimentos es un campo dependiente y costoso.

Durante el proceso de elaboración del pan de molde en producciones industriales se pueden producir pormenores durante el proceso de elaboración, es decir, en cualquiera de las distintas operaciones unitarias que se aplican para la obtención de este pan. El proceso de fermentación se encarga de formar mayoritariamente la estructura porosa característica del pan, demostrando así, un punto crítico de control. Distintas concentraciones de levadura para la fermentación tienden a la modificación de la microestructura del pan y hasta el momento se desconocen las características de las migas generadas y de una metodología que ofrezca resultados cuantificables objetivamente para poder obtener un producto con las características y la calidad deseadas.

A pesar de que el método de análisis de imágenes digitales 2D ya son ampliamente utilizados en distintas ramas de la ciencia, no se ha utilizado para medir el efecto que tienen la cantidad de levadura aplicada en la realización de pan de molde. Las imágenes digitales son representadas por arreglos numéricos, por lo tanto, pequeñas variaciones en las imágenes digitales generan cambios en las matrices numéricas, estos cambios podrían causar error en la medición e interpretación de los datos.

Diagnóstico

La estructura del pan ha sido evaluada tradicionalmente por los panaderos, esto se lleva a cabo de manera subjetiva, es decir, que se examina visualmente las características de forma o tamaño. Otra manera de evaluar la calidad del pan ha sido el análisis sensorial y aunque la utilización de esta herramienta es básica para obtener información general acerca de la calidad de los productos, requiere de la percepción individual de parte del posible consumidor que es poco objetiva, haciendo necesario la obtención de datos más confiables y cuantificables con precisión y exactitud. Sin embargo, en la producción a gran escala se podrían presentar problemas durante las operaciones, entre ellas una de las más importantes dentro de la elaboración del pan de molde es la fermentación que amerita un panorama técnico para su análisis.

Existen varias publicaciones acerca de la evaluación de las características internas o microestructurales del pan en sus diferentes derivados, en dichas investigaciones se pueden observar diferencias entre los análisis realizados a panes que tienen similares composiciones. Estas diferencias en la metodología de análisis se convierten en un inconveniente para la comparación con nuevos productos que poseen estructuras semejantes. Con este antecedente, debido a que los procesos industriales de panificación son cada vez más demandantes en la calidad del producto final aunado al desconocimiento de la forma en que se hacen análisis de la información obtenidos a través de imágenes digitales se generan costos elevados, demanda de tiempo y de recursos humanos.

Pronóstico

La medición de los parámetros de calidad en la elaboración de pan de molde representa un reto para la producción a gran escala. Mientras tanto el desarrollo de herramientas que ayuden a la medición de la calidad es escaso. Por esta razón, sin el estudio de factibilidad acerca de una metodología adecuada, la medición de dichos parámetros representaría costos elevados, uso de mayor cantidad de recursos económicos, humanos, así como de tiempo para la obtención de datos cuantitativos y que sean analizados objetivamente. Conociendo esto, no será posible fomentar el uso de tecnologías vanguardistas que facilitan la medición de las propiedades morfo-geométricas sin el estudio de previo de la metodología presentada en esta investigación.

1.1.2. Formulación del problema.

¿Es posible caracterizar la estructura porosa del pan de molde a través del análisis digital 2D?

1.1.3. Sistematización del problema.

- ¿Qué metodología permitirá la medición de la porosidad en pan de molde mediante el escaneo y procesamiento digital 2D?

- ¿Cómo puede ser utilizado el análisis digital 2D para la determinación de la porosidad de pan de molde?

- ¿Cuál sería la influencia del horneo en la porosidad de pan de molde?

1.2. Objetivos.

1.2.1. Objetivo General.

Evaluar la porosidad en pan de molde mediante técnicas de análisis digital 2D.

1.2.2. Objetivos Específicos.

- Diseñar una metodología que permita la medición de la porosidad en pan de molde mediante el escaneo y procesamiento digitales 2D.

- Determinar la porosidad del pan de molde elaborado a distintas concentraciones de levadura (0.5 %, 1 %. 1.5 % y 2 %), mediante análisis tradicional y análisis digital 2D.

- Caracterizar la cinética de secado y su influencia en la porosidad del pan de molde.

1.3. Justificación.

El acceso que se tiene al estudio de la microestructura de los alimentos es muy limitante, especialmente industria panadera, lo cual ha generado un retraso en el manejo de las propiedades morfo- geométricas y mecánicas de los productos agroindustriales, hoy en día, es necesario conocer a fondo la estructura de los productos elaborados con el fin de establecer controles que mejoren su textura, crocancia, pastosidad, durabilidad, etc., de los productos que se elaborar a diario por parte de los procesadores agroindustriales. Lo cual plantea la necesidad del desarrollo de metodologías más accesibles que permitan caracterizar las propiedades antes mencionadas y de esta forma mejorar la productividad del área agroindustrial en la región.

La importancia de la implementación de nuevas tecnologías en la producción de alimentos como el secado, la extrusión, la congelación y el horneo, dan como resultado cambios en la porosidad y, por lo tanto, en la microestructura. La variación de la porosidad durante el procesamiento depende de la contracción y/o el colapso, que son dos fenómenos opuestos. El colapso provoca una disminución en el volumen de los poros, mientras que la contracción aumenta el volumen de los poros [2].

De igual modo la tasa de transporte de humedad está influenciada por la distribución del tamaño de las celdas, su interconectividad y los espesores de la pared del poro. El control de la formación de grumos durante la reconstitución o hidratación de la harina cumple un papel importante en la formación de la estructura interna del pan. [3]

Lo expuesto nos muestra la importancia del conocimiento de la estructura interna de un producto, por lo cual el análisis de la microestructura se hace crucial. Sin embargo, puede resultar complejo y de elevados costos, lo cual frena la intención del productor en realizar la medición del efecto de la porosidad y la distribución del tamaño de los poros a pesar de su importancia marcada en el conocimiento de las propiedades mecánicas del pan.

El conocimiento de las características físicas como el tamaño, el área o el volumen de los poros de un pan, permiten establecer las propiedades mecánicas de este producto, y de esta manera se desarrolla una investigación exploratoria a través del análisis de imagen en 2D proporcionando datos acerca de la microestructura resultante de las diferentes concentraciones de levadura en el pan molde.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Marco conceptual.

Los fundamentos teóricos presentados en la investigación están relacionados con una amplia gama de conocimientos en el campo de la industria alimentaria, con investigaciones de relevancia en el control de calidad de productos mayoritariamente semisólidos y, en las nuevas tendencias tecnológicas, como es el uso de análisis de imágenes digitales para obtener resultados cuantificables objetivamente.

En consecuencia, se redactan conceptos referentes a: la panificación, el pan molde y sus ingredientes, cuantificación de imágenes digitales y otros temas que detallan el proceso llevado a cabo para la caracterización de la estructura porosa de este producto panario.

2.1.1. Panificación.

En los procesos de panificación se encuentran masas fermentadas, masas hojaldradas y masas semihojaldradas. Se conoce como masas a las realizadas a partir de levadura panadera (biológica) que experimentan una fermentación y una transformación de las materias primas (los azúcares en gas carbónico y alcohol etílico). Por esa razón estas masas se hinchan después de la introducción de la levadura y en el transcurso de su elaboración. Su importante desarrollo en el horno se debe también al desprendimiento de gas carbónico, producido en gran cantidad por la levadura bajo la acción del calor hasta la temperatura de aproximadamente 50ºC, cuando muere [4].

El pan es un producto obtenido por la cocción, de una masa fermentada con diferente proceso de elaboración. Entre los principales está el amasado y fermentado. Al añadir agua a la harina de trigo, se forma una masa por hidratación de las proteínas del gluten (gliadina y gluteina) las cuales le otorgan viscosidad, elasticidad y cohesividad. La fermentación se lleva a cabo por la respiración aerobia de la levadura la cual tiene dos funciones: favorecer la maduración de la masa y producir gas para airear la masa y el pan. [5].

2.1.2. Pan de molde.

La revolución industrial trajo consigo enormes contribuciones a las poblaciones en crecimiento, y es en el año 1933 que con la estandarización de los procesos empieza a producirse el pan molde en volúmenes más altos para Estados Unidos [6], este producto es accesible para todas las clases sociales como consecuencia de dos hechos tecnológicos importantes, por una parte, el desarrollo del molino de rodillos y por otro lado, la máquina

para rebanar y envolver inventada por Otto Rohwedder [7]. El pan de molde es uno de los panes más estandarizados y por ende industrializados a nivel mundial.

Tradicionalmente, el pan se elabora a partir de harina del cereal de trigo [8], y según Mesas [9] lo define como, pan de corteza blanda en cuya cocción se emplean moldes. El pan de molde tiene grasa, a diferencia del pan francés, lo que lo hace más fácil de masticar y que su período de conservación sea muy superior. Pertenece a la categoría de panes especiales y en su elaboración se puede emplear, además de los ingredientes que se utilizan en el pan francés, azúcar, lácteos (leche, leche condensada, en polvo, total o parcialmente desnatada, suero en polvo) emulsionantes y condimentos, entre otros aditivos. El color de la miga debe ser blanco, la textura se compone de alvéolos finos y regulares [10].

Foto 1. *Pan de molde*

Foto 2. Corte característico del pan de molde

2.1.2. Ingredientes más comunes en panificación.

2.1.2.1. Harina.

La denominación harina, sin otro calificativo, designa exclusivamente el producto obtenido de la molienda del endospermo del grano de trigo limpio [9]. El trigo es el único cereal que proporciona miga abierta y subida para la elaboración de pan. El endospermo forma parte de la estructura del trigo casi 80%, la harina blanca está constituida por endospermo puro. Las

harinas de trigo son ricas en proteínas, éstas son responsables de que se produzca masa al agregarle agua [5]. Si se trata de otros granos de cereales o de leguminosas hay que indicarlo, por ejemplo: harina de maíz, harina de cebada, etc. Si en la harina aparece no sólo el endospermo, sino todos los componentes del grano se llama harina integral [9].

***Tabla 1**. Requisitos físicos y químicos para la harina de trigo*

Requisitos	**Unidad**	**Panificación**	**Pastelería y galletería**	**Para todo uso**	**Método de ensayo**
Humedad, máximo	%	14.5	14.5	14.5	NTE INEN-ISO 712
Proteína (materia seca)	%	10	7	9	NTE INEN-ISO 20483
Cenizas (materia seca), máximo	%	1	0.8	0.8	NTE INEN-ISO 2171
Acidez (expresado en ácido sulfúrico), máximo	%	0.2	0.2	0.2	NTE INEN 521
Gluten húmedo, mínimo	%	28	20	25	NTE INEN-ISO 21415 o NTE INEN-ISO 21415-2
Grasa (materia seca), máxima	%	2	2	2	NTE INEN-ISO 11085 AOAC 2003.06
Tamaño de partícula pasa por un tamiz de 212 µm, mínimo	%		95		NTE INEN 517

Fuente: INEN [11]
Elaborado por: Autora

En la norma NTE INEN 616:2006 describe a la harina de acuerdo a su uso, como harina panificable a aquella elaborada hasta un grado de extracción determinado, que puede ser tratada con blanqueadores y/o mejoradores, productos málticos, enzimas diastásicas y fortificada con vitaminas y minerales [11]. Con base en esta norma, la presente investigación utiliza harina de Trigo Fortificada “Lucy” es una harina de trigo proveniente de la molienda

de trigos duros, se caracteriza por tener alto grado de extracción, en su formulación contiene oxidantes y enzimas que mejoran los procesos de amasado y fermentación. Altamente recomendada para procesos de panificación y bollería [12].

Las harinas tipificadas comercialmente con los calificativos: cuatro ceros (0000), tres ceros (000), dos ceros (00), cero (0), medio cero (½ 0), harinilla de primera y harinilla de segunda, corresponden a los productos que se obtienen de la molienda gradual y metódica del endospermo en cantidad de 70–80 % del grano limpio. La harina de trigo tipo 000 posee alto contenido de proteínas posibilitando la formación de gluten utilizada en la elaboración de panes [13].

2.1.2.2. Agua.

El agua constituye una tercera parte de la cantidad de harina que se vaya a emplear, aunque esto es un cálculo estimado la cantidad final que se añadirá dependerá de una serie de circunstancias, como el tipo de consistencia que queramos conseguir. El agua ideal para la panificación es el agua medianamente dura y que contiene sales minerales suficientes para reforzar el gluten y así servir como alimento para la levadura [14].

Es muy importante la cantidad y calidad del agua, ya que es el componente que hidrata la harina, hincha los gránulos de almidón y favorece el ablandamiento y alargamiento del gluten, dándole a la masa las características de plasticidad que permiten su desarrollo y manejo. La presencia del agua proporciona un medio húmedo indispensable para la creación y desarrollo de la fermentación [10].

