



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
LICENCIATURA EN QUÍMICA DE ALIMENTOS

TESIS

**ESTUDIO CINÉTICO DE LOS CAMBIOS EN LOS ATRIBUTOS
FISICOQUÍMICOS DE CALIDAD DE PANES COMERCIALES
(REBANADA Y BISQUET) DURANTE EL ALMACENAMIENTO**

Para obtener el título de
Licenciada en Química de Alimentos

PRESENTA

Angélica Trejo Rodríguez

Directora

Dra. Elizabeth Contreras López

Codirector

Dr. Jesús Guadalupe Pérez Flores

Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, Diciembre, 2025



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
School of Engineering and Basic Sciences

Mineral de la Reforma, Hgo., a 26 de noviembre de 2025

Número de control: ICBI-D/3022/2025

Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado a la egresada de la Licenciatura en Química de Alimentos **Angélica Trejo Rodríguez**, quien presenta el trabajo de titulación **“Estudio cinético de los cambios en los atributos fisicoquímicos de calidad de panes comerciales (rebanada y bisquet) durante el almacenamiento”**, ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: Dr. Juan Ramírez Godínez

Secretario: Dr. Luis Guillermo González Olivares

Vocal: Dra. Elizabeth Contreras López

Suplente: Dr. Jesús Guadalupe Pérez Flores

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.



GVR/YCC

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001
dirección_icbi@uah.edu.mx, vergarar@uah.edu.mx

“Amor, Orden y Progreso”



2025



uah.edu.mx

Dedicatoria

A Dios, por brindarme fortaleza y fe en todos mis actos, por las bendiciones que recibí en este proceso, que para mí fueron muy grandes y especiales.

A mi mamá, quien siempre me celebró con las mismas fuerzas, con el alma llena de orgullo y toda su fe puesta en mí. Gracias mami por ser mi hombro, oídos y voz cada que lo necesite, por ser ese refugio al que puedo volver. Siempre estuviste dispuesta a acompañarme en cada agotadora e interminable noche de estudio a tan larga distancia, noches tras noche en las que tu compañía y la llegada de un buen café, eran para mí un tesoro.

Este logro te lo dedico a ti, porque es por ti que estoy aquí, sin duda tu apoyo incondicional me permitió lograrlo, gracias por nunca soltarme. Tus abrazos han sido refugio y tus palabras, mi mayor aliento. Gracias por enseñarme a ser fuerte. Si me caía una vez, tú me enseñaste a levantarme tres. Mi resiliencia siempre vendrá de ti.

Gracias por orar por mí siempre y enseñarme a ser feliz y agradecida. Gracias porque nunca nada te detuvo para ser la mejor mamá del mundo. Gracias por ser mi amiga, mi confidente, todo lo que siempre he necesitado y más. Te amo más que a nada en este mundo.

A ti hermano, por los gestos pequeños de tiempo y espacio que hicieron grande este camino. Porque has celebrado mis avances y has entendido mis caídas. Agradezco cada conversación, cada broma y todos tus gestos de fe para mí. Eres fuente constante de inspiración y motivación. Ha sido fundamental tu presencia en la culminación de este proyecto.

Si algo tengo claro en esta vida es la suerte de no haber crecido sola, de tener con quien compartir la vida y lograr vencer retos personales juntos. Me has cuidado y protegido, has estado ahí para mí en momentos difíciles.

Quiero agradecer tu apoyo durante mi universidad, por tus palabras de aliento y tu apoyo incondicional. Crecer contigo ha sido una de las mejores experiencias de mi vida. Gracias por ser mi bro, por ser mi amigo y por ser mi compañero de vida. Te amo y te aprecio más de lo que puedes imaginar.

A tía Bety, por su fe en mi y por su generosidad. Aunque ya no estés físicamente conmigo, tu amor, sabiduría y ejemplo continúan guiándome en cada paso que doy. Tus palabras alentadoras y apoyo incondicional mientras estabas con vida fue la fuerza que me impulsó a seguir adelante en los momentos más difíciles y que me llevó hasta este punto. Hoy eres más que un recuerdo, eres fuente de inspiración. Gracias por ser mi guía y mi ángel guardián a lo largo de este camino académico. Hasta el cielo, mil gracias.

También esta tesis debe tener un gran significado para mis tíos. A mi tío Nacho, porque siempre que necesité su ayuda, me la brindó incondicionalmente y son gestos que guardaré por siempre en mi corazón. A mi tía Roci, porque con su chispa, siempre me ha brindado apoyo, solidaridad y muchas risas, dándome la fortaleza y el avance que necesito. A mi tío Ángel, por todo lo que me ha brindado a lo largo de este tiempo, su interés que siempre ha tenido en mis avances y sus detalles que no olvido.

A mis primos, Leo y Nico porque siempre me han motivado a ser una mejor persona, con su alegría y sus comentarios llenos de optimismo siempre me hicieron sentir mejor. Gracias por ser mi equipo, por crear recuerdos juntos y el orgullo que sean parte de mi vida.

A Candy, porque has complementado mi vida de la mejor manera, me has ayudado a superar mis retos, has estado conmigo en momentos difíciles y felices. Llegaste en el momento perfecto y eres un regalo en mi vida. Gracias por ser mi amiga, mi hermana y alguien en quien confiar. Eres una bendición en mi vida. Mi familia es más bonita desde que llegaste.

A mis amigos, por descubrir que la amistad verdadera también sostiene tesis y corazones:

A Rodrigo, mi mejor amigo, no pude tener mejor compañero en esta etapa que tú. Gracias por tu apoyo cuando lo necesite, guardo en mi corazón cada conversación en la cocina.

A Adamary, que me ha acompañado en cada etapa de mi vida, gracias por siempre animarme. Por no

cansarte de preguntar cómo iba, aunque siempre dijera “igual que ayer”, por escucharme llorar y sostener mis miedos. Por celebrar mis logros, como si fueran tuyos.

A personas maravillosas que conocí en AAQ: Ale, Sebas, Daniela, amigos de toda la carrera, un gusto compartir laboratorio con ustedes. En especial a Daniela, porque juntas caímos y nos levantamos en ese laboratorio.

A Carlos y Oliver, por su incondicional apoyo en este proceso, son gestos que no tienen precio. Representan el amigo que todos deberían tener. Gracias por hacer de UCL un lugar más alegre y ameno.

A todos los que de cierta manera intervinieron en este camino con detalles que serán inolvidables, no puedo mencionarlos a todos, pero siempre están presentes.

Dedico este agradecimiento a todas las personas que han cruzado mi camino y han contribuido a mi crecimiento personal y académico.

La vida es un viaje de crecimiento constante. Con todo mi amor, con toda mi gratitud y con el alma llena de orgullo, les dedico esta tesis, este logro y todo lo que vendrá.

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por el valioso respaldo proporcionado durante la ejecución experimental de este proyecto.

A la Dra. Elizabeth Contreras López por la confianza que me tuvo desde un inicio, su apoyo incondicional y por siempre tener una palabra para mí en el momento preciso. Al Dr. Jesús Guadalupe Pérez Flores porque más que ser un docente, se convirtió en un amigo. Siempre otorga consejos invaluables y es generoso con sus conocimientos. Les agradezco a ambos por su destacada dirección académica, fundamental para la concreción de este proyecto.

Al Lic. Carlos Arriaga Téllez por su valiosa labor al establecer el contacto con la Panadería El Serranillo y por gestionar de manera exitosa la colaboración entre la UAEH y la empresa.

Al jurado de tesis por sus invaluables consejos y la enriquecedora retroalimentación brindada a lo largo del desarrollo de este trabajo.

En especial, al Dr. Luis Guillermo González Olivares por su valiosa guía, su pasión por enfrentarme a desafíos, su paciencia. Usted no solo enseña, ilumina y transforma vidas con su sabiduría.

Índice general

Índice general	IV
Índice de figuras	VI
Índice de tablas	VIII
Abstract	IX
Resumen	XI
Introducción	XIII
1. Vida útil de los productos de panificación: Antecedentes generales	1
1.1. Introducción	1
1.2. Estadísticas sobre el consumo del pan	4
1.3. Ingredientes y aditivos alimentarios utilizados en la elaboración de pan	4
1.4. Proceso de producción del pan	4
1.4.1. Pan fermentado	6
1.5. Estabilidad y vida útil	7
1.6. Factores que afectan la calidad y la vida útil de los productos de panificación	7
1.6.1. Parámetros fisicoquímicos	9
Retrogradación del almidón	9
Pérdida de humedad y cambios en la textura	9
1.6.2. Parámetros microbiológicos	9
1.7. Cinética química y vida útil de alimentos	10
1.8. Métodos para extender la vida útil de los productos de panificación	11
1.8.1. Tratamientos físicos	11
1.8.2. Tratamientos químicos	11
1.8.3. Empaquetado activo con absorbedores de oxígeno	11
1.8.4. Empaquetado activo con emisores de sistemas antimicrobianos	11
1.9. Conclusión	12
Referencias	12

2. Estudio de vida útil del bisquet	15
2.1. Introducción	15
2.2. Materiales y métodos	16
2.2.1. Muestras	16
2.2.2. Metodología general	19
2.2.3. Estudio de la vida útil de bisquets	19
2.2.4. Análisis estadístico	20
2.2.5. Análisis cinético de los atributos fisicoquímicos de calidad en bisquets	20
2.3. Resultados y discusión	20
2.3.1. Influencia del tiempo y de la temperatura de almacenamiento	20
2.3.2. Análisis cinético	25
2.4. Conclusiones y perspectivas	29
Referencias	30
3. Estudio de vida útil de la rebanada	32
3.1. Introducción	32
3.2. Materiales y métodos	36
3.3. Muestras	36
3.3.1. Estudio de vida útil, análisis estadístico y cinético	36
3.4. Resultados y discusión	36
3.4.1. Influencia del tiempo y de la temperatura de almacenamiento	36
3.4.2. Análisis cinético	37
3.5. Conclusiones y perspectivas	45
Referencias	45
A. Material suplementario	47
A.1. Conjunto de datos	47
A.2. Análisis estadístico con R	48
A.2.1. Influencia del tiempo y de la temperatura de almacenamiento	48
A.2.2. Influencia del tiempo de almacenamiento	50
A.2.3. Influencia de la temperatura de almacenamiento	52
A.3. Resultados del análisis de varianza de dos vías	55

Índice de figuras

1.1. Rebanada y bisquet.	5
1.2. Variedad de pan en panadería.	8
1.3. Factores que influyen sobre la vida útil de los productos de panificación.	10
2.1. Bisquet tradicional.	17
2.2. Diagrama de flujo para la elaboración de bisquots.	18
2.3. Metodología general para el estudio de vida útil del bisquet.	19
2.4. Valores de cambio en el contenido de humedad (g de H ₂ O 100 g ⁻¹ de muestra) de bisquots obtenidos en diversas condiciones de estudio. Los diagramas de caja y bigotes, diferenciados por letras minúsculas, evidencian discrepancias significativas entre los conjuntos de datos en distintas temperaturas de almacenamiento (p<0.05).	21
2.5. Gráfico de dispersión de la evolución en el tiempo de la humedad del bisquet en las diferentes condiciones de estudio (CE). La letras minúsculas indican diferencias en los tiempos de almacenamiento.	22
2.6. Valores de cambio en el peso (g) de bisquots obtenidos en diversas condiciones de estudio. Los diagramas de caja y bigotes, diferenciados por letras minúsculas, evidencian discrepancias significativas entre los conjuntos de datos en distintas temperaturas de almacenamiento (p<0.05).	23
2.7. Gráfico de dispersión de la evolución en el tiempo de la pérdida de peso del bisquet en las diferentes condiciones de estudio (CE). La letras minúsculas indican diferencias en los tiempos de almacenamiento.	24
2.8. Valores de actividad de agua (AW) obtenidos en diversas condiciones de estudio. Los diagramas de caja y bigotes, marcados con distintas letras minúsculas, señalan diferencias significativas entre los conjuntos de datos a diversas temperaturas de almacenamiento (p<0.05).	25
2.9. Gráfico de dispersión de la evolución en el tiempo de la AW del bisquet en las diferentes condiciones de estudio (CE). La letras minúsculas indican diferencias en los tiempos de almacenamiento.	26
3.1. Rebanada tradicional.	34
3.2. Diagrama de flujo para la elaboración de rebanadas.	35
3.3. Metodología general para el estudio de vida útil de la rebanada.	36
3.4. Gráfico de dispersión de la evolución en el tiempo de la humedad de la rebanada en las diferentes condiciones de estudio (CE). La letras minúsculas indican diferencias en los tiempos de almacenamiento.	39

3.5. Valores de cambio en el contenido de humedad (g de H ₂ O 100 g ⁻¹ de muestra) de rebanadas obtenidos en diversas condiciones de estudio. Los diagramas de caja y bigotes, diferenciados por letras minúsculas, evidencian discrepancias significativas entre los conjuntos de datos en distintas temperaturas de almacenamiento (p<0.05).	40
3.6. Gráfico de dispersión de la evolución en el tiempo de la pérdida de peso de la rebanada en las diferentes condiciones de estudio (CE). La letras minúsculas indican diferencias en los tiempos de almacenamiento.	41
3.7. Valores de cambio en el peso (g) de rebanadas obtenidos en diversas condiciones de estudio. Los diagramas de caja y bigotes, diferenciados por letras minúsculas, evidencian discrepancias significativas entre los conjuntos de datos en distintas temperaturas de almacenamiento (p<0.05).	42
3.8. Gráfico de dispersión de la evolución en el tiempo de la AW de la rebanada en las diferentes condiciones de estudio (CE). La letras minúsculas indican diferencias en los tiempos de almacenamiento.	43
3.9. Valores de actividad de agua (AW) obtenidos en diversas condiciones de estudio. Los diagramas de caja y bigotes, marcados con distintas letras minúsculas, señalan diferencias significativas entre los conjuntos de datos a diversas temperaturas de almacenamiento (p<0.05).	44

Índice de tablas

1.1. Características del pan mexicano por regiones.	3
1.2. Categorías de pan leudado.	6
1.3. Parámetros microbiológicos del pan.	9
2.1. Ajuste de los datos experimentales al modelo de reacción de orden cero para bisquets.	29
2.2. Ajuste de los datos experimentales al modelo de reacción de primer orden para bisquets. . . .	29
2.3. Ajuste de los datos experimentales al modelo de reacción de segundo orden para bisquets. . .	29
3.1. Ajuste de los datos experimentales al modelo de reacción de orden cero para rebanadas.	37
3.2. Ajuste de los datos experimentales al modelo de reacción de primer orden para rebanadas. . .	38
3.3. Ajuste de los datos experimentales al modelo de reacción de segundo orden para rebanadas.	38
A.1. Configuración del conjunto de datos utilizado para el análisis.	47
A.2. ANOVA completo de la humedad del bisquet.	55
A.3. ANOVA completo del peso del bisquet.	55
A.4. ANOVA completo de la AW del bisquet.	55
A.5. ANOVA completo de la humedad de las rebanadas.	55
A.6. ANOVA completo del peso de las rebanadas.	56
A.7. ANOVA completo de la AW de las rebanadas.	56

Abstract

THE FOOD INDUSTRY faces a constant challenge in preserving the quality and durability of its products, highlighting the specific issues surrounding commercial bread, whether sliced or in biscuit form, whose physicochemical properties undergo alterations during storage. Among the crucial variables directly impacting the quality of these products are water activity, weight, and moisture content, whose detailed understanding is a determining factor in ensuring optimal preservation conditions. However, despite the vital importance of these attributes, there is a significant gap in knowledge regarding their evolution over time and at various storage temperatures. The lack of detailed information about the kinetic changes in these variables limits the food industry's ability to optimize storage conditions and consequently guarantee the quality and shelf-life of commercial bread.

Therefore, the objective of this thesis was to conduct a kinetic analysis of changes in the physicochemical quality attributes of commercial bread (biscuits and slices) during storage, by monitoring water activity, weight, and moisture content. This aimed to understand how these variables evolve with time and storage temperature, providing a solid scientific foundation for optimizing the preservation conditions of these products, thus ensuring their quality and shelf-life for the benefit of the food industry and consumers.

To achieve the overall objective, the following specific objectives were developed:

1. Provide a comprehensive overview of the physicochemical, microbiological, and sensory parameters with the greatest influence on bread's shelf-life through a literature review of recent publications (scientific articles and book chapters), establishing the research background.
2. Establish storage conditions and analysis techniques to monitor the evolution of physicochemical quality parameters (weight loss, moisture gain, and water activity) of the analyzed bread (biscuits and slices), determining the one with the greatest impact on product shelf-life.
3. Evaluate the influence of time and storage temperature through statistical analysis of the data obtained during the study.

Based on these specific objectives, the following chapters were developed:

1. **Chapter 1. Shelf-life of bakery products: General background:** This chapter addressed the issue of how internal and external factors affect the quality and shelf-life of bakery products, emphasizing the importance of maintaining high quality standards and diversity in Mexican bakeries, where this industry plays a significant role in the country's diet and culture. The general objective of the chapter was to examine the impact of these factors on the quality and shelf-life of bakery products through a literature review covering the historical evolution of baking to the physicochemical and microbiological changes products undergo during storage. Among the main findings, the importance of transformation kinetics and drying in the final product quality was highlighted, as well as the impact of microbiological parameters on bread shelf-life, emphasizing the need for good hygiene practices to prevent contamination. The discussion focused on how a better understanding of these processes and their proper control can significantly contribute to extending the shelf-life of bakery products, benefiting both producers and consumers. In conclusion, the chapter underscored the significance of optimizing storage conditions and implementing good manufacturing practices to enhance the stability and shelf-life of bakery products, meeting consumers' demands for quality and food safety.

2. **Chapter 2. Shelf-life study of biscuits:** This chapter focused on determining the shelf-life of biscuits, a traditional Mexican bread whose preservation is crucial for optimal consumption. The main objective was to evaluate how biscuit quality is affected by different storage conditions, specifically in terms of moisture content, water activity (WA), and weight changes. A methodological approach based on kinetic analysis and zero-order, first-order, and second-order reaction models was used to simulate changes in these critical quality attributes under different temperatures (20°C and 30°C). The results revealed that both temperature and storage time had a significant impact on WA, moisture content, and biscuit weight. WA showed the best linear fit with the studied kinetic models, especially at 20°C, suggesting it was the critical quality attribute for estimating the shelf-life of biscuits. In conclusion, the importance of considering temperature and storage time as key factors in preserving biscuit quality was confirmed. WA was highlighted as a critical quality attribute for estimating the shelf-life of biscuit samples and making decisions in the production and storage of this product.
3. **Chapter 3. Shelf-life study of bread slices:** This chapter focused on determining the shelf-life of slices, a traditional Mexican bread whose preservation is crucial for optimal consumption. The main objective was to evaluate how slice quality was affected by different storage conditions, specifically in terms of moisture content, WA, and weight changes. A methodological approach based on kinetic analysis and zero-order, first-order, and second-order reaction models was used to simulate changes in these critical quality attributes under different temperatures (20°C and 30°C). The results revealed that both temperature and storage time had a significant impact on WA, moisture content, and slice weight. WA showed the best linear fit with the studied kinetic models, especially at 20°C, suggesting it was the critical quality attribute for estimating the shelf-life of slices. In conclusion, the importance of considering temperature and storage time as key factors in preserving slice quality was confirmed. WA was highlighted as a critical quality attribute for estimating the shelf-life of slice samples and making decisions in the production and storage of this product.

Based on all the above, the conclusion of this thesis was that by conducting a detailed kinetic analysis of changes in the physicochemical quality attributes of commercial bread (biscuits and slices) during storage, a solid foundation was provided for optimizing the preservation conditions of these products. The results obtained allowed for a comprehensive understanding of the evolution of WA, weight, and moisture content over time and at various storage temperatures, identifying the significant influence of these factors on the quality and shelf-life of commercial bread. This detailed information will provide bread producers and distributors with the necessary tools to adapt and continually improve their practices, strengthening their position in the market and their ability to meet changing consumer demands.

Resumen

LA INDUSTRIA ALIMENTARIA enfrenta un constante desafío en la preservación de la calidad y durabilidad de sus productos, destacando la problemática específica que rodea a los panes comerciales, ya sean de tipo rebanada o bisquet, cuyas propiedades fisicoquímicas experimentan alteraciones durante el almacenamiento. Entre las variables cruciales que impactan directamente en la calidad de estos productos se encuentran la actividad acuosa, la pérdida de peso y el contenido de humedad, la comprensión detallada de estos factores determinan el asegurar las condiciones óptimas de conservación. Sin embargo, a pesar de la vital importancia de estos atributos, se evidencia una brecha significativa en el conocimiento sobre su evolución a lo largo del tiempo y en diversas temperaturas de almacenamiento. La carencia de información detallada acerca de los cambios cinéticos en estas variables limita la capacidad de la industria alimentaria para optimizar las condiciones de conservación y, consecuentemente, garantizar la calidad y vida útil de los panes comerciales.

Por lo tanto, el objetivo de esta tesis fue realizar un análisis cinético de los cambios en los atributos fisicoquímicos de calidad de panes comerciales (bisquet y rebanada) durante su almacenamiento, a través del monitoreo de la actividad acuosa, el peso y el contenido de humedad. Esto, con la finalidad de comprender cómo estas variables evolucionan con el tiempo y la temperatura de almacenamiento, con el propósito de proporcionar una base científica sólida para la optimización de las condiciones de conservación de estos productos, garantizando así su calidad y vida útil en beneficio de la industria alimentaria y los consumidores.