2.1.2.2. Levadura.

Son aquellas sustancias que directa o indirectamente tienen un efecto de dilatación y elevación, o aumento de volumen en las masas destinadas para elaborar productos horneados. El principal agente es el bióxido de carbono (CO2) pero también es importante la acción del vapor de agua y del aire que se incorpora durante la preparación de la masa, que después se dilata durante la cocción en el horno.

La levadura provoca la fermentación de los azúcares de la harina, que se traducen en la liberación de gas, lo que facilita el leudado del pan y la formación de los alvéolos de la miga. En panificación se puede utilizar levadura biológica, la cual puede ser de producción industrial (levadura prensada) o de producción artesanal (levadura natural o masa madre).

La levadura prensada, utilizada comercialmente, es una cepa pura de un microorganismo denominado Saccharomyces cereviceae, que se obtiene por procesos industriales y se comercializa como levadura prensada o deshidratada, produce una fermentación activa, principalmente de tipo alcohólica, poco ácida y su acción es predecible y reproducible bajo condiciones apropiadas de fabricación. Esta levadura ha sido la más estudiada, ya se han identificado genes responsables de la producción de los diferentes metabolitos de la fermentación, como los genes PDC y ADH1 responsables de la producción de alcohol etílico [15].

La actividad fisiológica de la levadura no se reduce a la transformación de productos fermentescibles, sino que simultáneamente ésta sufre una multiplicación más o menos intensa. Para el desarrollo de su actividad vital, la levadura necesita unas condiciones de temperatura, humedad y acidez adecuadas, siendo estos factores del medio decisivos en el control de la fermentación. Son también indispensables, además del sustrato hidrocarbonado, otros factores nutritivos como son nitrógeno soluble y sales minerales. El sulfato calcico, el carbonato amónico y el cloruro amónico, especialmente este último, son manifiestos estimulantes de la actividad fermentativa [16].

La levadura puede funcionar de dos maneras diferentes, de forma aeróbica o aneróbica. Cuando la levadura funciona de forma anaeróbica, produce alcohol y dióxido de carbono, como se indica a continuación:

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2$$

Cuando funciona aeróbicamente la reacción es:

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6H_2O + 6CO_2$$

2.1.2.3. Azúcar.

Los azúcares, que utilizan los microorganismos como nutrientes, son aportados por la harina y por la actividad de las enzimas sobre el almidón [10]. Es el ingrediente adicional el cual tiene varias funciones como mejorar la fermentación, ya que el azúcar al disolverse en el almidón de la masa sirve de alimento de las levaduras. También sirve como colorante del pan y como un retenedor de humedad. El porcentaje de azúcar en la receta dependerá del tipo de pan que se desee obtener [17].

2.1.2.4. Sal.

Aunque en los comienzos de la panificación no fue considerada importante, la sal en la actualidad es uno de los principales elementos de la masa para obtener un producto apetitoso para el consumidor. La sal refuerza las propiedades plásticas de la masa y las mejora notablemente. Sus funciones son:

- Producir un fortalecimiento del gluten lo que aumenta la firmeza de la masa y mejora su manejabilidad.
- Aumentar la absorción de agua.
- Resaltar el sabor.
- Influir en la cocción en la coloración de la corteza.

Las proporciones deben ser adecuadas, ya que la falta de sal produce masas blandas, pegajosas y la miga del pan se desmorona, y un exceso tiende a reducir la capacidad de la levadura e incluso detener la fermentación [10].

2.1.3. Proceso de Horneado.

El horneado es otra operación de procesamiento de alimentos durante la cual el estado físico de la masa cambia por completo y se convierte en productos esponjosos con diferentes propiedades mecánicas. La masa pasa por complejos cambios físicos y químicos durante el horneado. Los cambios en la estructura ocurren principalmente a través de la evaporación del agua de la miga, también denominada inflado inducido por vapor, acompañado por la desnaturalización de la proteína y la gelatinización del almidón [2].

2.1.4. Gasificación del pan.

El gas es el responsable de esponjar la masa y de la presencia de los alvéolos en el pan. El dióxido de carbono producido es retenido por la masa en dos fases: 1) como gas retenido dentro de la célula, y 2) como gas disuelto en fase acuosa. Este último es inversamente proporcional a la temperatura y es afectado por el pH de la masa, en donde existe mayoritariamente como CO_2 y en menor proporción como H_2CO_3 y HCO_3^- [10].

El gas así generado, junto con el vapor de agua y el aire atrapado, ejerce una presión en el interior de la red tridimensional conformada por las proteínas del gluten, que hace que la masa se expanda y se esponje. En las burbujas formadas se inicia propiamente la expansión, que va en aumento a medida que los gases se calientan e incrementan su presión; para obtener

la textura porosa propia del pan es muy importante que las burbujas sean muy abundantes, pequeñas y que estén distribuidas homogéneamente [18].

2.1.4.1. Problemas del pan por exceso de gasificación durante la fermentación

El tiempo de reposo en bloque resulta fundamental para asegurar un buen comportamiento de la masa durante las siguientes fases del proceso. Tanto un defecto como un exceso pueden resultar negativos. Poco tiempo de reposo conlleva masas sin fuerza, extensibles y pegajosas al tacto. La acidez desarrollada es escasa y la conseguida durante la fermentación no es normalmente suficiente. Consecuentemente, los panes aparecen insípidos, planos, con poco volumen y con el corte ciego [19].

Para su corrección, si no se da el tiempo de reposo necesario, debe encaminarse la producción a masas menos hidratadas, con adición de aditivos y fermentaciones rápidas. El uso de un buen fermento se hace indispensable a la hora de dotar al pan resultante de aroma y sabor propios. Exceso de reposo Aporta excesiva tenacidad en las masas. En función de la cantidad de levadura, la fermentación final se ralentiza y prácticamente no aporta volumen a las piezas formadas. Las masas se secan prematuramente. Durante la cocción, los cortes del pan se juntan, apareciendo barras totalmente desgarradas y con un volumen inferior al deseable. Para su corrección es necesario evidentemente disminuir el tiempo de reposo, aunque si ello no fuera posible deberá reducirse la cantidad de levadura y la temperatura de las masas básicamente [19].

2.1.4.2. Defectos en el pan durante la fermentación.

El proceso enzimático de más trascendencia en la fabricación del pan es la fermentación panaria. La obtención de un pan voluminoso, de miga uniformemente alveolada, de color satisfactorio, etc., no sólo depende de la calidad de la harina empleada, sino que también viene condicionada por el adecuado control de toda una serie de transformaciones químicas y enzimáticas que reciben el nombre de fermentación y que tienen lugar desde que comienza el amasado hasta los primeros momentos de la cocción. Desde un punto de vista estrictamente químico, la fermentación panaria no es diferente de la fermentación alcohólica del vino o de la cerveza, aunque en la práctica presenta caracteres distintivos que justifican su estudio particular [20].

Algunos defectos relacionados con la fermentación:

- Desmigajado: agua muy caliente, mucha fermentación, demasiada sal, mucho trabajo en la masa.
- Falta de volumen: masa madre muy pesada, demasiado reposo, mejorante de masa inactivo, poca levadura.
- Falta de color en el pan: fermentación prolongada, masa muy compacta, temperatura del horno baja, harina con baja actividad enzimática.
- Color amarillo en la miga: período de fermentación excesivo por haber sido llevada ésta a una temperatura demasiado baja.

2.1.5. Propiedades morfogeométricas de los alimentos.

El conocimiento de las propiedades morfogeométricas y atributos relacionados de los alimentos, constituyen una información fundamental de ingeniería para adecuar y operar máquinas, diseñar y construir estructuras de almacenamiento, montar sistemas adecuados de transporte, además, es un parámetro fundamental para el diseño de empaques, en el análisis de calidad y en el control de procesos [21].

El análisis morfométrico geométrico consta de tres etapas fundamentales: obtención de los datos primarios, obtención de las variables de la forma, y análisis estadístico. El extenso uso que se le ha dado en los últimos años en áreas afines a las ciencias morfológicas hace necesario el conocimiento de la técnica tanto con fines formativos como para su aplicación a la solución de problemas en los que la morfología juega un rol esencial [22].

La aplicación de la estadística multivariada al estudio de la covariación de la forma con sus factores casuales dio un gran paso con el uso de datos multidimensionales que logran capturar la geometría de la estructura objetivo. Esto significa que la forma del objeto en estudio no se describe en términos de sus dimensiones, sino de la relación espacial entre sus partes. La información relativa a la geometría de los objetos se puede recuperar, lo que permite la visualización de los cambios morfológicos [22].

Para el estudio de las propiedades morfogeométricas se requiere de los siguientes conceptos:

- **Volumen**

Es el espacio tridimensional que ocupa un cuerpo, se determina por desplazamiento de líquidos (generalmente agua) en sólidos, ya que los líquidos y gases adoptan la forma del recipiente que los contiene. Estos son métodos muy precisos, útiles si la muestra no absorbe rápidamente líquido [21].

- **Dimensiones (Largo, ancho y espesor)**

Son parámetros que permiten determinar propiedades como tamaño, redondez, esfericidad y semejanza a determinadas formas geométricas dichos parámetros generalmente están basados en 3 dimensiones ortogonales: longitud (L), ancho (W) y espesor (T) (Rojas & Aristizabal I. 2011). Además, los instrumentos mayormente utilizados para medirlas es el pie de rey o vernier y el micrómetro [21].

- **Diámetros equivalentes (Aritmético y Geométrico)**

Es el promedio de tres dimensiones perpendiculares entre sí. Se puede utilizar para especificar el tamaño medio de la partícula usando u solo diámetro (equivalente) (López, 2017). Dependiendo de la forma de cálculo existen dos tipos de diámetro equivalente [21].

Diámetro medio geométrico

$$Dg = (L * W * T)^{\frac{1}{3}}$$

Diámetro medio aritmético

$$Da = \frac{L + W + T}{3}$$

L = longitud (mm)

W = ancho (mm)

T = espesor (mm)

Da = Diámetro medio aritmético

Dg = Diámetro medio geométrico

- **Área superficial**

Es la cantidad de área que ocupa un objeto sumando cada área de las superficies que lo conforman.

- **Índice de redondez**

Se define como una medida de la agudeza de las esquinas de un sólido.

2.1.6. Esfericidad

Es un factor de forma muy empleado. Es la razón entre el área superficial de una esfera de volumen igual a la partícula y el área superficial de la partícula. Siempre tiene valores menores que la unidad, ya que la esfera es la figura geométrica que tienen menor superficie para un volumen dado [23].

2.1.7. Porosidad

La porosidad es la relación entre el volumen de los poros y el volumen aparente del poroso. Los productos alimentarios, como los alimentos horneados, extruidos, inflados, secos y congelados tienen una microestructura porosa inherente que da al producto su textura característica medida en términos de propiedades físicas como la resistencia a la tracción, la resistencia a la compresión y la rigidez (Stasiak y Jamroz 2009).

La porosidad es el parámetro de la estructura macroscópica de los poros que se desarrolla juntamente con la estructura microscópica de los poros. Los parámetros de la estructura microscópica de los poros pueden resumirse como el área de superficie específica, el tamaño medio de los poros y las distribuciones del tamaño de los poros basadas en el volumen [24], el área de superficie y el número de poros, el grosor de la pared celular, las distribuciones de la forma de los poros, los índices de polidispersidad para los tamaños y formas de los poros y la interconectividad de los poros. Estos parámetros de la estructura microscópica de los poros también afectan a las propiedades de transporte, como la difusividad térmica y la difusividad de la humedad, así como a la textura [2].

Se sabe que el cambio en la porosidad y la estructura celular de los materiales alimentarios durante el procesamiento, como en el caso de los alimentos precocinados, influye en las tasas de procesamiento, los mecanismos y por lo tanto la calidad del producto. La porosidad y la estructura celular influyen en la textura final y la sensación en la boca de los alimentos preparados [2].

2.1.8. Método de análisis 2D con imageJ.

ImageJ es una gran herramienta para procesar imágenes y realizar análisis 2D. Como admite una gran cantidad de formatos de imagen diferentes, es un excelente visor de imágenes y permite una gran cantidad de operaciones basadas en píxeles. También admite imágenes con profundidades de bits superiores a 8 o 16 bits por canal [25].

El formato de imagen predeterminado de ImageJ es el formato de archivo de imagen etiquetado (TIFF). Este formato permite el almacenamiento de datos multidimensionales y admite muchos campos de meta información para calibración, información de adquisición de datos y descripciones. También puede almacenar información sobre elementos como superposiciones. Las anotaciones gráficas se colocan en la imagen en una capa separada. Las medidas se beneficiarán de la calibración incluida en la imagen, lo que permite una rápida retroalimentación de los tamaños en la unidad apropiada [25].

ImageJ puede realizar conteo de estructuras en una imagen bidimensional. El proceso es totalmente dependiente de la configuración que el usuario introduzca para realizar dichos conteos [26]. Los operadores morfológicos utilizados, es decir, la erosión, la dilatación y su combinación, la apertura y el cierre, modifican las imágenes en función del tamaño y la intensidad de las regiones brillantes y oscuras.