Para realizar el objetivo general, fueron desarrollados los siguientes objetivos específicos:

1. Brindar un panorama general de los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y sensoriales con la mayor influencia sobre la vida útil del pan, mediante la revisión literaria de publicaciones recientes (artículos científicos y capítulos de libros), con la finalidad de establecer los antecedentes de la investigación.
2. Establecer las condiciones de almacenamiento y las técnicas de análisis para monitorear la evolución de los parámetros fisicoquímicos de calidad (perdida de peso, ganancia de humedad y actividad acuosa) de los panes analizados (bisquet y rebanada), con la finalidad de determinar el de mayor impacto sobre la vida útil del producto.
3. Evaluar la influencia del tiempo y la temperatura de almacenamiento mediante el análisis estadístico de los datos obtenidos durante el estudio.

A partir de estos objetivos específicos, fueron desarrollados los siguientes capítulos:

1. **Capítulo 1. Vida útil de los productos de panificación: Antecedentes generales:** Se planteó el problema de cómo factores internos y externos afectan la calidad y VU de los productos de panificación, destacando la importancia de mantener altos estándares de calidad y diversidad en la panadería en México donde esta industria toma gran importancia tanto en la dieta como en la cultura del país. El objetivo general del capítulo fue examinar la repercusión de estos factores en la calidad y VU de los productos de panificación, a través de una revisión literaria que abarca desde la evolución histórica de la panificación hasta los cambios fisicoquímicos y microbiológicos que experimentan los productos durante su almacenamiento. Entre los principales hallazgos, se destacó la importancia de la cinética

de transformación y secado en la calidad final del producto, así como el impacto de los parámetros microbiológicos en la VU del pan, resaltando la necesidad de buenas prácticas de higiene para evitar la contaminación. La discusión se centró en cómo una mejor comprensión de estos procesos y un adecuado control de los mismos pueden contribuir significativamente a extender la VU de los productos de panadería, beneficiando tanto a productores como a consumidores. En conclusión, el capítulo proporciona la trascendencia de optimizar las condiciones de conservación y de implementar buenas prácticas de manufactura para potenciar la estabilidad y la VU de los productos de panadería, con el fin de satisfacer las demandas de calidad y seguridad alimentaria de los consumidores.

2. **Capítulo 2. Estudio de vida útil del bisquet:** El enfoque de este capítulo se centró en el problema de determinar la vida útil del bisquet, un pan tradicional mexicano cuya preservación es fundamental para su consumo óptimo. El objetivo principal fue evaluar cómo la calidad del bisquet se ve afectada por diferentes condiciones de almacenamiento, en términos de contenido de humedad, actividad del agua (AW) y cambios en el peso. Se utilizó un enfoque metodológico basado en el análisis cinético y modelos de reacción de orden cero, uno y dos para simular los cambios en estos atributos críticos de calidad bajo distintas temperaturas (20°C y 30°C). Los resultados revelaron que tanto la temperatura como el tiempo de almacenamiento tuvieron un impacto significativo en la AW, el contenido de humedad y el peso del bisquet. La AW mostró el mayor ajuste lineal con los modelos cinéticos estudiados, especialmente a 20°C, sugiriendo que era el atributo crítico de calidad para estimar la vida útil de los bisquots. En conclusión, se confirmó la importancia de considerar la temperatura y el tiempo de almacenamiento como factores clave en la preservación de la calidad del bisquet. Se destacó la AW como un atributo de calidad crítico para estimar la vida útil de las muestras de bisquet y la toma de decisiones en la producción y almacenamiento de este producto.
3. **Capítulo 3. Estudio de vida útil de rebanada:** El enfoque de este capítulo se centró en el problema de determinar la vida útil del rebanada, un pan tradicional mexicano cuya preservación es fundamental para su consumo óptimo. El objetivo principal era evaluar cómo la calidad de la rebanada era afectada por diferentes condiciones de almacenamiento, específicamente en términos de contenido de humedad, AW y cambios en el peso. Se utilizó un enfoque metodológico basado en el análisis cinético y modelos de reacción de orden cero, uno y dos para simular los cambios en estos atributos críticos de calidad bajo distintas temperaturas (20°C y 30°C). Los resultados revelaron que tanto la temperatura como el tiempo de almacenamiento tuvieron un impacto significativo en la AW, el contenido de humedad y el peso de la rebanada. La AW mostró el mayor ajuste lineal con los modelos cinéticos estudiados, especialmente a 20°C, sugiriendo que era el atributo crítico de calidad para estimar la vida útil de los bisquots. En conclusión, se confirmó la importancia de considerar la temperatura y el tiempo de almacenamiento como factores clave en la preservación de la calidad de la rebanada. Se destacó la AW como un atributo de calidad crítico para estimar la vida útil de las muestras de rebanada y la toma de decisiones en la producción y almacenamiento de este producto.

Con base en todo lo anterior, la conclusión de esta tesis fue que a través de la realización de un análisis cinético detallado de los cambios en los atributos fisicoquímicos de calidad de panes comerciales (bisquet y rebanada) durante su almacenamiento, se logró proporcionar una base sólida para la optimización de las condiciones de conservación de estos productos. Los resultados obtenidos permitieron comprender de manera integral la evolución de la AW, del peso y del contenido de humedad a lo largo del tiempo y en diversas temperaturas de almacenamiento, identificando la influencia significativa de estos factores en la calidad y VU de los panes comerciales. Esta información detallada brindará a los productores y distribuidores de pan, las herramientas necesarias para adaptarse y mejorar continuamente sus prácticas, fortaleciendo así su posición en el mercado y su capacidad para satisfacer las demandas cambiantes de los consumidores.

Introducción

LA INDUSTRIA DE LA PANIFICACIÓN enfrenta constantes desafíos relacionados con la calidad y vida útil de sus productos, sobre todo durante el almacenamiento de los mismos, puesto que están sujetos a deterioro microbiológico, biológico y fisicoquímico, siendo este último el más común al manifestarse como envejecimiento del pan o *staling* por su término en inglés. En este contexto, el estudio cinético de los cambios en los atributos fisicoquímicos de calidad de panes comerciales durante el almacenamiento se convierte en un aspecto crucial. La comprensión detallada de las transformaciones que experimentan estos productos a lo largo del tiempo de almacenamiento permitirá identificar los factores externos e internos que afectan su calidad y brindar soluciones para mejorar la estabilidad y frescura de los mismos. Este planteamiento busca abordar las incertidumbres actuales en relación con la cinética de los cambios fisicoquímicos en panes comerciales, proporcionando así información valiosa que contribuirá al desarrollo de estrategias eficientes para la optimización de la calidad y la extensión de la vida útil de estos productos esenciales en la dieta cotidiana.

La mayoría de los productos de panadería se comercializan frescos y se almacenan a temperatura ambiente. Esto hace que la vida útil de este tipo de productos sea de tan solo unos cuantos días en comparación a la cantidad de tiempo que podrían estar almacenados en condiciones ideales. Cada tipo de pan tiene características particulares que pueden retrasar o acelerar el deterioro. Por lo tanto, el estudio de los factores específicos que afectan a este tipo de productos permitirá comprender los fenómenos que afectan su estabilidad, la cinética de alimentos y su estudio es ideal en este tipo de estudios.

La cinética modelada de los alimentos ha tomado relevancia dentro del campo de la ciencia de los alimentos debido a que permite predecir cambios en los alimentos durante su procesamiento o almacenamiento, los valores cinéticos son preferidos no solo por los valores que describen sino que su confiabilidad estadística. El modelado cinético puede ser aplicado en función del tiempo y temperatura para fenómenos como crecimiento microbiológico, evolución del pH, actividad de agua, pérdida de peso, contenido de humedad, entre otros. Al analizar la velocidad y los mecanismos de las reacciones químicas presentes en los alimentos utilizando datos experimentales en conjunto con los modelos de predicción, se puede identificar con mayor precisión la evolución de sus propiedades fisicoquímicas y organolépticas durante el almacenamiento. Esta información es esencial para determinar la estabilidad y calidad de los alimentos, permitiendo a la industria alimentaria diseñar estrategias eficientes de conservación y envasado. Además, la aplicación de la cinética química en estudios de vida útil facilita la predicción de cambios indeseados, la optimización de formulaciones y el desarrollo de prácticas de almacenamiento que preserven la frescura y seguridad alimentaria garantizando su aceptabilidad y cumplimiento con las expectativas de los consumidores.

La realización del estudio cinético sobre los cambios en los atributos fisicoquímicos de calidad en productos de consumo diario como lo son los panes comerciales durante su almacenamiento se considera suma importancia en el contexto de la industria alimentaria. A través del monitoreo de los atributos de calidad como la actividad de agua, pérdida de peso y el contenido de humedad, el presente estudio pretende contribuir a la garantía de la calidad de los productos y a la satisfacción de los consumidores, además de que desempeña un papel fundamental en la promoción de la seguridad alimentaria, la reducción del desperdicio de alimentos y la sostenibilidad de la industria de la panificación. Los resultados de esta investigación proporcionarán una base científica con respaldo estadístico para la optimización de las condiciones de conservación de los productos, contribuyendo a la gestión más eficiente de recursos, la reducción de costos y la minimización de riesgos en

la cadena de suministro de alimentos, en beneficio tanto de la industria como de los consumidores. Además, es relevante destacar que este proyecto se lleva a cabo en respuesta a la solicitud de una microempresa productora de pan con sede en Pachuca, Hidalgo, con la que se ha mantenido una colaboración continua a lo largo de varios años.

Considerando la información previa, el objetivo de esta tesis fue realizar un análisis cinético de los cambios en los atributos fisicoquímicos de calidad de panes comerciales, con un enfoque a rebanadas y bisquets, durante su almacenamiento. A través del monitoreo de la actividad de agua, la pérdida de peso y el contenido de humedad. Esto, con la finalidad de comprender cómo estas variables evolucionan con el tiempo y la temperatura de almacenamiento, con el propósito de proporcionar una base científica para la optimización de las condiciones de conservación de estos productos, garantizando así su calidad y vida útil.

La investigación desarrollada en este proyecto contribuye al campo de la ciencia de alimentos, específicamente en el estudio de la vida útil y calidad de productos de panadería. El interés y la importancia de este estudio radican en su capacidad para proporcionar una base científica que permitirá a la industria alimentaria optimizar las condiciones de conservación de los productos de panadería, asegurando su calidad y vida útil, al tiempo que promueve la seguridad alimentaria y la sostenibilidad. Además, la colaboración con una microempresa panadera de Pachuca, Hidalgo, establece un vínculo valioso entre la investigación académica y la industria, lo que amplía el impacto y la aplicabilidad de los resultados en un contexto real.