2.1.8.1. Segmentación de imagen.

Para muchos pasos en el análisis de imágenes, es importante dividir la imagen en dos componentes separados (que no se superpongan). Estos componentes suelen estar etiquetados como fondo y primer plano. En términos generales, el fondo es la parte de la imagen que no nos interesa directamente cuando analizamos la imagen. Normalmente restringimos nuestro análisis a partes de la imagen que se consideran en primer plano. Esta división en dos componentes se denomina segmentación y se basa principalmente en la intensidad de los píxeles. Esto es importante si desea contar y medir una cantidad de objetos únicos de un tipo específico o medir la intensidad de un solo objeto complejo excluyendo el fondo de la medición [27].

2.1.8.2. Procesamiento morfológico de imágenes.

Después de segmentar la imagen en los dos componentes, queda una máscara o imagen binaria. Estas máscaras no siempre son adecuadas para la medición directa. Las imperfecciones en la imagen pueden dar como resultado espacios en los objetos o pequeñas

discontinuidades en las estructuras. Además, algunas áreas pueden detectarse como primer plano cuando en realidad no son objetos de interés. Puede corregir esto manualmente convirtiendo los píxeles que faltan en blanco o negro para incluirlos o excluirlos, respectivamente. En algunos casos, este podría ser el único recurso posible. Sin embargo, en muchos casos, hay algunos pasos de procesamiento disponibles que pueden solucionar estos problemas de manera sistemática [27].

2.1.8.3. Extensión de ImageJ FIJI.

FIJI se basa en ImageJ, pero tiene más funciones preinstaladas (complementos y macros) [27]. Aunque mayormente son utilizados para el procesamiento de imágenes en las ciencias de la vida como la microscopía de fluorescencia también se emplea en otras ramas de la ciencia.

2.1.8.4. Imagen Digital.

Las imágenes digitales son cuadrículas bidimensionales de valores de intensidad de píxeles con el ancho y el alto de la imagen definidos por el número de píxeles en X (filas) y Y (columnas) dirección. Por lo tanto, los píxeles (elementos de la imagen) son los componentes individuales más pequeños de las imágenes y contienen valores numéricos (intensidades de píxeles) que oscilan entre el blanco y el negro. Las características de este rango, es decir, el número de valores únicos de intensidad (brillo) que pueden existir en la imagen, se define como la profundidad de bits de la imagen y especifica el nivel de precisión en el que se codifican las intensidades, por ejemplo: A 2– la imagen de bits tiene22=4tonos: 00 (negro), 01 (gris), 10 (gris) y 11 (blanco) [28].

Una imagen se construye usando píxeles, donde cada píxel tiene un valor que está codificado por bits. El número de bits determina el número de valores de gris o colores que se pueden representar. [27]. ImageJ, más específicamente su extensión FIJI, permite guardar imágenes en diferentes tipos de archivos. El tipo de archivo preferido utilizado por ImageJ es TIFF, ya que permite el almacenamiento de metainformación adicional, superposiciones de regiones de interés e información de calibración [27].

2.1.8.5. Formato de imagen TIFF.

Un archivo TIFF, cuyo nombre es la sigla de “Tag Image File Format” (formato de archivo de imágenes con etiquetas), es un archivo informático que se emplea para almacenar

información de imágenes y gráficos rasterizados [29]. TIFF es un formato de imagen de tramas versátil y flexible. Hoy en día, TIFF es el formato estándar para fotografías rasterizadas y para transmitir datos de impresión. En un formato TIFF, cualquier objeto, incluida la información vectorial y de texto, se almacena como datos de trama. Un canal alfa permite que los píxeles individuales sean transparentes además de almacenar información de color. Un archivo TIFF admite escala de grises y RBG, CMYK y espacio de color LAB [30].

2.1.8.6. Cuantificación de imágenes digitales.

Para obtener unos resultados fiables y reproducibles es fundamental que la adquisición se haga de forma correcta y de una forma compatible con el tipo de análisis que se va a realizar. Por ejemplo, para realizar un análisis morfométrico (distancias, tamaño, superficie, etc.) no basta con conocer la magnificación del objetivo que estamos utilizando, sino que es fundamental que la imagen este correctamente calibrada [28].

2.2. Marco referencial.

Alper y Hicsasmaz (2013) en su libro “Estructura de Poros en Alimentos” señalan que la influencia de la microestructura en las tasas de proceso y la textura del producto es ampliamente aceptada. La simulación de la estructura de poros de varios materiales alimentarios y numerosos procesos alimentarios ha atraído recientemente la atención en la literatura alimentaria. Se sabe que el cambio en la porosidad y la estructura celular de los materiales alimentarios durante el procesamiento (Madiouli et al. 2012; Khalloufi et al. 2009; Hussain et al. 2002), como en el caso de los alimentos precocinados, influye en las tasas de procesamiento, los mecanismos y por lo tanto la calidad del producto. La porosidad y la estructura celular influyen en la textura final y la sensación en la boca de los alimentos preparados [31].

Baima y Ribotta (2019) se plantearon el objetivo de evaluar los cambios morfométricos, fractales y de color durante la deshidratación de rodajas de banana mediante el uso de análisis de imágenes y la relación de estos parámetros con la cinética de secado. El secado convectivo se realizó entre 75 °C y 134 °C a una velocidad de aire de 0,65 m s^{-1}. Esto probablemente debido a que, desde el punto de vista biológico, la banana es una de las frutas que presenta las mayores pérdidas por descomposición después de la cosecha ya que es extremadamente perecedera y su preservación puede reducir estas pérdidas y aumentar la disponibilidad de

la oferta mundial de alimentos. Se obtuvieron imágenes de las rodajas de banana fresca y deshidratadas a diferentes tiempos y temperaturas, las imágenes se obtuvieron con cámara digital Panasonic Lumix, modelo DMC-TZ3 con iluminación fija e igual en cada ensayo. Las fotografías se tomaron sin flash, sin zoom, con autodisparador, en modo macro y con ajuste en "modo fino". Se colocó una regla milimetrada que sirvió como referencia para calibrar las imágenes y convertir pixeles en centímetros. Las imágenes RGB en formato de archivo JPG se analizaron con el programa ImageJ versión 1.49. El área (A) inicial promedio de las rodajas determinada por análisis de imágenes estuvo comprendida en el rango de 6,85 a 7,42 cm2. El proceso de secado provocó el encogimiento de las rodajas de banana fenómeno esperado en este tipo de procesos resultando en un área final entre 6,16 y 6,47 cm^2. La reducción de área en T1 fue mayor (13%) debido a que la deshidratación fue más lenta y provocó un efecto de contracción más acentuado. Por el contrario, cuando la deshidratación fue rápida (T2 y T3) la estructura se rigidizó más rápidamente y mostró menor encogimiento y por consecuencia mayor área de rodaja [32]

En un estudio realizado por Flores y flores (2015) con el objeto de evaluar las propiedades estructurales de pan de molde con sustitución parcial de harina de trigo por harina de Quinua (Chenopodium quinoa Willd) y harina de Cañihua (Chenopodium pallidicaule Aellen) mediante análisis de imágenes se utilizó dos variedades de Quinua: Blanca de Juli y Kancolla y dos variedades de Cañihua: Cupi y Ramis, se tomaron como factores de variación el porcentaje de sustitución (5 %, 10 %, 15 % y 20 %) utilizando el modelo estadístico lineal bajo el diseño completo al azar con arreglo factorial, para determinar la estructura de los panes de molde utilizados en la investigación se determinó la porosidad, dimensión fractal, textura y color, donde los valores de porosidad son independientes unos de otros, variando entre (65.70 % - 87.23 %).

Por otra parte, Wang, Austin y Sumana (2011), utilizaron pruebas de permeabilidad y análisis de datos de microtomografía asistidos por computadora para investigar la estructura de los panes en función de la conectividad de los vacíos en una variedad de panes. Los hallazgos se relacionaron con las propiedades del pan obtenidas a través de pruebas de materiales. Los resultados indicaron que una sola celda abierta, masivamente interconectada, era responsable de aproximadamente el 99 % de la porosidad total del pan. Los poros cerrados también están presentes con el número y el volumen promedio de poros cerrados que afectan significativamente la resistencia de las migas de pan [33].

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

3.1. Localización.

Finca Experimental "La María", Universidad Técnica Estatal de Quevedo, la misma que está ubicada en el Km 7.5 vía Quevedo – El Empalme, entrada al cantón Mocache, Provincia de Los Ríos.

Tabla 2. *Condiciones meteorológicas Finca Experimental "La María"*

Datos	Valores Promedio
Humedad Relativa	86 %
Temperatura	20-24 °C
Precipitación (mm anual)	3071.26 mm
Heliofania	626 h/luz
Ubicación Geográfica	01° 05' 20" de latitud sur y 79° 27' 21" de latitud oeste y a una altura de 110 metros sobre el nivel del mar

Fuente: Urgilés [34]

3.2. Tipos de investigación.

3.2.1. Investigación exploratoria.

El desarrollo de la investigación comienza con la exploración de un modelo estandarizado para la elaboración de pan molde, obteniendo resultados variables en la porosidad debido al cambio de los porcentajes de levadura impuestos en el estudio. Por otra parte, el uso del software FIJI de ImageJ, presenta cierto grado de complejidad respecto del uso específico para creación de una metodología que presente los resultados del análisis de las imágenes digitales del pan mencionado, para ello, se exploran los distintos métodos de segmentación, procesamiento y cuantificación de células presentes en el material evaluado, así como la determinación de la rugosidad denominada dimensión fractal de las estructuras obtenidas.

3.2.2. Investigación descriptiva.

Para llegar al proceso de análisis de imágenes digitales de las distintas muestras evaluadas, se describen los pasos a seguir para la obtención de resultados cuantificables y objetivos, de esta manera se detalla la elaboración del pan molde con las diferentes concentraciones de lavadura que dieron lugar a panes que tienen distinta porosidad, por lo tanto, presentan diferencias en el volumen. También se describe la medición de los tratamientos a través del software ImageJ versión 1.8.0-322. extensión FIJI y el análisis numérico a través del

software STATGRAPHICS; versión 16.1.03., los tratamientos descritos son 12, de los cuales se extraen un total de 36 imágenes digitales.

3.2.3. Investigación experimental.

Para determinar la existencia de variabilidad de los tratamientos realizados, se toman los resultados obtenidos mediante el análisis de imagen y se establece un diseño completamente al azar (DCA) con una significancia del 95%, siendo el proceso estadístico evaluado mediante una prueba de significancia LSD ($P > 0.05$). Esto permite conocer la influencia que tiene la variación de la levadura en los parámetros morfo-geométricos medidos.

3.3. Método de investigación.

3.3.1. Método.

La siguiente metodología será utilizada para el análisis de las variables en estudio: cinética de secado, porosidad, análisis digital de imagen 2D, análisis de imagen fractal, área forma y tamaño del poro.

3.3.1.1. Elaboración del pan molde.

Se receptó la materia prima para la elaboración del pan de molde se procedió al pesado de los ingredientes de acuerdo a los porcentajes establecidos: harina (58 %), mantequilla (3 %), leche (16 %), agua (16 %), sal (1%), azúcar (4 %) y la cantidad de levadura acorde a la metodología para la variación en la porosidad. Seguidamente la mezcla se realizó en dos pasos; la mezcla de los ingredientes sólidos y la mezcla de la leche, el agua y la levadura, todo esto a temperatura ambiente, luego las dos mezclas se vertieron en el tazón de la batidora y los ingredientes fueron homogeneizados a velocidad baja (50 RPM para el movimiento giratorio del gancho en espiral y 5 RPM para el movimiento de rotación del tazón de la batidora), se retiró de la batidora y luego se cubrió la masa, se dejó reposar por 15 minutos. Se procedió a lubricar los moldes.

Pasado este tiempo se volvió a colocar el tazón de la amasadora a velocidad alta (100 RPM para el movimiento giratorio del gancho en espiral y 8 RPM para el movimiento de rotación del tazón de la batidora) durante un período de 10 minutos. Se colocó la masa en el molde previamente engrasado y se procedió a la fermentación por 1 hora 45 minutos. Transcurrido este tiempo se introdujo la masa en el horno Mabe EM7640, seguidamente se horneó a 180 °C por 35 minutos. Se retiró del horno y se dejó enfriar por 3 horas aproximadamente y se

procedió al corte. Para mantener las características del pan de molde se guardaron las rebanadas en una bolsa hermética hasta el momento de los análisis.

3.3.2. Análisis de imagen digital 2D con software ImageJ.

3.3.2.1. Preparación de las muestras.

Se prepararon las muestras en diferentes días. Una vez que se ha horneado la masa se obtuvo el pan molde, luego de 3 horas de enfriamiento a temperatura ambiente (23 °C) fueron cortados en rebanadas con un cuchillo sierra de forma manual con 1,5 cm de grosor en cada rebanada, para la conservación de la humedad cada rebanada fue introducida en una bolsa hermética de polietileno hasta la adquisición de las imágenes.