CAPÍTULO 1

Vida útil de los productos de panificación: Antecedentes generales

Resumen

EL PRESENTE CAPÍTULO planteó el problema de cómo factores internos y externos afectan la calidad y vida útil (VU) de los productos de panificación, considera la importancia de mantener altos estándares de calidad y diversidad en la panadería. En México donde la variedad de panes juega un papel notable en la dieta como en la cultura del país. El objetivo general del capítulo fue examinar la repercusión de estos factores en la calidad y VU de los productos de panificación, a través de una revisión literaria que abarca desde la evolución histórica de la panificación hasta los cambios fisicoquímicos y microbiológicos que experimentan los productos durante su almacenamiento. Entre los principales hallazgos, se destacó la importancia de la cinética de transformación y secado en la calidad final del producto, así como el impacto de los parámetros microbiológicos en la VU del pan, resaltando la necesidad de buenas prácticas de higiene para evitar la contaminación. La discusión se centró en cómo una mejor comprensión de estos procesos y un adecuado control de los mismos pueden contribuir significativamente a extender la VU de los productos de panadería, beneficiando tanto a productores como a consumidores. En conclusión, el capítulo marca la trascendencia de optimizar las condiciones de conservación y de implementar buenas prácticas de manufactura para potenciar la estabilidad y la VU de los productos de panadería, con el fin de satisfacer las demandas de calidad y seguridad alimentaria de los consumidores.

Lista de acrónimos

BPH buenas prácticas de higiene	9
VU vida útil	2
SA seguridad alimentaria	2

1.1. Introducción

El pan se podría definir como un alimento que se prepara humedeciendo, amasando y horneando harina, usualmente con la adición de levadura u otros leudantes, a pesar de esta definición general, la definición de pan puede cambiar dependiendo de cada cultura y región, puesto que no todos los panes o sus subproductos se prepararán de manera similar o incluso con el mismo tipo de harina (Rubel, 2011).

Otras definiciones describen que es el producto obtenido a través de una masa fermentada elaborada con diferentes procesos destacando el amasado y el fermentado, elaborando un producto perecedero de alto consumo que constituye una base de alimentación de gran importancia a nivel mundial (Payehuana- Mamani & Matos-Chamorro, 2011). En México la NOM-247-SSA1-2008 define al pan blanco como una mezcla de harina fermentada, agua y sal, que puede contener o no aceites y grasas, leche y aditivos (Diario Oficial de la Federación, 2008).

Aunque no se tiene certeza del origen del pan, sus vestigios más antiguos se remontan al área donde se asentó la cultura mesopotámica, cercana a los ríos Tigris y Eúfrates. Debido al tipo de granos que crecen en esta región se cree que los primeros panes están hechos a base de harina de trigo y cebada. Las prácticas de elaboración de pan se fueron extendiendo a varias regiones y culturas, estas se adaptaban a los ingredientes disponibles. A lo largo de la historia la preparación de pan se ha adaptado no solo a los ingredientes sino que a las necesidades de la sociedad, con base en esto se podría clasificar en: panes sin levadura (conocidos como panes cenceños con la particularidad de formarse sólo a partir de la combinación de harina y agua), panes de masa ácida (cuya corteza es de un marrón muy marcado y su sabor es distinto al del pan tradicional por acción de los cultivos bacterianos de la masa) y panes sin gluten (Mesas & Alegre, 2002). En el caso de México, en la época pre colonial se tiene el registro de elaboración de tortillas, las cuales a pesar de no ser consideradas pan tienen un proceso similar, con la llegada de los españoles al territorio se introdujeron otros cereales como el trigo además de las prácticas de panificación, mismas que se ampliaron después de la invasión francesa a México. En un principio el shock cultural dificultó la aceptación debido a que existían diferencias en el sabor, textura y forma entre las tortillas y el pan. Pero eventualmente los nativos mexicanos fueron inventando variedades que se adaptaron a su gusto y tradiciones. El mestizaje de culturas y tradiciones en el territorio permitieron que existiera la gran variedad de pan en México que conocemos hoy en día (Edwards, 2007; Osorio-Díaz et al., 2014; Rubel, 2011; Weis, 2012).

Tal como sucedió cuando el pan fue primeramente introducido a la cultura mexicana, cualquier producto que esté pronto a lanzarse al público debe contar con un grado de aceptación. Cuando se lanza un nuevo producto al mercado, se suelen enfrentar muchos desafíos como una calidad competente, una vida útil (VU) larga, bajos costos de producción y bajos costos de distribución. En conjunto con esto siempre se debe tener en cuenta la aceptación sensorial del producto, debido a que en un principio si no es un alimento que agrade no tendría sentido lanzarlo al mercado. Los aspectos anteriormente mencionados son parámetros para determinar la calidad general de un alimento. La calidad de un producto usualmente suele ser asociada a aspectos como el lugar de origen de un alimento, el precio de los ingredientes o incluso su aspecto visual; sin embargo, la calidad de un alimento también tiene que ver con su inocuidad, aporte nutricional y accesibilidad (Harvey et al., 2018; Sidel & Stone, 1993).

En relación a esto, procurar la calidad de los productos de panadería es esencial para garantizar la satisfacción del cliente, la seguridad alimentaria (SA) y el éxito general de una empresa de panadería. Los aspectos de calidad en los que el consumidor usualmente se enfoca son el sabor, la textura, la apariencia y el valor nutricional (Torres Oquendo, 2017). Las preferencias y decisiones de compra de los consumidores se ven significativamente influenciadas por la certificación de calidad en los productos de panadería (Araya-Pizarro & Araya Pizarro, 2020). Las investigaciones han demostrado que los consumidores consideran la calidad como un factor primordial a la hora de tomar decisiones de compra, especialmente en la industria alimentaria (Köbrich et al., 2014). Las metodologías de calidad, como el Quality Function Deployment (QFD), son fundamentales para traducir las necesidades y preferencias de los clientes en requisitos internos de calidad de los productos de panadería, asegurando que los productos cumplan con los estándares deseados y se alineen con las expectativas del consumidor (Trujillo et al., 2019).

Los productos de panadería de alta calidad generan una mayor satisfacción del cliente, lealtad y un boca a boca positivo, que son esenciales para el éxito de cualquier negocio de panadería (Ochando Ramírez et al., 2015). Por lo tanto, mantener altos estándares de calidad en los productos de panadería es crucial para construir una base de clientes sólida y una imagen de marca positiva.

Además de la calidad otra característica que atrae la atención de las personas es la diversidad. En México se estima que existen al menos 1600 tipos de pan, se suelen clasificar en dos tipos: dulce y salado. Las variedades de pan dulce se aproximan a 1200 y las variedades saladas a 400. Panes como el bolillo, la telera o el birote son los panes salados más icónicos del territorio, dichos panes suelen utilizarse como complemento de alimentos o ingredientes para preparaciones como las tortas. En la variedad dulce existen las conchas, las

orejas, moños, entre otros que a pesar de parecer simples por no tener colores o adornos llamativos siguen entrando en esta clasificación, tal es el caso de las rebanadas o bisquets (figura 1.1). Así mismo, existen panes que no solo forman parte de la canasta básica, sino que de las tradiciones, tal como lo es el pan de muerto, la rosca de reyes o el pan de feria, todas variedades dulces pero con significado cultural (Osorio-Díaz et al., 2014).

La Tabla 1.1 ejemplifica parte de la amplia variedad de pan que existe en el territorio mexicano, pues cada estado suele contar con sus propias variedades que dentro del mismo territorio pueden cambiar de características dependiendo del municipio o localidad en que se preparen. En el caso del estado de Hidalgo se menciona el cocol como pan representativo.

Retomando lo anterior, el objetivo de este capítulo fue examinar la repercusión de factores internos y externos, en la calidad y VU de los productos de panificación. Este análisis se llevó a cabo mediante la revisión literaria que abarcó la evolución histórica de la panificación, la importancia de la calidad en dichos productos, y los cambios fisicoquímicos que experimentan durante su almacenamiento. La finalidad fue proporcionar una comprensión integral sobre la trascendencia de optimizar las condiciones de conservación para potenciar la estabilidad y la VU de los productos de panadería. Este enfoque se diseñó con la intención de beneficiar a un público diverso, que incluye académicos, estudiantes, tecnólogos, comerciantes, emprendedores y otras personas interesadas en este campo del conocimiento.

Tabla 1.1: Características del pan mexicano por regiones.

Pan / Dulce Tradicional	Región(es)	Ingredientes principales	Descripción / Características
Chilindrina	Todo el país	Canela	Cobertura con pequeñas bolitas de azúcar morena y canela
Conchas	Todo el país	Mantequilla, vainilla, chocolate	Cobertura de costra de mantequilla con azúcar que imita una concha
Empanochada	Chiapas, Guerrero	Melaza	Piezas de melaza en el centro
Coyotas	Sonora	Azúcar morena	Pan plano circular con dos capas, relleno de azúcar morena
Cemitas	Puebla	Sésamo	Crujiente, largo y decorado con sésamo
Almohadas / Pan de nata	Zacatlán, Puebla, Guanajuato, Tlaxcala	Queso, nata	Pan rectangular relleno de queso y azúcar
Tepopoztes	Colima	Harina de maíz, mantequilla, azúcar morena, anís, canela	Panquecillos
Pan de pulque	San Luis Potosí	Pulque	Se usa pulque y levaduras para su preparación
Cocol	Hidalgo	Sésamo	Forma de rombo
Pay de frijol dulce	Baja California	Frijoles, clavo, azúcar morena, canela	Pay relleno de frijol, clavo y canela
Chorreadas	Saltillo, Coahuila	Azúcar morena, canela, nuez	Pan relleno de azúcar morena, canela y nuez
Tureletes	Chiapas	Harina de arroz tostada, canela, queso	En forma de diamante, ligeramente dorado
Pay de calabaza, marquesote, pan de milpa	Durango, Oaxaca, Yucatán	Calabaza, almidón de maíz, frijol, semillas de calabaza	Relleno de calabaza
Coricos, campechanas	Sinaloa, Ciudad de México	Harina de maíz, hojaldre	Con forma de dona

Pan / Dulce Tradicional	Región(es)	Ingredientes principales	Descripción / Características
Paneleta, apasteladas	Tabasco, Veracruz	Leche, ralladura de limón, jugo de limón	Pan rectangular con corteza compacta
Polvorón de nuez	Zacatecas	Nuez	Pan circular con azúcar glaseada espolvoreada
Talxcales	Tlaxcala	Granos de maíz, ralladura de limón o naranja	Forma circular

1.2. Estadísticas sobre el consumo del pan

En México, en el año 2017 se reportó que de acuerdo con la Cámara Nacional de la Industria Panificadora (CANAINPA), el consumo per cápita anual de pan fue de 33.5 kgs, de los cuales entre el 70 % y 75 % correspondió a pan blanco, y el restante 30 % o 25 %, respectivamente, a pan dulce, galletas y pasteles. Mientras que en el año 2022 se reportaba un aproximado de 627 mil 645 toneladas de productos de panificación vendidos en la primera mitad de ese año, comparado las 580, 067 toneladas reportadas en 2017 (Secretaría de Economía, 2017).

Conforme a datos obtenidos en el diario El Economista, las personas en México consumen un aproximado de 33 kilos de pan al año, muy por debajo de la recomendación de la Organización Mundial de la Salud (OMS) que sugieren 90 kilos anuales. De los 33 kilogramos que consumen los mexicanos, el 70-75 % corresponde a pan blanco. El resto lo componen pan dulce, galletas y pastel. En México los principales estados de mayor consumo de pan son: Ciudad de México, Estado de México, Michoacán, Puebla, Oaxaca, Sonora y Veracruz. En el país existen más de 30,000 unidades de producción de pan a nivel nacional. Por cada 10 unidades, 9 de ellas elaboran pan y pasteles. Clasificándose en microempresas familiares que representan el 96.7 % del total de los establecimientos. Las pequeñas empresas representan el 3 % y las grandes empresas representan el 0.3 % del total (Juárez, 2020).

En cuanto el panorama mundial, tan solo en 2010 se reportaba que el mercado del pan se aproximaba a 32 millones de toneladas en conjunto de 27 países de la unión Europea (Rosell et al., 2015).

1.3. Ingredientes y aditivos alimentarios utilizados en la elaboración de pan

Los ingredientes principales del pan son el harina y el agua, las proporciones de estos dos usualmente van a determinar las cantidades en las que otros ingredientes son agregados. La harina más común para la preparación de pan es la de trigo, aunque también hay variedades como cebada, centeno y maíz; además de su origen, la diferencia de la efectividad de estas harinas depende de la proporción de proteínas que contengan, tan solo en referencia a las harinas de trigo existen diversas clasificaciones dependiendo de su calidad y finalidad, el tipo común de harina de trigo contiene un porcentaje de proteínas del 14 % con un porcentaje de absorción de agua del 62-64 %. Las levaduras o agentes leudantes que imparten cuerpo a los panes son ingredientes usados en muchas preparaciones. Otros ingredientes comunes son las grasas como aceites vegetales, mantequilla o margarinas, esto junto a la sal, azúcar o leche suelen ser utilizados para aportar textura y sabor (Edwards, 2007).

1.4. Proceso de producción del pan

Igual que la gran variedad de pan que existe, sus procesos ofrecen una diversidad de técnicas que afectarán en la textura y sabor de los panes. Aquellos panes que no llevan levadura siguen el método más sencillo (Chávez Salgado, 2018):

- **Mezclado:** La harina se transforma en masa agregando agua y en ocasiones un poco de sal.



Figura 1.1: Rebanada y bisquet.

- **Evolución de la masa:** La masa usualmente se deja reposar por 30 minutos antes del modelado de la misma. Retomando un punto de vista químico, las enzimas amilasas serán las encargadas de procesar los almidones y ablandar la masa.
- **Moldeado:** La masa se extenderá y será cortada de manera rectangulares o circulares.
- **Horneado:** Las piezas de masa se exponen a una fuente de calor en un horno hasta que dejen de estar crudas. Otras variedades de métodos que usualmente incluyen los pasos previamente mencionados son: pan de masa madre, pan a base de fermentación a granel, el método de esponja, entre otros.

1.4.1. Pan fermentado

De manera contemporánea el pan evolucionó de acuerdo a la diversidad e intercambio cultural que se dio entre los países, modificando las características del pan fermentado. Lo que generó una partición entre pan dulce horneado y dulce frito. En la figura 1.2 se ejemplifica una parte de la gran variedad existente de pan dulce en México, se muestra una panadería y el arreglo usual en que se acomodan los panes (Chávez Salgado, 2018):

Pan dulce horneado

- Se adiciona azúcar u otros endulzantes.
- Miga esponjada con o sin barniz.
- Decorados con una capa dulce, azúcar, coco, ajonjolí.
- Ejemplos: Cuerno, hojaldras, conchas, moño, rebanadas.

Pan dulce frito

- Se incorpora azúcar y una vez moldeado se fríe en aceite.
- El proceso de fritura produce una miga suave y uniforme.
- La dureza de la corteza dependerá del tiempo y temperatura del aceite.
- Se decora con azúcar, cobertura de chocolate, granilla de colores.
- Ejemplos: Donas, berlinesa, trenzas, churros.

Pan leudado

De acuerdo al tipo de leudado se puede dividir en químico o biológico, el leudado modifica la masa produciendo gas carbónico en el proceso de fermentación. El leudado químico se produce por la incorporación de bicarbonato de sodio, bicarbonato de potasio o bicarbonato de amonio (QuimiNet, 2006).

El leudado biológico se produce por el uso de cepas de microorganismos (levaduras) que metabolizan azúcares, existen diversas levaduras que otorgan sabor y aroma diferentes, así como estructura, volumen y suavidad. En la Tabla 1.2 se muestran los diferentes tipos de pan, de acuerdo al leudado (Chávez Salgado, 2018).

Tabla 1.2: Categorías de pan leudado.

Tipo de pan	Características	Nombre del pan
Esponjado en forma de hojaldre	Incorporado con azúcar con miga de hojaldras pequeñas	Bísquet, cuadro o barra

Nombre del pan	Características	Tipo de pan
Panqués, magdalenas	Con azúcar y miga esponjada; se adorna con fresas, chispas de chocolate, nueces, almendras o glaseado	Esponjado suave homogéneo
Trenza de canela, rosas planas, piedras, ladrillos, cochinitos	Azucarado, miga compacta y corteza semidura	Compacto semiduro homogéneo
Todos los tipos de galleta	Azucarado, miga y corteza dura	Compacto duro homogéneo
Polvorones	Miga desmoronable y corteza dura	Compacto desmoronable homogéneo
Banderillas, trenzas, campechanas, orejas, empanadas	Miga en láminas (feite), decorado con azúcar caramelizada, azúcar glass, coco o mermelada	Compacto laminado

1.5. Estabilidad y vida útil

La VU de un alimento se refiere al período de tiempo durante el cual un alimento puede ser almacenado y consumido manteniendo sus propiedades sensoriales, fisicoquímicas y microbiológicas dentro de los límites aceptables. Este concepto es crucial en la industria alimentaria, ya que la VU de un alimento está estrechamente relacionada con su calidad, seguridad y comercialización. Es importante destacar que la VU de un alimento no solo se refiere a su seguridad microbiológica, sino también a la preservación de sus características organolépticas y nutricionales (Orozco Corrales & Irigoyen Cossío, 2021).

La VU de un alimento está influenciada por diversos factores, incluyendo la composición del alimento, el procesamiento al que ha sido sometido, las condiciones de almacenamiento y la interacción con el ambiente. La determinación de la VU de un alimento se lleva a cabo a través de estudios de estabilidad, los cuales evalúan la evolución de las características del alimento a lo largo del tiempo bajo diferentes condiciones de almacenamiento. En la industria alimentaria, la VU de un alimento se establece a través de pruebas de laboratorio que evalúan parámetros como la actividad de agua, el pH, la presencia de microorganismos, la oxidación de grasas, entre otros. Estas pruebas permiten determinar la fecha de caducidad o la fecha de consumo preferente que se debe indicar en el etiquetado del producto. Para los análisis de VU de un alimento existen diferentes pruebas que serán ideales o no dependiendo del tipo de alimento que se esté estudiando, la cantidad de tiempo disponible y si es rentable económicamente. El método de pruebas de VU aceleradas permite someter al alimento a condiciones en las que podría estar expuesto, con un análisis estadístico adecuado estos datos pueden ayudar a la predicción de la VU (Calligaris et al., 2019; Puma Isuiza et al., 2018; Rasane et al., 2015).

La importancia de prolongar la vida útil de los alimentos radica en la reducción del desperdicio de alimentos, la garantía de la SA y la satisfacción del consumidor (Ibeanu et al., 2011; Martindale & Schiebel, 2017). La comprensión de la vida útil de los alimentos es esencial para la mejora de la calidad y la reducción del riesgo de enfermedades transmitidas por alimentos (Inungaray & Munguía, 2013).

1.6. Factores que afectan la calidad y la vida útil de los productos de panificación

Los fenómenos que influyen en la VU del pan abarcan cuestiones físicas y bioquímicas, que dependiendo de sus condiciones de almacenamiento, se manifiestan en mayor o menor medida, en la figura 1.3 se ofrece una perspectiva general de este conjunto de fenómenos.



Figura 1.2: Variedad de pan en panaderia.

1.6.1. Parámetros fisicoquímicos

Retrogradación del almidón

El fenómeno de deterioro más común en el pan es llamado envejecimiento o por su término en Inglés “staling”, esté se refiere a cambios durante el almacenamiento que se manifiestan en cambios en la textura, frescura y sabor de la miga y corteza del pan. Los cambios más notables son el endurecimiento de la miga y el ablandamiento de la corteza, estos cambios se dan por la migración del agua o humedad contenidas en la miga hacia la corteza y la retrogradación el almidón, que también suele referirse como re cristalización del almidón. El almidón es un componente cristalino, compuesto por amilosa y amilopectina, el cual es mayoritario de la harina de trigo, generalmente el 8 % del almidón es dañado durante la molienda; el daño de los gránulos afecta las propiedades del almidón, debido a que el almidón dañado tiene una alta absorción de agua y es más susceptible a la hidrólisis enzimática (Acosta Granda, 2013).

Cuanto el almidón es sometido a tratamiento térmico (horneado) experimenta gelatinización y retrogradación, puesto que ocurre una combinación de calor, humedad y tiempo durante la cocción del pan (Hernando, 2012).

Una de las principales causas del envejecimiento del pan es la gelatinización del almidón, este factor es la destrucción irreversible del orden molecular de los gránulos de almidón. Durante la gelatinización, una pequeña cantidad de almidón, principalmente amilosa, es liberada en la región intergranular lo que conduce a un aumento de la viscosidad (Toro Rodríguez et al., 2019).

Pérdida de humedad y cambios en la textura

La pérdida de humedad durante el almacenamiento del pan es muy común debido a que la humedad del exterior es mayor que la del pan recién salido del horno, por lo tanto, hay una migración de humedad desde la miga a la corteza (del almidón hinchado al gluten). Los productos con un alto contenido en humedad endurecen más rápidamente lo que provoca resequedad en la miga (Acosta Granda, 2013).

El endurecimiento de la corteza y el endurecimiento de la miga son dos tipos de cambios en la textura. El de la corteza se produce generalmente por la transferencia de la humedad desde la miga a la corteza, lo que resulta en una textura blanda y correosa, el endurecimiento de la miga es más complejo; sin embargo, puede estar relacionado a la cristalización de los polímeros con la formación de estructuras supermoleculares (Hernando, 2012).

1.6.2. Parámetros microbiológicos

Otros fenómenos que afectan la VU del pan se relacionan con el aspecto microbiológico. El enmohecimiento del pan es un problema común al que se debe la mayoría de reprocesamientos por contaminación, usualmente la contaminación por moho se da después del horneado debiéndose a un ambiente no inocuo (Melini & Melini, 2018).