3.3.2.2. Adquisición de las imágenes de pan de molde.

Para la adquisición de las imágenes se utilizó un escáner EPSON L380 tipo Cama Plana, según los parámetros descritos en los puntos 4.1.3. y 4.1.4., por otra parte, con la finalidad de que exista señal que no interese en el estudio se recalca que el proceso de escaneo fue estrictamente en ausencia de luz.

3.3.2.3. Segmentación.

La aplicación de la segmentación a las imágenes bajo los parámetros ya mencionados se realizó para la separación de la señal de interés, en este caso la cantidad y tamaño de los poros que presentó cada imagen, de esta forma se elimina la señal que no pertenece a las imágenes estudiadas. La imagen a color es transformada a una escala de grises (8bit), para luego aplicar un proceso de umbralización, que se estableció de manera manual. La frecuencia o número de poros formados de cada tamaño se establecerá en base a una distribución geométrica [35]

3.3.3. Cinética de secado.

Durante el horneado se medió la humedad de la masa antes, durante y luego del proceso de horneo con el fin de obtener la cinética de secado. La cinética de secado se estudió en base a la pérdida de masa de la muestra. El contenido de agua residual presente en las muestras obtenidas se calculó con base en la Eq. (1) y se utilizaron para obtener la evolución de la relación de humedad (MR) (Ec. 2).

$$X_{wt} = \frac{m_o * X_w^o - (m_o - m_t)}{m_o * (1 - X_w^0)} \qquad (1)$$

Donde X_{wt} es el contenido de agua de la muestra en cada tiempo de proceso (g agua/g muestra, db); m_o y X_{wo} es la masa (g) y el contenido de agua (g agua/g muestra) de la muestra que ingresa al horno, respectivamente; m_t es la masa de la muestra horneada (g).

$$MR = \frac{X_{wt} - X_{we}}{X_{wo} - X_{we}} \approx \frac{X_{wt}}{X_{wo}} \qquad (2)$$

Donde X_{wt}, X_{wo} y X_{we} indican el contenido de agua (g agua/g muestra, db) en el tiempo t, tiempo 0 y en equilibrio, respectivamente. Los valores de equilibrio del contenido de agua suelen ser muy bajos, y la ecuación. (2) a menudo se simplifica, asumiendo X_{we}= 0 sin un cambio significativo en el valor de MR [35]

3.3.4. Porosidad volumétrica.

La porosidad (ε) de las muestras se estimará a partir de la densidad aparente (ρ_{app}) y real (ρ) utilizando la ecuación. (3-5) [35].

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{app}}{\rho} \qquad (3)$$

$$\rho_{app} = \frac{W}{\Pi * r^2 * H} \qquad (4)$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{X_w}{\rho_w} + \frac{X_{CH}}{\rho_{CH}} \qquad (5)$$

Para determinar la densidad aparente (Ec. 4), se utilizó un punzón cilíndrico para obtener, por triplicado, un trozo de cada muestra que se medió en altura (H), luego pesado (W) con balanza analítica. La densidad real de cada muestra se calculó a partir de la fracción másica y la densidad a 20 ºC del agua (Xw, w/w; ρw=0.9976 g/cc) y carbohidratos (XCH,p/w; ρCH 1.4246g/cc) (Choi y Okos, 1986), respectivamente (Ec. 5).

3.4. Fuentes de recopilación de información.

Para la realización del presente trabajo de investigación se tomó en cuenta como fuente principal de información, los datos extraídos del Software ImageJ extensión FIJI y como fuentes de información secundarias se ha recopilado información de Libros, Artículos Científicos, Revistas científicas, Internet y Normas (INEN).

3.5. Diseño experimental.

La diferencia que presenten los ensayos de horneo de las muestras con diferentes niveles de levadura se evaluaron mediante un diseño completamente al azar (DCA) con una

significancia del 95%, el proceso estadístico se evaluó mediante una prueba de significancia LSD (P > 0.05), Además para establecer las relaciones existentes entre la porosidad medida con análisis de imagen y la obtenida por análisis físico frecuencia de los poros, esfericidad, tamaño de poro, se evaluó mediante un análisis de regresión lineal simple con una significancia del 95%. Estos análisis se realizarán en el software estadístico STATGRAPHICS; versión 16.1.03. Los tratamientos evaluados son 4 con tres repeticiones obteniendo un total de 12 tratamientos.

Tabla 3. Descripción de los tratamientos en estudio para el horneo.

Tratamiento	Descripción
T1	Pan horneado con 0.5% levadura
T2	Pan horneado con 1% levadura
T3	Pan horneado con 1.5% levadura
T4	Pan horneado con 2% levadura

Tabla 4. Esquema del análisis de varianza (DCA) para las variables en estudio.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad		Cuadrados medios	Razón de varianza
Tratamiento	SCT	(t-1)	3	CMT= SCT/(t-1)	CMT/CME
Error	SCE	t(r-1)	8	CME= SCE/t(r-1)	
Total	SCT	(t*r)-1	11		

3.7. Recursos humanos y materiales-

3.7.1. Recursos humanos.

- Ing. Luis Egas Astudillo PhD, Tutor-UTEQ
- Lady Leonor Vergara Ortega Tesista-UTEQ

3.7.2. Recursos materiales.

Materiales

- Cuchillo grande
- Recipientes
- Colador
- Envases
- Refrigerador
- Cofia
- Guantes
- Mandil
- Mascarilla
- Balanza
- Fundas de basura
- Pipetas
- Probetas
- Vaso de precipitación

Equipos

- Horno
- Batidora
- Termómetro
- Software ImageJ.
- Balanza analítica
- Escáner
- Desecador

Insumos

- Agua
- Harina trigo
- Levadura
- Grasa
- Aceite
- Sal
- Azúcar
- Silica gel

Software

- MATLAB (The Language of Technical Computing) version 8.1.0.604 (R2013a).
- ImageJ version 1.8.0-322 (Image Processing Program) extensión FIJI.
- Statgraphics plus versión 5.1.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Desarrollo del método para medir porosidad en pan de molde mediante escaneo y procesamiento digitales 2D.

4.1.1. Elaboración de pan de molde.

Se elaboraron 12 muestras de masas panarias base para pan de molde, dentro de la formulación se modificó la concentración de levadura (0.5 %, 1 %. 1.5 % y 2 %) con el fin de obtener panes con diferente porosidad luego del horneado. En la elaboración de pan se mantuvieron constantes los demás ingredientes, la temperatura y el tiempo de horneo 180 ºC x 35 min, además del tiempo de leudado luego que fue de 2 horas con dos tiempos de reposo el primero de 15 minutos luego del mezclado de los ingredientes y el segundo de 1 hora y 45 minutos luego de un amasado de 10 minutos.

4.1.2. Preparación de la muestra.

Foto 3. Cortado de 1.5 cm por rebanada.

Fuente: Autora

Foto 4. Pan dentro del molde de papel

Fuente: Autora

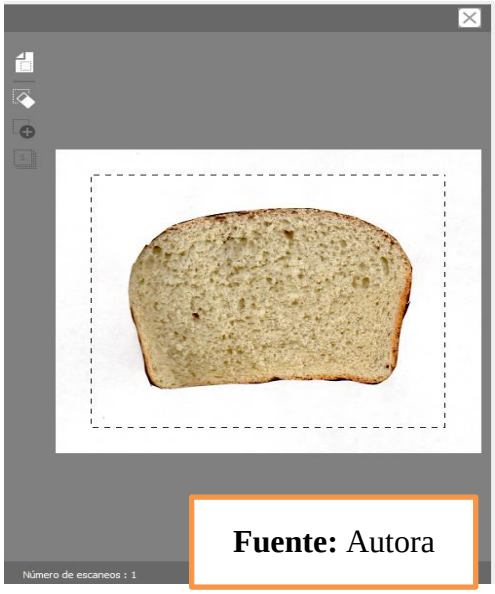
Foto 5. Colocación de la muestra en el escáner.

Fuente: Autora

Las muestras a ser escaneadas fueron cortadas Seguidamente cada muestra se sobrepuso encima de una hoja de papel bond tamaño A4 previamente que actúa de molde para eliminar el fondo negro dejado por el espacio vacío generado en el escaneo.

4.1.3. Preparación de la muestra para el escaneo.

Figura1. Imagen desde la configuración del escáner.



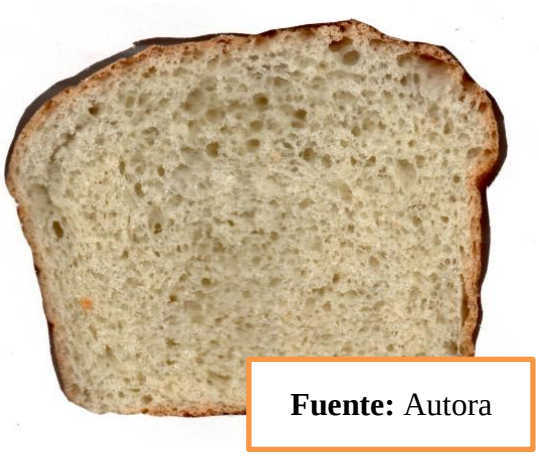
Fuente: Autora

Considerando efectos de la luz dentro de la adquisición de imágenes, el proceso de escaneo se realizó en ausencia de luz externa mediane la colocación de una caja de cartón cubriendo el escáner, con el fin de eliminar el ruido en el análisis. Para la adquisición de las imágenes se tomaron tres muestras por cada tratamiento efectuado dando un total de 36 imágenes.

4.1.4. Escaneo y obtención de las imágenes digitales.

Las muestras se sometieron a escaneo utilizando un escáner marca Epson L338 tipo Cama Plana, dispositivo fotoeléctrico CMOS con sensor de imagen de contacto (CIS), con una resolución de 400 ppp obteniendo archivos de imagen en formato TIFF los cuales fueron objeto del análisis por parte del software ImageJ 1.8.0-322. El tamaño de la imagen en el scanner se ajustó a dimensiones 140.8 mm de ancho x 112.4 mm de largo. Obteniendo así imágenes RGB en archivos con formato TIFF.

Foto 6. Imagen digitalizada en formato tiff.



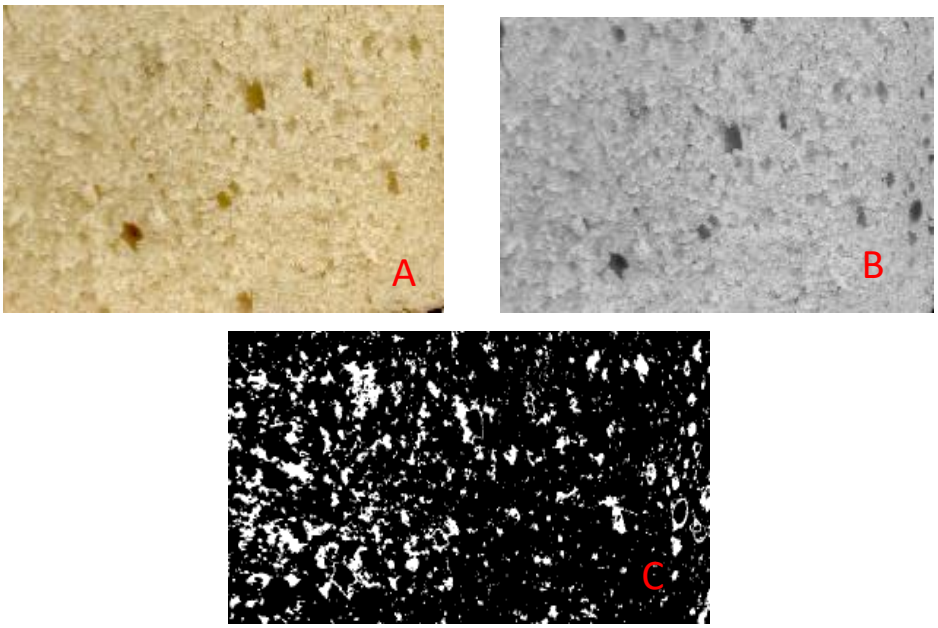
Fuente: Autora

4.1.5. Análisis de imagen digital 2D con software ImageJ.

4.1.5.1. Umbralización.

La imagen RGB se procede a abrirla en el programa ImageJ extensión FIJI y desde el menú imagen es convertida a escala de grises (8 bits), posteriormente desde el mismo menú de se procede a la umbralización encontrando los valores óptimos entre 100 para la umbralización inferior y 155 umbralización superior esto permite observar las imágenes binarias con los objetos de interés.

Figura 2. Esquema del proceso de umbralización. (A) imagen RGB formato tiff, (B) imagen a escala de grises (8 bits), (C) imagen aplicada la umbralización.