Los microorganismos son un parámetro importante, ya que pueden deteriorar la materia prima, principalmente los hongos que pueden desarrollar micotoxinas que son perjudiciales para la salud y para la inocuidad alimentaria, así como el desarrollo de levaduras. Durante el proceso de fabricación el pan puede ser contaminado después de la etapa de cocción, dejando en evidencia la falta de buenas prácticas de higiene (BPH) por aparición de coliformes, bacterias aerobias y anaerobias, *E.coli*, *Bacillus cereus*, así como patógenos que no deben estar en el pan, principalmente *Salmonella*, *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus* y *Shigella* (Barclay, 2015).

Por esta razón es necesario conocer los límites máximos permisibles de los parámetros microbiológicos (Tabla 1.3) para poder tener un control sobre los microorganismos que pueden aparecer en el pan.

Tabla 1.3: Parámetros microbiológicos del pan.

Parámetro	Límite máximo permitido
<i>E. coli</i>	< 3 NMP/g
NMP Coliformes totales/g	Negativo

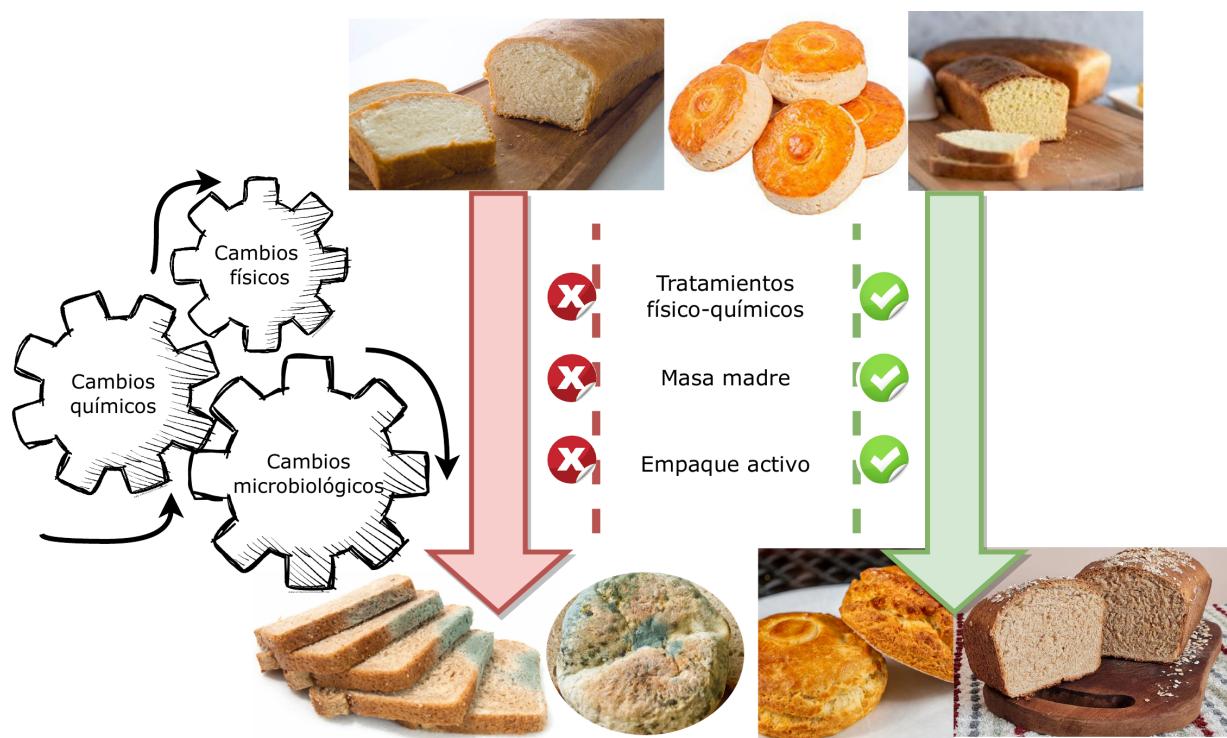


Figura 1.3: Factores que influyen sobre la vida útil de los productos de panificación.

Parámetro	Límite máximo permitido
Coliformes fecales/g	Negativo
Recuento de mohos y levaduras/g	10 colonias
Recuento de <i>Salmonella</i> por 25 g	Negativo
<i>Staphylococcus aureus</i> /g (productos rellenos de derivado lácteo)	Negativo

1.7. Cinética química y vida útil de alimentos

Se suelen describir tres métodos para la estimación de VU de un alimento. Las pruebas de VU en tiempo real suelen ofrecer buenos datos; no obstante, son largas y pueden resultar no tan efectivas para algunos alimentos. Por otra parte se tienen los estudios que utilizan la simulación y estimación de VU basada en modelos matemáticos de predicción, generalmente tomando en cuenta la sensibilidad del producto, la eficacia del empaque y las condiciones ambientales. Por último, las pruebas de VU aceleradas permitirán al investigador obtener datos en tiempos relativamente cortos, sometiendo al alimento a condiciones controladas en diferentes temperaturas que son mayores o menores a la temperatura usual de almacenamiento (Puma Isuiza et al., 2018).

La cinética modelada es una herramienta importante en la industria de alimento ya que a partir de datos experimentales de aspectos microbiológicos, físicos o químicos, que siendo medidos a diferentes tiempos y temperaturas permiten crear un diagrama de predicción, cuyos valores no solo son útiles para la estimación de VU, sino que son respaldados estadísticamente sobre su confiabilidad (Van Boekel, 1996). Diversos estudios han demostrado su funcionalidad, como el estudio de la degradación de componentes como la vitamina C en productos como el mango y el lactosuero que puede ser estudiada a través de la cinética química, lo que permite predecir las mejores condiciones de almacenamiento y la vida útil del producto (Mendoza-Corvis et al., 2016). Otro ejemplo es la cinética de transformación de la leche en yogur natural que resulta crucial

para comprender los cambios estructurales que ocurren durante el proceso, lo cual depende de parámetros como la temperatura y los cultivos utilizados (Trejo, 2014). Asimismo, la cinética de secado de plantas como la Moringa oleifera también puede ser estudiada para comprender su vida útil (Iglesias Díaz et al., 2018). La estimación de la vida útil sensorial de los productos alimenticios, como las bebidas gaseosas, se ha vuelto cada vez más importante debido al aumento del interés de los consumidores por ingerir productos frescos, seguros y de alta calidad (Acuña-Sánchez et al., 2021).

La química verde, que busca reducir o eliminar el uso o generación de materia prima, productos y subproductos peligrosos para la salud humana y el ambiente, también es relevante en la industria alimenticia, un adecuado estudio de la VU de los alimentos podría contribuir a la resolución de estos problemas al conocer el comportamiento del alimento con mejor precisión (Montes-Valencia, 2015). Por otro lado, la enseñanza de la cinética química en el contexto de la química de alimentos es fundamental para comprender los procesos que afectan la vida útil de los productos alimenticios y proponer soluciones que beneficien al productor, al consumidor y a la sociedad en general (Iniesta Valcárcel et al., 2020).

1.8. Métodos para extender la vida útil de los productos de panificación

Existen diversos métodos para la extensión de vida útil, estos suelen ser físicos y químicos, desde aspectos naturales como la producción de ácidos orgánicos débiles por bacterias ácido lácticas en pan de masa madre como métodos más recientes como la implementación de nanotecnología en los empaques, la industria alimentaria ha buscado innovar o mejorar métodos que no solo beneficien la VU, sino que mantengan aspectos de calidad, seguridad y precios. A continuación se habla de algunos de los métodos más comunes (Melini & Melini, 2018).

1.8.1. Tratamientos físicos

La panadería tradicional ha optado por el uso de métodos físicos para la extensión de VU. Entre estos el uso de luz UV a una longitud de onda de 260 nm resulta útil para el tratamiento antimicrobiano, enfocándose en el control de esporas de moho. Otro método es el calentamiento por microondas, generalmente en un intervalo de 30 a 60 segundos, de igual manera está enfocado en el control de moho en el pan; sin embargo, de estar empaquetado puede causar problemas de condensación, siendo contraproducente. Por último los tratamientos con IR (infrarrojo) también son utilizados para el control de esporas de moho, teniendo la ventaja de no afectar la calidad y apariencia del producto o la integridad del empaque.

1.8.2. Tratamientos químicos

Se suelen usar aditivos como ácidos orgánicos débiles (ej: ácido propiónico, ácido sórbico), que suelen estar enfocados para evitar el crecimiento de microrganismos indeseados. Se ha observado que grandes concentraciones de sorbato o propionato son ideales para promover la actividad antifúngica.

1.8.3. Empaquetado activo con absorbedores de oxígeno

El oxígeno es uno de los factores que incrementan el fenómeno de envejecimiento del pan, además de promover la oxidación lipídica en pan con altos contenidos de grasas. Remover el oxígeno permite retrasar estos fenómenos de deterioro. Otros métodos para controlar el oxígeno en los empaques como lo es el empacado al vacío no son ideales para el pan, puesto que también absorben el aire dentro del pan, lo que afecta su calidad y aceptación sensorial.

1.8.4. Empaquetado activo con emisores de sistemas antimicrobianos

Este tipo de empaques liberan agentes antimicrobianos en la superficie del alimento, donde usualmente comienza el crecimiento, inhibiendo o retrasando el crecimiento microbíológico y por lo tanto, el deterioro del

alimento. Se enfoca en el aseguramiento de la seguridad, mantener la calidad y extender la VU. Los compuestos más comunes son ácidos orgánicos débiles, fungicidas, alcoholes y antibióticos. Es importante recalcar que no hay un solo agente antimicrobiano que funcione contra todos los microorganismos deterioradores o patógenos, conocer el alimento y los microorganismos a los que usualmente está expuesto va a ser un determinante del éxito de este método.

1.9. Conclusión

A modo de cierre, este estudio pretende destacar la importancia del pan en la sociedad, cultura y economía, señalando una buena calidad que garantice la SA y VU de estos alimentos. Se conoce que hay una gran variedad de factores que influyen en la VU de los alimentos, dichos factores existen intrínseca y extrínsecamente al pan, es decir, factores como la temperatura de almacenamiento pueden acelerar o retrasar los fenómenos de deterioro. El estudio de la evolución de los factores de deterioro a través del tiempo es una herramienta útil para la creación e implementación de técnicas para la extensión de VU, a lo largo de la historia se han implementado técnicas para retrasar el deterioro de los alimentos, siendo el enfoque común el microbiológico; sin embargo, son técnicas que han sido generalizadas y no funcionan con la misma efectividad para todos los productos debido a las características únicas de los mismos. Estudios como aquellos de pruebas aceleradas permite especializar un método de conservación, recientemente dichos estudios suelen estar relacionados con la predicción de los valores respaldados por modelos cinéticos, lo que da confiabilidad estadística. El estudio e implementación de estas herramientas presenta beneficios para la industria alimentaria y para el consumidor.

Referencias

Acosta Granda, V. de los Á. (2013). *Evaluación de La Textura Del Pan, Elaborado a Partir de Harina de Trigo Nacional (Triticum Vulgare), Con Adición de Gluten Vital* [Tesis de {{Ingenier\'i}a}]. Universidad Técnica de Ambato.

Acuña-Sánchez, J., Barreto-Cabel, A., Culquichicon-Jacobo, K., & Espinola-Jicaro, C. (2021). Percepción Sensorial de Bebidas Gaseosas Utilizando Pruebas Sensoriales y Análisis Multivariado. *Journal of neuroscience and public health*, 1(2), 63-67. <https://doi.org/10.46363/jnph.v1i2.4>

Araya-Pizarro, S. C., & Araya Pizarro, C. R. (2020). Importancia de La Certificación de Calidad En La Decisión de Compra de Productos Agroalimentarios Artesanales. *Innovar*, 30(77), 53-62. <https://doi.org/10.15446/innovar.v30n77.87430>

Barclay, M. E. (2015). *Guía de Buenas Prácticas de Manufactura En Panadería y Confitería* [Tesis de {{Licenciatura}}]. Universidad Nacional de la Plata.

Calligaris, S., Manzocco, L., Anese, M., & Nicoli, M. C. (2019). Accelerated Shelf Life Testing. En *Food Quality and Shelf Life* (pp. 359-392). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817190-5.00012-4>

Chávez Salgado, I. D. (2018). *Desarrollo de Un Sistema Gelatinizado Para La Formulación de Pan Leudado Tipo Bizcocho* [Tesis de {{Licenciatura}}]. Universidad Autónoma del Estado de México.

Diario Oficial de la Federación. (2008). *NORMA Oficial Mexicana NOM-247-SSA1-2008, Productos y Servicios. Cereales y Sus Productos. Cereales, Harinas de Cereales, Sémolas o Semolinillas. Alimentos a Base de: Cereales, Semillas Comestibles, de Harinas, Sémolas o Semolinillas o Sus Mezclas. Productos de Panificación. Disposiciones y Especificaciones Sanitarias y Nutrimentales. Métodos de Prueba.* https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5100356&fecha=27/07/2009#gsc.tab=0.

Edwards, W. P. (2007). *The Science of Bakery Products*. Royal Society of Chemistry.

Harvey, M., McMeekin, A., & Warde, A. (Eds.). (2018). *Qualities of Food*. Manchester University Press. <https://doi.org/10.7765/9781526137609>

Hernando, D. (2012). *Evolución de La Vida Útil En Panes Sin Corteza Blancos al Sustituir El Mejorante y Sórbico Habituales*. [Tesis de {{Maestría}}]. Universidad de Valladolid.

Ibeantu, V., Onuoha, N., Ezeugwu, E., & Ayogu, R. (2011). Food Preservation and Security at Household Level in Rural Nsukka, Enugu State, Nigeria. *Agro-Science*, 9(2). <https://doi.org/10.4314/as.v9i2.64806>

Iglesias Díaz, R., Grimaldi Gutiérrez, R. V., Villanueva Galindo, B. E., Hernández Jarquín, J. M., López De Paz, P., & Lastres Danguillecourt, O. (2018). Cinética de Secado de Moringa Oleifera. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(5), 935-947. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i5.1503>

Iniesta Valcárcel, J., Martínez Lirola, M., & Universidad de Alicante. (2020). Objetivos de Desarrollo Sostenible y Educación Para El Desarrollo Sostenible: Aplicaciones a La Enseñanza de La Asignatura Cinética Química Del Grado En Química. *Ensayos. Revista de la Facultad de Educación de Albacete*, 35(2), 17-33. <https://doi.org/10.18239/ensayos.v35i2.2250>

Inungaray, M. L. C., & Munguía, A. R. (2013). Vida útil de los alimentos / Lifetime food. *CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 2(3), 32-56.

Juárez, C. (2020). Cifras de la industria del trigo en México. En *The food Tech*. <https://thefoodtech.com/tendencias-de-consumo/industria-del-trigo-en-mexico/>.

Köbrich, C., Farias, C., & Maino, M. (2014). Oferta y Potencial de Desarrollo de Atributos de Valor de Productos Cárnicos Bovinos En El Mercado Minorista Chileno. *Avances en Ciencias Veterinarias*, 28(2). <https://doi.org/10.5354/0716-260X.2013.30203>

Martindale, W., & Schiebel, W. (2017). The Impact of Food Preservation on Food Waste. *British Food Journal*, 119(12), 2510-2518. <https://doi.org/10.1108/BFJ-02-2017-0114>

Melini, V., & Melini, F. (2018). Strategies to Extend Bread and GF Bread Shelf-Life: From Sourdough to Antimicrobial Active Packaging and Nanotechnology. *Fermentation*, 4(1), 9. <https://doi.org/10.3390/fermentation4010009>

Mendoza-Corvis, F. A., M, M. A., & S, O. P. (2016). Comportamiento de la vitamina C en un producto a base de lactosuero y pulpa de mango variedad Magdalena River (Mangifera Indica l.) durante el secado por aspersión. *Revista Chilena de Nutrición*, 43(2), 159-166.

Mesas, J. M., & Alegre, M. T. (2002). El Pan y Su Proceso de Elaboración. *Ciencia y Tecnología alimentaria*, 3(5), 307-313.

Montes-Valencia, N. (2015). La Industria Química: Importancia y Retos. *Lámpsakos*, 14, 72-85.

Ochando Ramírez, M. V., Rucabado Sala, A., & Ortega Martínez, A. R. (2015). Calidad En Los Servicios Sociales de Acogimiento Familiar. *Alternativas. Cuadernos de Trabajo Social*, 22, 139. <https://doi.org/10.14198/ALTERN2015.22.08>

Orozco Corrales, M., & Irigoyen Cossío, M. J. (2021). Vida Útil de Nachos Envasados Con Gas Inerte Mediante El Método Del Tiempo Real. *Journal Boliviano de Ciencias*, 17(Especial), 86-96. <https://doi.org/10.52428/20758944.v17iEspecial.9>

Osorio-Diaz, P., Sanchez-Pardo, M. E., & Bello-Perez, L. A. (2014). Mexican Bakery Products. En *Bakery Products Science and Technology* (pp. 723-734). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118792001.ch41>

Payehuanca- Mamani, I., & Matos-Chamorro, A. (2011). La Formación de La Masa, La Fermentación y Los Métodos de Proceso En La Elaboración Del Pan. *Congreso Nacional de Investigación*.

Puma Isuiza, G. G., Liñan Perez, J. F., Coavoy Sánchez, I., Coronado Olano, J., Salas, W., & Vargas Delgado, L. F. (2018). Vida en anaquel de galletas saladas utilizando pruebas aceleradas. *Anales Científicos*, 79(1 (Enero a Junio)), 218-225.

Rasane, P., Jha, A., & Sharma, N. (2015). Predictive Modelling for Shelf Life Determination of Nutricereal Based Fermented Baby Food. *Journal of Food Science and Technology*, 52(8), 5003-5011. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1545-x>

Rosell, C. M., Bajerska, J., & Sheikha, A. F. E. (2015). *Bread and Its Fortification: Nutrition and Health Benefits*. CRC Press.

Rubel, W. (2011). *Bread: A Global History*. Reaktion Books.

Secretaría de Economía. (2017). Conoce más sobre la industria panificadora en México. En *gob.mx*. <http://www.gob.mx/se/artistas-sobre-la-industria-panificadora-en-mexico?idiom=es>.

Sidel, J. L., & Stone, H. (1993). The Role of Sensory Evaluation in the Food Industry. *Food Quality and Preference*, 4(1-2), 65-73. [https://doi.org/10.1016/0950-3293\(93\)90314-V](https://doi.org/10.1016/0950-3293(93)90314-V)

Toro Rodríguez, G. G., Ancco Vizcarra, T., & Ramos Huallpartupa, D. J. (2019). Determinación de Idda Útil En Anaquel de Pan Libre de Gluten a Base de Harina de Quinoa (Chenopodium Quinoa) Envasado En Polietileno y Polipropileno. *Ciencia & Desarrollo*, 18, 68-71. <https://doi.org/10.33326/26176033.2014.18.454>

Torres Oquendo, J. D. (2017). El Alimento Como Producto de Nutrición y Placer: Reto Actual de La Industria y La Academia. *Revista Vitae*, 9-10. [https://doi.org/10.17533/udea.vitae.v24n2\(2\)a01](https://doi.org/10.17533/udea.vitae.v24n2(2)a01)

Trejo, A. (2014). *Cinética de Transformación de La Leche a Yogur Natural Usando Lactobacillusjohnsonii(La1) y Streptococcusthermophilus*.

Trujillo, P. A., Rogério, A. B., Oliveira, R. L. Z. de, & Trigoso, J. A. C. (2019). Satisfacción Del Cliente: Estudio Desde Las Metodologías de Calidad. Caso Black Mout. *Revista Venezolana de Gerencia*, 24(88), 1290-1303. <https://doi.org/10.37960/revista.v24i88.30179>

Van Boekel, M. A. J. S. (1996). Statistical Aspects of Kinetic Modeling for Food Science Problems. *Journal of Food Science*, 61(3), 477-486. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1996.tb13138.x>

Weis, R. (2012). *Bakers and Basques: A Social History of Bread in Mexico*. University of New Mexico Press.

CAPÍTULO 2

Estudio de vida útil del bisquet

Resumen

EL ESTUDIO DE ESTE CAPÍTULO 2 se centró en el problema de determinar la vida útil del bisquet, un pan tradicional mexicano cuya preservación es fundamental para su consumo óptimo. El objetivo principal era evaluar cómo la calidad del bisquet era afectada por diferentes condiciones de almacenamiento, específicamente en términos de contenido de humedad, actividad de agua (AW) y cambios en el peso. Se utilizó un enfoque metodológico basado en el análisis cinético y modelos de reacción de orden cero, uno y dos para simular los cambios en estos atributos críticos de calidad bajo distintas temperaturas (20°C y 30°C). Los resultados revelaron que tanto la temperatura como el tiempo de almacenamiento tuvieron un impacto significativo en la AW, el contenido de humedad y la pérdida de peso del bisquet. La AW mostró el mayor ajuste lineal con los modelos cinéticos estudiados, especialmente a 20°C, sugiriendo que era el atributo crítico de calidad para estimar la vida útil de los bisquots. En conclusión, se confirmó la importancia de considerar la temperatura y el tiempo de almacenamiento como factores clave en la preservación de la calidad del bisquet. Se destacó la AW como un atributo de calidad crítico para estimar la vida útil de las muestras de bisquet y la toma de decisiones en la producción y almacenamiento de este producto.