Fuente: Autora

4.1.6. Obtención de datos numéricos acerca de la morfo-geometría de los poros.

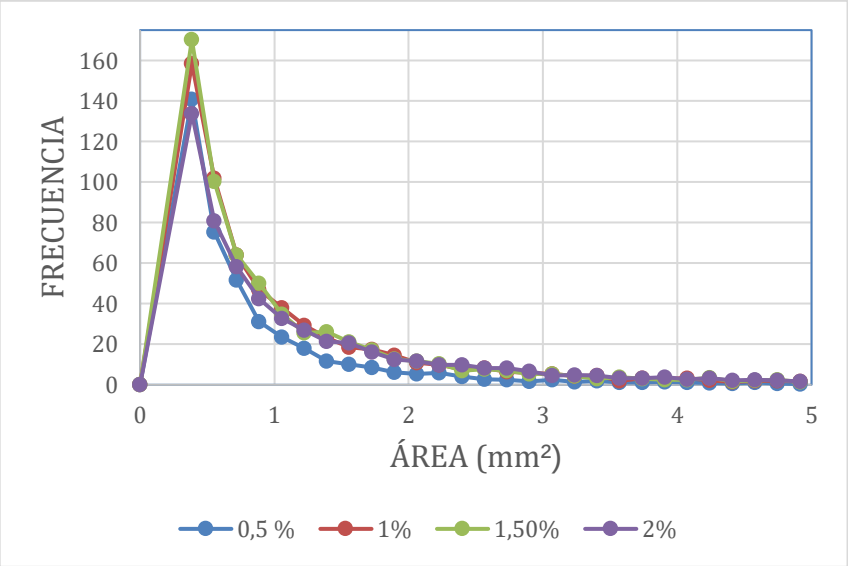
Desde el menú analizar partículas se escogieron áreas de partículas entre de 0.2 mm^2 a 5 mm^2, y una circularidad de 0.1 a 1, es decir, que se tomó en cuenta la mayoría de partículas presentes en las muestras. Al mismo tiempo en la ventana se presiona el operador mostrar cubrir y de esta manera quedó establecida la calibración de las imágenes en milímetros, quedando la equivalencia de 40 pixeles por milímetro. Con el operador cubrir se mostrarán las áreas vinculadas a las mediciones.

4.2. Determinación de la porosidad en el pan de molde a distintas concentraciones de levadura (0.5 %, 1 %. 1.5 % y 2 %).

Para la determinación de la porosidad fue necesario la utilización de la metodología descrita en el apartado 4.1.6. en lo referente a la medición del poro específicamente, determinación del área del poro. Luego para la caracterización de esas mediciones fue necesario la tabulación de los datos mediante tablas de frecuencias (anexo B) las cuales se realizaron en el software estadístico Statgraphics.

El comportamiento del área de los poros a diferente concentración de levadura se muestra en la figura 1 como se puede apreciar la metodología establecida permite la identificación de las diferentes áreas de poros formados en el proceso de horneo.

Gráfico 2. Frecuencia de acuerdo al área de los poros.



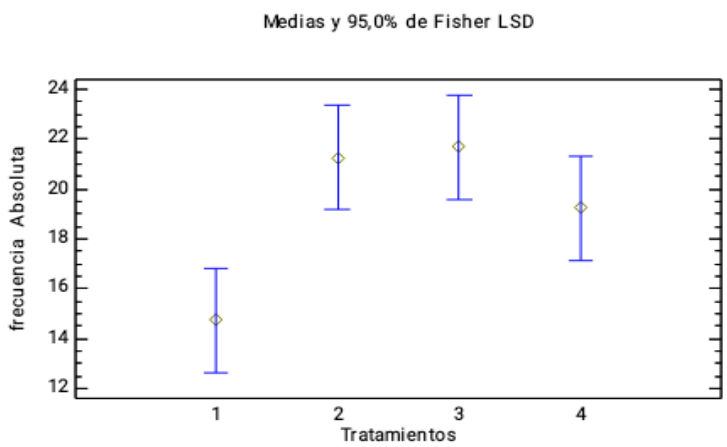
En el **Gráfico 2 s**e observa que la mayor frecuencia de poros entre 0 y 1,5 mm^2 se obtienen cuando la concentración de levadura es del 1 y 1.5% en tanto que la frecuencia de poros disminuye cuando la concentración de levadura es del 0.5 y 2 % este comportamiento en la frecuencia de aparición de poros pequeños quizás se deba a la mínima concentración de levadura presente en la masa por una parte, luego cuando la concentración de levadura es mayor la presencia de poros pequeños en menor cantidad se deba a la selección del intervalo para la estandarización de la medida.

Sin embargo, se observa que cuando las áreas son de mayor tamaño 1 a 2 mm^2 el comportamiento de las concentraciones de levadura es relativamente similar a excepción de la concentración 0.5 % que muestra un decremento en la formación de este tamaño de poros quizás este comportamiento se debe a la baja concentración de levadura en la maza panaria.

En un estudio realizado por Piyush [36], en el que trata acerca del impacto del reposo en la conformación de la porosidad y habiendo utilizado levadura seca se observó aumento de la porosidad a mediad que aumentaba el tiempo de reposo. Por otro lado, conociendo la influencia que tiene la levadura en las masas panarias y, aunque no se varíe el tiempo de reposo o fermentación, se hace un contraste con el estudio mencionado y se encuentra lógico que a mayor presencia de levadura mayor aumento en el tamaño de los poros.

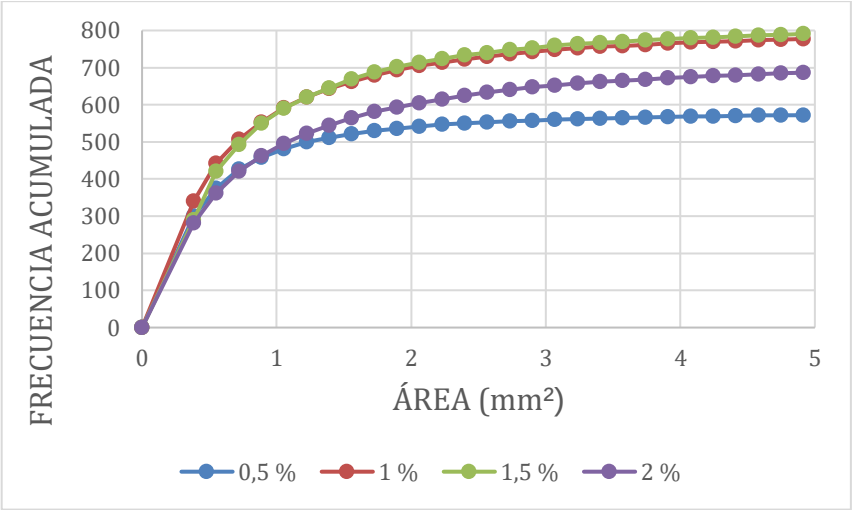
En la **tabla 6** se muestra el análisis de varianza ANOVA de la frecuencia de la porosidad para los tratamientos a un nivel de significancia del 95 %, aquí se muestra un resultado estadísticamente diferente para los tratamientos. Seguidamente en la **tabla 7** de las pruebas de diferencia significativa LSD, muestra que las diferencias entre las medias de los tratamientos son mayores para el porcentaje de levadura de 0,5 % con respecto a las demás concentraciones de levadura.

Figura 3. Frecuencia absoluta de los tratamientos.



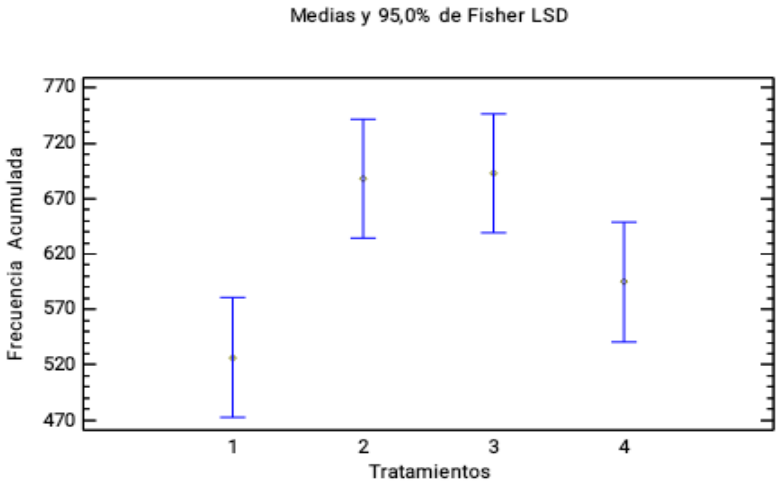
En la **figura 2** se observa que existe una diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos 1 y 5 que representan a los porcentajes 0,5 y 2 % respectivamente. Mientras que los tratamientos 2 y 3 correspondientes a los porcentajes 1 y 1, 5 % de concentración de levadura se muestran homogéneos, sin embargo, para Hicsasmaz [2], los alimentos sólidos porosos horneados no exhiben una estructura de poros uniforme, es decir, los tamaños de los poros varían en varios órdenes de magnitud.

Gráfico 4. Frecuencia acumulada.



Según el gráfico 4, para los datos de frecuencia acumulada existen aproximadamente 400 objetos (poros) medidos con el software ImageJ extensión FIJI que son menores o iguales a este valor, también se puede observar que existe una ligera variación entre 1 % y 1,5 % de levadura añadida. Aunque para el 0,5 % y 2 % de levadura añadida existen aproximadamente 500 valores menores a 1 mm2 y a partir de aquí, se puede notar que para el 2 % de levadura existen mayor cantidad de objetos de mayor tamaño, así como también para el 0,5 % las áreas entre 2 mm^2 y 5 mm^2 se mantienen constantes. En la figura 3 se puede observar que existe una diferencia significativa entre los tratamientos 1 y 4 siendo el primero el de menor acumulación seguido del tratamiento 4, y los tratamientos que pertenecen al 1 y 1,5 % presentan mayor acumulación y mayor uniformidad en el área de los poros.

Figura 4. Frecuencia acumulada de los tratamientos.



4.3. Caracterización de la cinética de secado y su influencia en la porosidad del pan de molde.

4.3.1. Modelado de la cinética de secado.

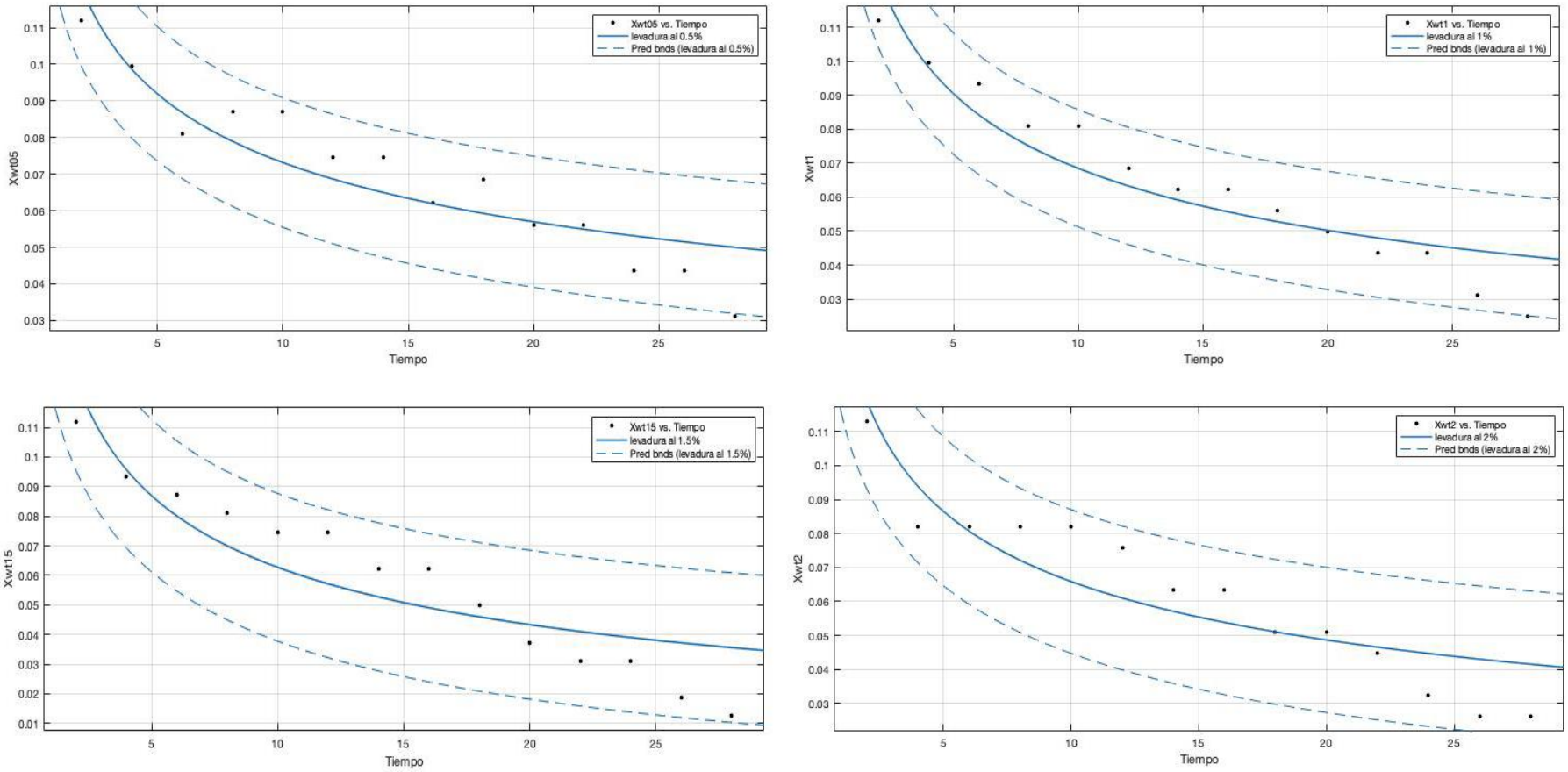
Tabla 5. *Modelado de la cinética de secado.*

Tratamientos	Modelo cinético	k	n	R^2
T1	exp(-k*t^n)	1,929	0,132	0,8234
T2	exp(-k*t^n)	1,864	0,1579	0,8707
T3	exp(-k*t^n)	1,827	0,1807	0,7978
T4	exp(-k*t^n)	1,916	0,1523	0,7976

En la figura 4 se puede observar la cinética de deshidratación del pan de molde a diferentes concentraciones de levadura, así mismo los modelos ajustados y obtenidos se pueden observar en el anexo B para cada una de las concentraciones de levadura. Los valores de k en el modelo se observan dentro de un intervalo que esta entre 1.827 -1.929 de acuerdo con la literatura este valor tiene relación con la temperatura y tiende a aumentar cuando aumenta la misma para el caso de nuestro proceso la temperatura siempre fue constante más sin embargo se quiso observar si la concentración de levadura mostraba alguna influencia en la velocidad de secado que es la interpretación que regularmente se le da a la constante K en un modelo.

Por otro lado el valor de n de acuerdo a varios autores es un parámetro adimensional que tiene que ver con la el material a ser secado más que con la temperatura de secado y se observa que a medida que la concentración de levadura aumenta este coeficiente aumenta esto se da de forma constante hasta llegar a la concentración de 1.5% valor de n=1.80, cuando se habla de un 2% de levadura este valor decae nuevamente a valores de n=1.523 ese cambio repentino de esta constante del modelo quizás tenga relación con la predisposición del pan a expandirse más dado la concentración más alta de la levadura y la existencia de más aire generado por la fermentación iniciada en una aumento de la velocidad de secado como se puede observar dado que k muestra un valor elevado (1.916). lo cual es corroborado por López [36] que menciona que la porosidad en un medio a ser deshidratado disminuye la resistencia a la transferencia de calor lo que muestra a las claras de que el aumento de levadura incremento la formación de porosidad lo cual hizo que le velocidad desecado se vea aumentada.

Figura 5. Representación del modelamiento matemático para la cinética de secado para las distintas concentraciones (0.5 %, 1 %. 1.5 % y 2 %). de levadura.



CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones.

Se ha establecido una metodología que puede utilizarse para cuantificar la estructura interna de la miga del pan de molde obteniendo resultados cuantitativos para el cálculo de las propiedades mecánicas o termodinámicas. La metodología aquí planteada resulta de gran importancia puesto que podría ser utilizada en la cadena productiva a nivel industrial del pan de molde, debido a que es de fácil aplicación y de bajo costo pudiendo también aplicarse al control rápido de la calidad del producto. Teniendo en cuenta este estudio, se abre la pauta para la utilización de esta metodología como una herramienta para la automatización de procesos obteniendo datos que pueden usarse para la toma de decisiones acerca de la elaboración de producto al menor costo posible.

Los datos extraídos del análisis de imagen mediante el software ImageJ extensión FIJI y luego analizados estadísticamente, dieron lugar a la determinación de la porosidad para cada uno de los tratamientos (concentración de levadura 0.5 %, 1 %. 1.5 % y 2 %). Mediante la técnica de análisis de imagen se extrajeron datos numéricos acerca de la estructura interna del pan de molde elaborado con distintas concentraciones de levadura lo que dio como resultado la observación de la influencia de la variación de la levadura en la elaboración del pan de molde. Se pudo apreciar una diferencia estadísticamente significativa entre la concentración de 0,5 y 2 % de levadura.

La variación de la concentración de la levadura influyo en la estructura interna del pan de molde, esto tiene relación directa con la difusividad de la humedad durante el horneado. Mediante un modelo matemático se relacionó los cambios monitoreados en la estructura interna del pan. Esta caracterización puede derivarse en el control del procesamiento del pan de molde a nivel industrial. También se ha podido observar que el 2 % de concentración de levadura presenta mayor difusividad de la humedad, esto gracias a que este porcentaje presenta mayor cantidad de poros de mayor tamaño.

5.2. Recomendaciones

Para los cortes de las rodajas de pan se recomienda minimizar el impacto del corte a través de un cuchillo de línea que evita la distorsión de los poros presentados.

Es necesaria la realización de nuevos estudios con mayor variación en la levadura añadida y así poder observar cuales son los cambios generados según el aumento o la disminución de esta. También se recomienda para próximos estudios que los rangos para la adquisición de los parámetros morfo geométricos como el área sean a una escala más amplia que la de esta investigación.

Y por último se recomienda la aplicación de máscaras binarias con la finalidad de mejorar la medición de los porros presentados.

CAPÍTULO VI

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía

[1] «Enlace Horeca,» Abril 2021. [En línea]. Available: https://enlacehoreca.com/panaderia-un-oficio-de-valor/.

[2] Z. Hicsasmaz y A. Gueven, Pore Structure in Food, Estados Unidos: Springer, 2013.

[3] E. Borjesson, F. Entradas, C. Tragardh, B. Bergenstahl y M. Paulson, «Tecnología de Polvo,» *Elsevier,* pp. 453-463, 2014.

[4] E. Castiblanco, Recopilación de Técnicas en Panadería, Fundación Universitaria San Mateo, 2019.

[5] I. Payehuanca y A. Matos, «La formación de la masa, la fermentación y los métodos de proceso en la elaboración de pan,» Noviembre 2011. [En línea]. Available: http://alimentos.web.unq.edu.ar/wp-content/uploads/sites/57/2016/03/Panificacion.pdf.

[6] N. Saunders, Pan Molde Palabra a Palabra, Estados Unidos, 2017.

[7] «Sociedad Americana de Panadería,» Abril 2008. [En línea]. Available: https://asbe.org/bhof-2008-orohwedder/.

[8] J. Flores y M. Flores, «Universidad Nacional del Altiplano,» 2015. [En línea]. Available: http://tesis.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/3298/Flores_Cahuana_Jesus_Gabriel_Flores_Cahuana_Flora_Marleny.pdf?sequence=1.

[9] J. M. Mesas y M. T. Alegre, «El Pan y su Proceso de Elaboración,» *CYTA Journal Food,* pp. 307-313, 2009.

[10] H. Sánchez y C. Osella, *ESTUDIO DEL EFECTO DE ACCIONES QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS SOBRE LA MASA PANARIA.*, 2008.

[11] S. E. d. Normalización, *NTE INEN 616,* Quito, 2015.

[12] «Santa Lucía,» [En línea]. Available: https://www.santa-lucia.ec/tienda/harinas/harina-de-trigo-fortificada-lucy/.

[13] E. Chabi Yana, «Universidad Mayor de San Andrés,» 2015. [En línea]. Available: https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/9280/PG-1620-Chambi%20Yana%2C%20Eloy.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

[14] J. A. Sánchez Ortega, «Universidad de Córdova,» Septiembre 2001. [En línea]. Available: http://www.uco.es/dptos/bromatologia/tecnologia/bib-virtual/bajada/memcrepe.pdf.

[15] B. Ida, «Universidad Nacional del Litoral,» 2008. [En línea]. Available: https://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8443/handle/11185/125.

[16] F. García Olmedo, «Papel de la Fermentación en la Fabricación del Pan,» [En línea]. Available: https://oa.upm.es/8006/1/Olmedo_170.pdf.

[17] F. Astudillo Peña, *Diseño y Simulación de un Control Automático para una Cámara de Fermentación de pan por Medio de un Autómata Programable,* Quito, 2010.

[18] S. Badui, Química de los Alimentos, México: Pearson Educación, 2006.

[19] M. Flecha, Procesos y Técnicas de Panificación, 2015.

[20] F. Tejero, «Asesoría Técnica en Panificación,» 2017. [En línea]. Available: http://www.franciscotejero.com/tecnicas/elaboracion-del-pan-con-levadura-natural.

[21] M. Ibarra, «Scribd,» Noviembre 2018. [En línea]. Available: https://es.scribd.com/document/393740016/GUIA-DE-LABORATORIO-DE-PROPIEDADES-MORFOGEOMETRICAS-docx.

[22] M. Toro, G. Manriquez y I. Suazo, «Scielo,» 2010. [En línea]. Available: https://www.scielo.cl/pdf/ijmorphol/v28n4/art01.pdf.

[23] M. Gimeno, «Studocu,» 2020. [En línea]. Available: https://www.studocu.com/es/document/universidad-de-zaragoza/analisis-fisico-y-sensorial-de-los-alimentos/propiedades-morfogeometricas/10885990.

[24] A. Paraskevi, «Desarrollo de la estructura porosa durante el secado de productos vegetales agrícolas,» *Journal of Food Engineering,* 1996.

[25] J. Broeken, J. Mateos y J. Pascau, Image Processing with ImageJ, BOMBAY: Packt Publishing, 2015.

[26] M. Tapia, ImageJ para Microscopía, 2013.

[27] J. Broeke, J. M. Mateos Pérez y J. Pascau, Procesamiento de imágenes con ImageJ, Birmingham: Packt Publishing Ltd. , 2015.

[28] V. M. Campa Fernández, Análisis de Imágenes de Microscopía con ImageJ, 2017.

[29] «Adobe,» [En línea]. Available: https://www.adobe.com/la/creativecloud/file-types/image/raster/tiff-file.

[30] «Digital Guide,» [En línea]. Available: https://www.ionos.es/digitalguide/paginas-web/diseno-web/que-es-el-formato-tiff/.

[31] Z. Hicsasmaz y A. Gueven, Springer Briefs en Alimentos, Salud y Nutrición, Estados Unidos: Springer, 2013.

[32] J. S. Baima y P. Robotta, «Universidad Católica de Córdova,» 2017. [En línea]. Available: http://pa.bibdigital.uccor.edu.ar/1705/1/TM_Baima.pdf.

[33] S. Wang, P. Austin y B. Sumana, «It's a maze: The pore estructure of bread crumbs,» *Journal of Cereal Science,* pp. 204-2010, 2011.

[34] E. M. Urgilés Carrión, *Diagnóstico agro socioeconómico del control del insecto Rynchophorus palmarum en zonas palmicultoras del cantón Quevedo y Ventanas,* Guayaquil, Guayas, 2016.

[35] L. Egas Astudillo, A. Silva, M. Uscanga, N. Matínez-Navarrete y M. M. Camacho, «Impact of shelf temperature on freeze-drying process and porosity development,» *Proceeding 21st International Drying Symposium,* pp. 843-850, 2018.

[36] J. Piyush, S. Chevallier, J. Queio y R. Ashish, «Impacto del tiempo de reposo entre el amasado y la conformación sobre la porosidad de la masa y la distribución celular final en pan de molde.,» *Revista de Ingeniería de Alimentos* , nº 194, 2017.

[37] N. López, M. Andrade y H. Martínez, «Modelo matemático de la cinética de secado de espagueti enriquecido con pulpa de zapallo deshidratado,» *Revista Actualidad y Divulgación Científica*, vol. 22, nº 1151, 2019.

[38] R. Primicias, «Primicias,» Mayo 2021. [En línea]. Available: https://www.primicias.ec/noticias/economia/alza-harina-grasas-levaduras-dispara-precio-pan/ .

[39] R. Farrera, M. Salgado, J. Chanona, G. Gutiérrez, L. Alamilla y G. Calderón, «Evaluation of Image Analysis Tools for Characterization,» 2011.

[40] H. Abbate, M. Buemi, J. Gambini y C. Delrieux, «Clasificación y Segmentación de Texturas usando Dimensión Fractal y Contornos B-spline Deformables,» [En línea]. Available: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/22377/Documento_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

[41] J. Botero Valencia y A. Restrepo Martínez, «Análisis de Textura en Panes Usando la Matríz de Coocurrencia,» *Revista Politécnica* , pp. 75-80, 2010.

[42] H. Greenfield y D. Southgate, Datos de Composición de Alimentos, Roma : B.A. Burlingame y U.R. Charrondiere, 2003.

[43] C. Dueñas Gallegos y A. Navarrete López, Tecnología de Prodictos Horneados, México: Instituto Politécnico Nacional, 2000.

[44] J. C. Russ, Image Analysis of Food Microstructure, New York Washington: CRC PRESS, 2005.

[45] S. Sahin y S. Gülüm, «Physical Properties of Foods,» Ankara Turkey, Springer, 2006, pp. 24-33.

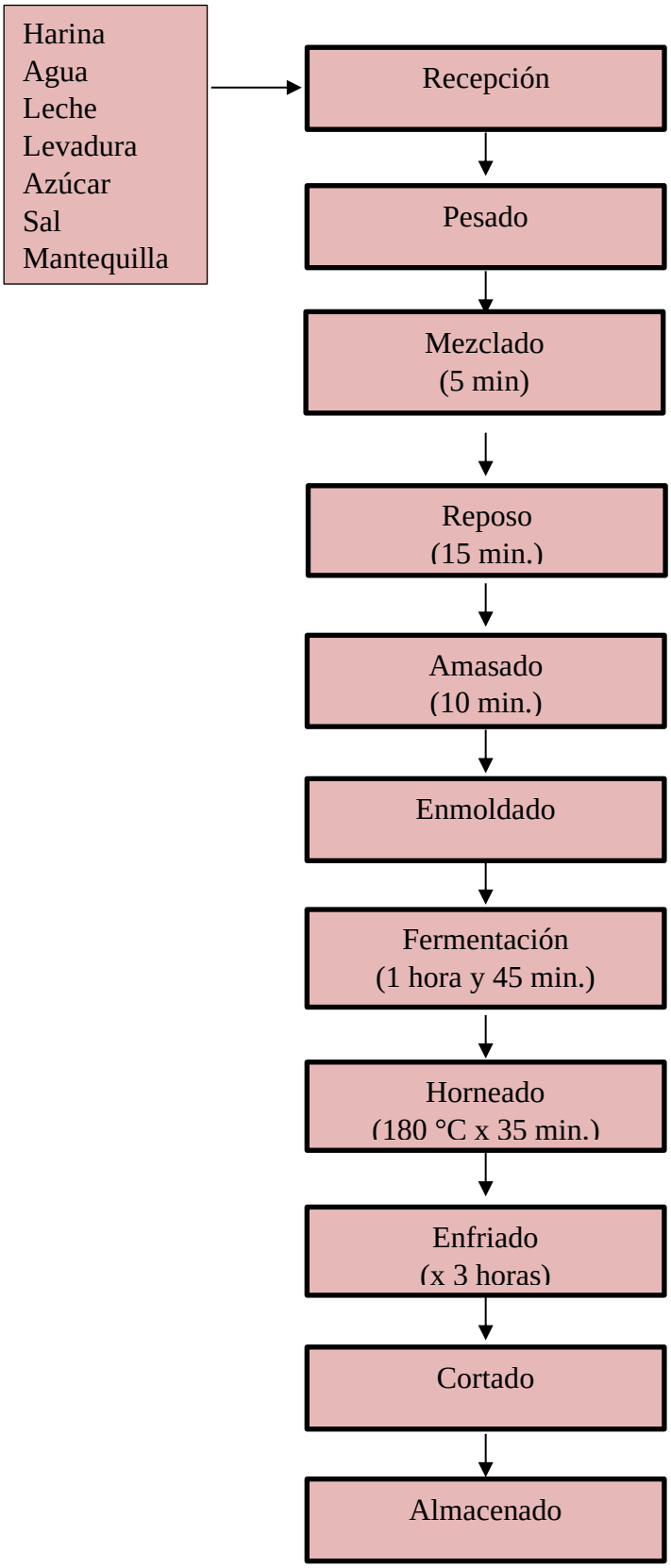
CAPÍTULO VII

ANEXOS

ANEXOS

Anexo A. Elaboración y preparación de las muestras.

1.1. Diagrama de flujo para la elaboración de pan de molde



1.2. Elaboración del pan molde en concentraciones de levadura 0.5 %, 1 %, 1.5 % y 2 %.

Foto 7. Masa en reposo por 10 minutos

Foto 8. Proceso de fermentación.

Foto 9. Masa fermentada

Foto 10. Pan horneado y cortado.

1.3. Muestras de pan de molde elaboradas a diferentes concentraciones de levadura.

Foto 11. Pan 2 % de levadura

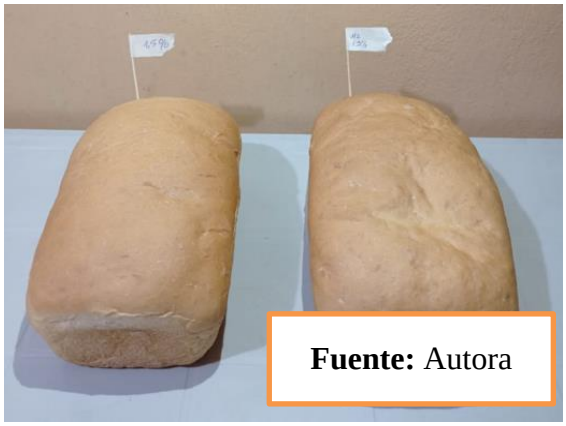


Foto 12. Pan 1,5 % de levadura

Foto 13. Pan 2 % de levadura

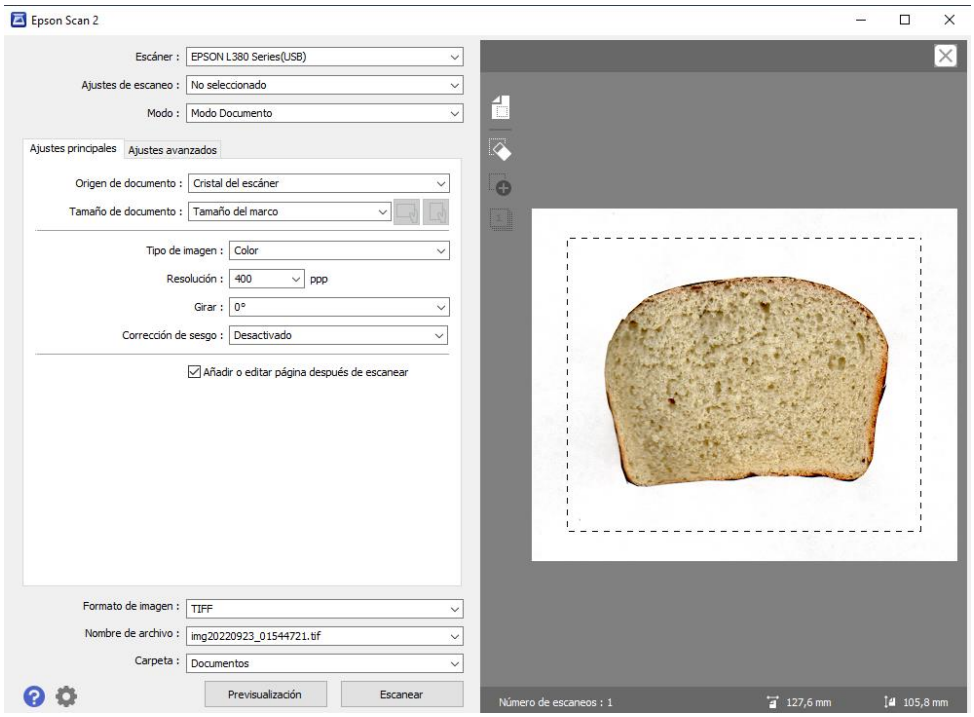
Fuente: Autora

Foto 14. Pan 1,5 % de levadura

Fuente: Autora

1.4. Obtención y análisis de imágenes

Figura 6. Proceso de selección del formato para la adquisición de las imágenes



1.5. Proceso para la obtención de los datos para la cinética de secado.

Foto 15. Masa en los moldes

Foto 16. Masa fermentada

Foto 17. Proceso de Horneado

Foto 18. Proceso para cinética secado

Foto 19. Masas horneadas completamente

Anexo B. Tablas y gráficos

2.1. Datos estadísticos de las frecuencias según el área de los poros en los tratamientos.

Tabla 6. Análisis de varianza (ANOVA) de la frecuencia absoluta según el área de los poros del pan de molde.

Densidad	Suma de cuadrados	Df	Cuadrado medio	Relación F	Valor P
A: Tratamientos	90,0993	3	30,0331	6,87	0,0228
B: Repeticiones	7,03446	2	3,51723	0,8	0,4902
RESIDUOS	26,2243	6	4,37072		
TOTAL	123,358	11			

Tabla 7. *Diferencia Mínima Significativa (LSD) con un nivel de significancia de 95% para los tratamientos (concentración de levadura 0,5 %, 1 %, 1,5 % y 2 %).*

Tratamientos	Contar	Media	Grupos homogéneos
0,5	3	14,7659	a
2	3	19,2341	b
1	3	21,2619	b
1,5	3	21,6746	b

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
0,5-1	*	-6,49603	4,17686
0,5-1,5	*	-6,90873	4,17686
0,5-2	*	-4,46825	4,17686
1-1,5		-0,412698	4,17686
1-2		2,02778	4,17686
1,5-2		2,44048	4,17686

* indica una diferencia significativa.

Tabla 8. *Análisis de varianza (ANOVA) de la frecuencia acumulada según el área de los poros del pan de molde.*

Densidad	Suma de cuadrados	Df	Cuadrado medio	Relación F	Valor P
A: Tratamientos	90,0993	3	30,0331	6,87	0,0228
B: Repeticiones	7,03446	2	3,51723	0,8	0,4902
RESIDUOS	26,2243	6	4,37072		
TOTAL	123,358	11			

Tabla 9. *Diferencia Mínima Significativa (LSD) al 95% para la frecuencia acumulada según el área de los poros*

Tratamientos	**Contar**	**Media**	**Grupos homogéneos**
0,5 %	3	526,524	a
2 %	3	594,813	ab
1 %	3	687,786	b
1,5 %	3	692,929	b

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
0,5-1	*	-161,262	107,698
0,5-1,5	*	-166,405	107,698
0,5-2		-68,2897	107,698
1-1,5		-5,14286	107,698
1-2		92,9722	107,698
1,5-2		98,1151	107,698

* indica una diferencia significativa.

Tabla 10. *Tabla de frecuencias absolutas con respecto al área de los poros.*

	T1			T2			T3			T4		
Área (mm^2)			**σ**			**σ**			**σ**			**σ**
0	**0**	±	**0**	**0**	±	**0**	**0**	±	**0**	**0**	±	**0**
0,383929	140,889	±	8,34221749	158,444444	±	9,90136541	170,222222	±	20,9134017	133,777778	±	9,3472119
0,551786	75,333	±	9,07377173	102	±	8,95048105	100,333333	±	5,81186526	80,7777778	±	8,27535386
0,719643	51,556	±	7,98841754	64,1111111	±	5,17830231	64,1111111	±	12,0292853	58,2222222	±	7,98841754
0,8875	31,222	±	5,38860251	46,8888889	±	5,87209345	50	±	4,09606858	42,5555556	±	6,73575314
1,05536	23,556	±	6,51778194	37,8888889	±	6,71096394	34,7777778	±	6,33625664	32,6666667	±	6,48930744
1,22321	18,000	±	5,04424865	29,2222222	±	7,25973166	25,6666667	±	4,05517502	27	±	2,60341656
1,39107	11,667	±	0,8819171	23,1111111	±	2,16880237	26	±	3,2829526	21,4444444	±	2,03670031
1,55893	10,000	±	3,84418753	18,4444444	±	3,5013225	21,2222222	±	1,26197963	20,5555556	±	3,6565517
1,72679	8,556	±	1,38777733	17,3333333	±	2,18581284	17,2222222	±	1,07151675	16,2222222	±	2,03670031
1,89464	6,111	±	2,77555467	14,4444444	±	3,6717137	12,7777778	±	2,50185117	12,4444444	±	4,23390197
2,0625	5,333	±	1,33333333	10,7777778	±	1,38777733	11,5555556	±	2,16880237	11,6666667	±	2,33333333
2,23036	5,889	±	2,91229832	9,77777778	±	4,47627491	10,4444444	±	2,03670031	9,88888889	±	3,09719108
2,39821	4,111	±	0,96225045	7,77777778	±	1,17062819	6,88888889	±	2,54587539	9,77777778	±	2,41139271
2,56607	2,667	±	1,20185043	8,22222222	±	0,19245009	7,77777778	±	2,03670031	8,22222222	±	2,45703827
2,73393	2,556	±	1,34715063	6,44444444	±	2,00923792	6,88888889	±	0,76980036	8,11111111	±	0,50917508
2,90179	1,778	±	0,38490018	5,77777778	±	0,19245009	5,33333333	±	1,85592145	6,66666667	±	1
3,06964	2,444	±	2,03670031	5,22222222	±	1,01835015	5,22222222	±	0,69388867	4,55555556	±	0,38490018
3,2375	1,333	±	0,33333333	4,22222222	±	1,01835015	4,22222222	±	2,83496685	4,77777778	±	0,69388867
3,40536	2,000	±	1,20185043	4,55555556	±	0,83887049	3	±	0,57735027	4,44444444	±	1,17062819
3,57321	1,111	±	0,19245009	2	±	0,8819171	3,88888889	±	0,50917508	3,33333333	±	0,33333333
3,74107	1,222	±	1,01835015	3,33333333	±	0,8819171	3	±	0,8819171	3,11111111	±	1,34715063
3,90893	1,333	±	0,33333333	3	±	0,33333333	2,55555556	±	1,07151675	3,88888889	±	1,64429429
4,07679	1,222	±	0,83887049	3,11111111	±	1,71053381	2,55555556	±	1,01835015	2,77777778	±	1,07151675
4,24464	0,889	±	1,01835015	2,11111111	±	0,38490018	3,44444444	±	0,83887049	3,22222222	±	0,50917508

4,4125	0,667	±	0,33333333	1,44444444	±	1,17062819	1,77777778	±	0,50917508	2,11111111	±	0,83887049
4,58036	1,111	±	0,76980036	2	±	0,33333333	2,22222222	±	0,69388867	2,33333333	±	1,20185043
4,74821	0,556	±	0,19245009	2	±	0,57735027	2,44444444	±	0,19245009	2,22222222	±	0,19245009
4,91607	0,333	±	0,33333333	1,66666667	±	0,57735027	1,33333333	±	0,66666667	1,77777778	±	0,76980036

n=3 ; $\bar{X}$=media; σ = desviación estándar

T1= 0,5 % de levadura

T2= 1 % de levadura

T3= 1,5 % de levadura

T4= 2 % de levadura

Tabla 11. *Tabla de frecuencias acumuladas con respecto al área de los poros.*

	T1			T2			T3			T4		
Área (mm^2)			**σ**			**σ**			**σ**			**σ**
0	**0**	±	**0**	**0**	±	**0**	**0**	±	**0**	**0**	±	**0**
0,383929	0,250	±	0,02218876	0,20343333	±	0,0074	0,2136	±	0,00590377	0,19487778	±	0,00152072
0,551786	0,131	±	0,00253888	0,132	±	0,00922394	0,12736667	±	0,01055972	0,11768889	±	0,00818198
0,719643	0,089	±	0,00401677	0,08297778	±	0,00167807	0,08111111	±	0,00717033	0,08494444	±	0,00542518
0,8875	0,054	±	0,00413472	0,06047778	±	0,00208069	0,06326667	±	0,00180216	0,06202222	±	0,00579745
1,05536	0,040	±	0,00738349	0,04887778	±	0,00474018	0,04365556	±	0,00547929	0,04811111	±	0,01346309
1,22321	0,031	±	0,00547767	0,0372	±	0,00653631	0,03278889	±	0,00402193	0,0393	±	0,00284742
1,39107	0,020	±	0,001455	0,02992222	±	0,00161738	0,03271111	±	0,00133514	0,03108889	±	0,00214614
1,55893	0,017	±	0,00507875	0,02351111	±	0,00252638	0,02751111	±	0,00150012	0,02984444	±	0,00344889
1,72679	0,015	±	0,0016883	0,0222	±	0,00072188	0,02198889	±	0,00148411	0,02367778	±	0,00365655
1,89464	0,010	±	0,00403833	0,01835556	±	0,00432683	0,01615556	±	0,00333539	0,01797778	±	0,00532336
2,0625	0,009	±	0,0017513	0,01398889	±	0,00084678	0,01451111	±	0,00179949	0,01698889	±	0,00307053
2,23036	0,010	±	0,00407831	0,01215556	±	0,0046767	0,01315556	±	0,00136232	0,01431111	±	0,00394607
2,39821	0,007	±	0,00108372	0,01004444	±	0,00135496	0,00898889	±	0,00330997	0,0144	±	0,00432101
2,56607	0,005	±	0,00190594	0,01042222	±	0,00061674	0,00978889	±	0,00156856	0,01191111	±	0,00287756
2,73393	0,004	±	0,00183343	0,00808889	±	0,00187863	0,00847778	±	0,00082754	0,01201111	±	0,00063799
2,90179	0,003	±	0,00025019	0,00731111	±	0,00035329	0,00718889	±	0,00229064	0,00973333	±	0,0013691
3,06964	0,004	±	0,00322393	0,00687778	±	0,00135742	0,00684444	±	0,00134261	0,00668889	±	0,00045501
3,2375	0,002	±	0,00033555	0,00528889	±	0,00120385	0,00544444	±	0,00357683	0,00693333	±	0,00051747
3,40536	0,003	±	0,00169225	0,00563333	±	0,00066916	0,00371111	±	0,00075154	0,0064	±	0,00130512
3,57321	0,002	±	0,00037859	0,00247778	±	0,00092456	0,00503333	±	0,00029627	0,00474444	±	0,0002117
3,74107	0,002	±	0,00160451	0,00431111	±	0,000803	0,00382222	±	0,00095762	0,00444444	±	0,00166844
3,90893	0,002	±	0,00091003	0,00383333	±	0,00046667	0,00326667	±	0,00145258	0,00553333	±	0,0020232
4,07679	0,002	±	0,00147121	0,00387778	±	0,00176677	0,0034	±	0,0014678	0,00396667	±	0,00142945
4,24464	0,001	±	0,00153128	0,0027	±	0,00017638	0,00407778	±	0,00067358	0,00463333	±	0,00036667

4,4125	0,001	±	0,00045501	0,00174444	±	0,00130057	0,00233333	±	0,00078387	0,00306667	±	0,00120554
4,58036	0,002	±	0,00131318	0,00251111	±	0,00037908	0,00283333	±	0,00083865	0,00327778	±	0,00152473
4,74821	0,001	±	0,00039487	0,00254444	±	0,00068826	0,00311111	±	0,00053472	0,00321111	±	0,00046825
4,91607	0,00056667	±	0,00062272	0,00203333	±	0,00060645	0,00168889	±	0,00097601	0,00262222	±	0,00104633

n=3; $\bar{X}$=media; σ = desviación estándar

T1= 0,5 % de levadura

T2= 1 % de levadura

T3= 1,5 % de levadura

T4= 2 % de levadura

Tabla 12. *Tabla de frecuencias con respecto al área de los poros.*

	T1			T2			T3			T4		
Área (mm^2)			**σ**			**σ**			**σ**			**σ**
0	**0**	±	**0**	**0**	±	**0**	**0**	±	**0**	**0**	±	**0**
0,383929	299,333	±	12,5742241	340,222222	±	21,5518324	289,666667	±	72,8079666	281,444444	±	19,6676083
0,551786	374,667	±	20,4966122	442,222222	±	29,6466849	420,444444	±	17,8584973	362,222222	±	26,8045049
0,719643	426,222	±	28,4845637	506,333333	±	34,1093014	492,888889	±	9,10636733	420,444444	±	34,4033805
0,8875	457,444	±	33,872856	553,222222	±	38,9762511	550,666667	±	26,3333333	463	±	40,0263802
1,05536	481,000	±	39,4630629	591,111111	±	44,0004209	590	±	39,5769293	495,666667	±	33,5476444
1,22321	499,000	±	44,4684657	620,333333	±	49,2115614	620,111111	±	49,0264479	522,666667	±	34,7435046
1,39107	510,667	±	44,8590385	643,444444	±	50,964403	645,444444	±	51,0874341	544,111111	±	36,4010582
1,55893	520,667	±	47,8759972	661,888889	±	54,0599804	669	±	56,3806507	564,666667	±	40,0374824
1,72679	529,222	±	49,1418958	679,222222	±	56,1449843	687,777778	±	59,7934717	580,888889	±	39,9059079
1,89464	535,333	±	51,911249	693,666667	±	57,4755987	702,333333	±	62,9788324	593,333333	±	41,6346544
2,0625	540,667	±	53,1674504	704,444444	±	58,4772827	713,555556	±	64,1156363	605	±	42,6731766
2,23036	546,556	±	56,0647773	714,222222	±	62,9323564	724,333333	±	66,6658333	614,888889	±	44,7093494
2,39821	550,667	±	57,0097458	722	±	63,1039706	733,333333	±	70,0880399	624,666667	±	43,3025532
2,56607	553,333	±	58,2065288	730,222222	±	63,2958954	739,888889	±	69,9812144	632,888889	±	44,9892991
2,73393	555,889	±	59,4066339	736,666667	±	65,184354	747,666667	±	71,97762	641	±	45,3908948
2,90179	557,667	±	59,78387	742,444444	±	65,2944896	753,111111	±	73,4516722	647,666667	±	45,4569393
3,06964	560,111	±	61,5650815	747,666667	±	66,0075753	759,111111	±	74,3716892	652,222222	±	45,6755871
3,2375	561,444	±	61,8828044	751,888889	±	66,2825043	763,444444	±	75,0587424	657	±	46,3609031
3,40536	563,444	±	62,9111661	756,444444	±	67,0798308	766,777778	±	75,9943955	661,444444	±	47,3806493
3,57321	564,556	±	62,9676578	758,444444	±	67,4506678	770,333333	±	75,8602516	664,777778	±	47,6845343
3,74107	565,778	±	63,8682092	761,777778	±	68,0982406	773,555556	±	76,7002342	667,888889	±	48,8823228
3,90893	567,111	±	63,5490478	764,777778	±	68,1373884	776,333333	±	77,3096228	671,777778	±	50,5264874
4,07679	568,333	±	64,2244329	767,888889	±	69,5264405	779,333333	±	77,4087276	674,555556	±	50,8312386
4,24464	569,222	±	65,1240981	770	±	69,9078759	781,888889	±	76,5973116	677,777778	±	51,3228705

4,4125	569,889	±	65,4432182	771,444444	±	70,9525141	784,666667	±	77,979342	679,888889	±	51,3661511
4,58036	571,000	±	65,6692047	773,444444	±	71,2619061	786,666667	±	77,5134397	682,222222	±	52,1923082
4,74821	571,556	±	65,8570281	775,444444	±	71,6203985	789	±	77,2557082	684,444444	±	52,0900218
4,91607	571,889	±	66,102894	777,111111	±	71,9817364	790,666667	±	77,9365839	686,222222	±	52,455625

n=3 ; $\bar{X}$=media; σ = desviación estándar

T1= 0,5 % de levadura

T2= 1 % de levadura

T3= 1,5 % de levadura

T4= 2 % de levadura

2.2. Información de los parámetros para la cinética de secado.

Tabla 13. Valores de la cinética de secado.

	T1			T2			T3			T4		
Tiempo (min)	**Xwt**		**σ**	**Xwt**		**σ**	**Xwt**		**σ**	**Xwt**		**σ**
2	0,112	±	0,0000	0,1120	±	0,0000	0,112	±	0,000	0,113	±	0,0000
4	0,100	±	0,0000	0,0996	±	0,0000	0,093	±	0,009	0,082	±	0,0088
6	0,081	±	0,0088	0,0934	±	0,0088	0,087	±	0,000	0,082	±	0,0088
8	0,087	±	0,0000	0,0809	±	0,0088	0,081	±	0,009	0,082	±	0,0088
10	0,087	±	0,0000	0,0809	±	0,0088	0,075	±	0,000	0,082	±	0,0088
12	0,075	±	0,0000	0,0685	±	0,0088	0,075	±	0,000	0,076	±	0,0176
14	0,075	±	0,0000	0,0622	±	0,0176	0,062	±	0,000	0,063	±	0,0176
16	0,062	±	0,0000	0,0622	±	0,0176	0,062	±	0,000	0,063	±	0,0176
18	0,068	±	0,0088	0,0560	±	0,0088	0,050	±	0,000	0,051	±	0,0176
20	0,056	±	0,0088	0,0498	±	0,0176	0,037	±	0,000	0,051	±	0,0176
22	0,056	±	0,0088	0,0436	±	0,0088	0,031	±	0,009	0,045	±	0,0264
24	0,044	±	0,0088	0,0436	±	0,0088	0,031	±	0,009	0,032	±	0,0088
26	0,044	±	0,0088	0,0311	±	0,0088	0,019	±	0,009	0,026	±	0,0176
28	0,031	±	0,0088	0,0249	±	0,0000	0,012	±	0,000	0,026	±	0,0000

n=3 ; $\overline{X}$=media; σ = desviación estándar
Xwt = Pérdida de humedad en el tiempo
T1= 0,5 % de levadura
T2= 1 % de levadura
T3= 1,5 % de levadura
T4= 2 % de levadura

Tabla 14. *Parámetros del modelamiento matemático para la cinética de secado del pan de molde a diferentes concentraciones de levadura.*

%	k	n	R Ajustado	SSE	RMSE
0,5	1,929 (1,764-2,095)	0,132 (0,09609-0,168)	0,8234	0,001101	0,009579
1	1,864 (1,708-2,02)	0,1579 (0,1219-0,1939)	0.8707	0,001043	0,009322
1,5	1,827 (1,601-2,052)	0,1807 (0,1262-0,2351)	0,7978	0,002181	0,01348
2	1,916 (1,713-2,118)	0,1523 (0,107-0,1975)	0,7976	0,001571	0,01144