Lista de acrónimos

ANOVA	análisis de varianza	20
AW	actividad de agua	15
VU	vida útil	2

2.1. Introducción

El bisquet es un pan tradicional de México que también puede ser nombrado como bisquet chino o de sal, esto se debe a que se presencia en México se atribuye a inmigrantes chinos, que cambiaron la receta original China adecuándose a los ingredientes y estilos de cocina mexicanos. Su formulación incluye huevo, azúcar y manteca o mantequilla, se suele acompañar con mermelada, mantequilla o jaleas durante el desayuno o la merienda. Su elaboración tradicional sigue los los pasos que se describen a continuación (Universidad Anáhuac Querétaro, 2020). Mientras que en la Figura 2.2 se muestra el diagrama de flujo correspondiente. Los pasos para elaborar el bisquet son:

1. Se mezclan los ingredientes secos (Harina de trigo, polvo para hornear, sal y azúcar).

2. Se integra la grasa a temperatura ambiente (Manteca de cerdo o mantequilla).
3. Se mezcla el huevo y la leche, esta se inocorpora a los ingredientes secos y se mezcla hasta formar una masa homogénea.
4. Se extiende la masa y se moldea, marcando un círculo en la parte media ya que le dará su forma característica, misma que se muestra en la Figura 2.1.
5. Barnizar con huevo.
6. Hornear a 180°C de 20 a 25 minutos.
7. Dejar enfriar.

El pan es un alimento, usualmente horneado, que es preparado con masa hecha de harina y agua como ingredientes principales, aunque la harina puede provenir de diversos cereales lo más común es que sea harina de trigo. La variedad de ingredientes y preparaciones encontrados en las formulaciones del pan deriva en una gran cantidad de propiedades, condiciones de almacenamiento y requerimientos de calidad que son únicos de cada tipo. El bisquet tal como otros productos de panificación, independientemente de sus características únicas, sufren de fenómenos de deterioro durante su almacenamiento, uno de los fenómenos que se presenta constantemente en este tipo de productos es el envejecimiento.

El envejecimiento del pan es un fenómeno complejo que involucra cambios en la estructura y textura del producto durante el almacenamiento. Estos cambios están relacionados con la retrogradación del almidón, la formación de productos de la reacción de Maillard y la redistribución del agua en el pan (Filipčev et al., 2017; Lagrain et al., 2012; Mihhalevski et al., 2012). La retrogradación del almidón, que implica la recristalización de las moléculas de almidón, es uno de los componentes más importantes que afectan el envejecimiento del pan (Mihhalevski et al., 2012). Este proceso conduce a la pérdida de humedad, lo que resulta en una disminución de la elasticidad y un aumento en la firmeza del pan (Filipčev et al., 2017; Lagrain et al., 2012). Además, la formación de productos de la reacción de Maillard y la presencia de malto-oligosacáridos en el pan también pueden influir en el envejecimiento al prevenir la retrogradación del almidón (Lagrain et al., 2012; Tsai et al., 2012).

La redistribución del agua durante el almacenamiento del pan también desempeña un papel fundamental en su envejecimiento, ya que afecta la textura y la firmeza del producto (Osborne, 1998; Osella et al., 2005). Además, la presencia de compuestos como los AGEs (productos finales de glicación avanzada) y la formación de estructuras cristalinas en el almidón también contribuyen al envejecimiento del pan (Colwell et al., 1969; Wilson et al., 1991). Estos cambios estructurales y químicos afectan la calidad sensorial del pan, incluyendo su aroma, sabor y textura (Rohleider et al., 2019).

Además, factores como la adición de ciertos ingredientes, el procesamiento del pan, el almacenamiento a diferentes temperaturas y la aplicación de tecnologías de conservación también pueden influir en el envejecimiento del pan (Al-Shammari et al., 2022; Ghalambor et al., 2023; Zhou et al., 2019). Por ejemplo, la adición de ciertos aditivos puede retrasar el envejecimiento al afectar la estructura y la textura del pan, mientras que el almacenamiento a temperaturas más altas puede acelerar el proceso de envejecimiento (Colwell et al., 1969; Mihhalevski et al., 2012).

Con base en lo expuesto, el propósito de este capítulo consistió en analizar el impacto de la temperatura y el tiempo de almacenamiento en la actividad de agua (AW), contenido de humedad y la pérdida de peso, aspectos fisicoquímicos que inciden en la calidad de muestras de bisquets. Este análisis se llevó a cabo mediante pruebas de vida útil (VU) aceleradas, con el objetivo de discernir cuál de estos atributos fisicoquímicos tiene una influencia predominante en la VU del producto.

2.2. Materiales y métodos

2.2.1. Muestras

Se utilizaron bisquets proporcionados por una empresa productora de pan ubicada en Pachuca de Soto, Hidalgo, México.



Figura 2.1: Bisquet tradicional.

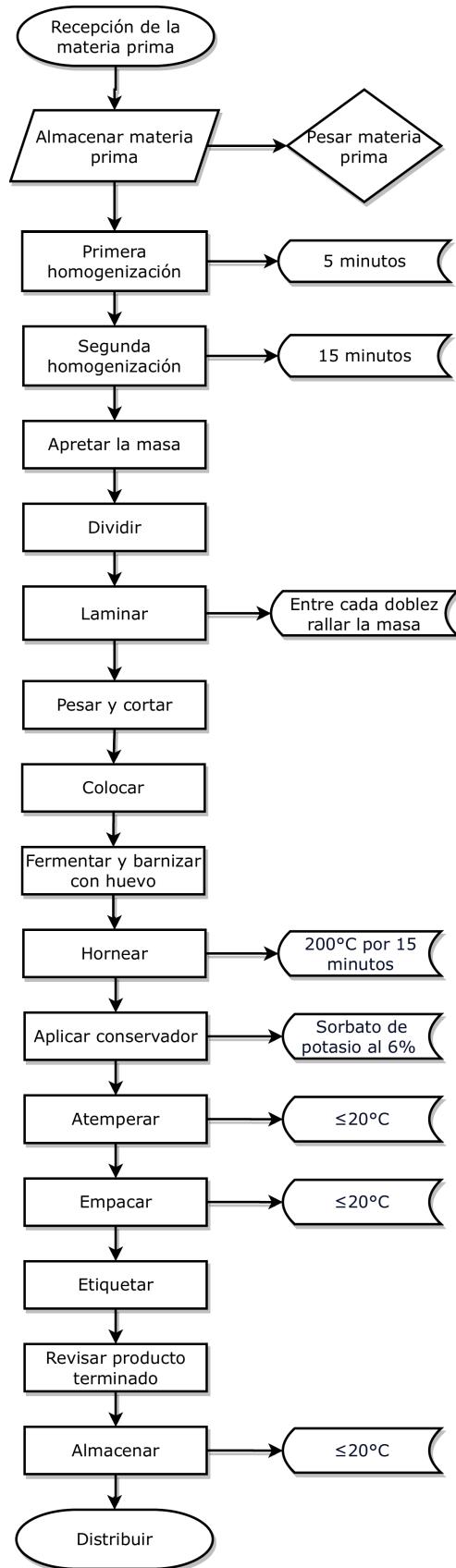


Figura 2.2: Diagrama de flujo para la elaboración de bisquets.



Figura 2.3: Metodología general para el estudio de vida útil del bisquet.

2.2.2. Metodología general

Las primeras muestras recibidas de la empresa colaboradora fueron examinadas para asegurar que cumplían con los estándares de calidad requeridos para el estudio. Estas muestras fueron divididas en dos grupos y evaluadas a diferentes temperaturas (20°C y 30°C). Posteriormente, se llevaron a cabo análisis fisicoquímicos para monitorear los cambios en el peso, la AW y el contenido de humedad. Con los resultados fue realizado el análisis cinético de la variación en estos atributos fisicoquímicos de calidad. En la Figura 2.3 se muestra una serie de fotos que muestra las etapas del presente estudio.

2.2.3. Estudio de la vida útil de bisquets

El estudio de VU fue realizado a través del monitoreo y de la determinación por triplicado de los atributos fisicoquímicos de calidad de los bisquots, los cuales fueron evaluados considerando los siguientes criterios:

Actividad de agua

Para llevar a cabo la medición de agua fue necesario calibrar el equipo Aqualab (DECAGON, Modelo: Serie 3TE, Washington) utilizando agua desionizada. A condiciones de temperatura ambiente, se buscó una calibración de 1 ± 0.003 . Cada muestra tratada en condiciones diferentes fue colocada en el equipo y se realizaron determinaciones por triplicado.

Pérdida de peso

Para evaluar la variación de peso de las muestras de bisquots durante su almacenamiento, se pesaron las piezas en una balanza analítica (Ohaus) a temperatura ambiente para comparar los valores con las muestras pesadas a diferentes condiciones a lo largo del estudio. Las determinaciones fueron hechas en triplicado.

Humedad

Para determinar la humedad de las muestras almacenadas en diferentes condiciones, las muestras se colocaron en una charola de aluminio, previamente puesta a peso constante y etiquetada debidamente. Las charolas fueron colocadas en una estufa (Lab-line) a 65-70° C durante 1 hora hasta lograr el peso constante.

En cuanto a las muestras, 5 g de cada muestra fueron pesados y colocados en las charolas, fueron colocadas en la estufa (Lab-line) a 65° C durante 4 horas. Al terminar el tiempo se colocaron en el desecador por 10 minutos y se pesaron. Las determinaciones fueron hechas al triplicado.

2.2.4. Análisis estadístico

Los datos fueron utilizados realizando pruebas estadísticas y realizando gráficos con el lenguaje de programación R. Se utilizó el programa RStudio (v4.1.2) para este propósito.

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) factorial y una prueba de Tukey post-hoc ($p<0.05$) para evaluar la influencia del empaque y la temperatura de almacenamiento en los cambios de los atributos fisicoquímicos de calidad de los bisquots. La forma en la que fueron organizados los datos se muestra en la Sección A.1 del material suplementario. Mientras que los *scripts* de R desarrollados e implementados para llevar a cabo el análisis estadísticos, también se muestran en las Secciones A.2.1, A.2.2 y A.2.3 del material suplementario.

2.2.5. Análisis cinético de los atributos fisicoquímicos de calidad en bisquots

Para tener un mejor entendimiento de los cambios durante el almacenamiento a diversas CE de los atributos fisicoquímicos de calidad de los bisquots en relación a su empaque, se implementaron modelos cinéticos que seguían las ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3. Estos modelos fueron utilizados para ajustar los datos experimentales, esto permitió evaluar de manera más exacta los datos y determinar cuál describe mejor el comportamiento de estos atributos.

$$Q = Q_0 \pm kt \quad (2.1)$$

$$\ln Q = \ln Q_0 \pm kt \quad (2.2)$$

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_0} \pm kt \quad (2.3)$$

Donde:

- Q es la cantidad del atributo de interés en un tiempo t .
- Q_0 es la cantidad inicial del atributo.
- k es la constante de velocidad de la reacción.
- t es el tiempo.

2.3. Resultados y discusión

2.3.1. Influencia del tiempo y de la temperatura de almacenamiento

El análisis de varianza (ANOVA) de dos vías realizado evaluó la influencia de dos factores, Temperatura y Tiempo de almacenamiento, así como su interacción, sobre la variabilidad en los atributos fisicoquímicos de calidad del bisquet: humedad, pérdida de peso y actividad de agua (AW). Los resultados del ANOVA se muestran en el material suplementario en la Subsección A.3.

La Tabla A.2 muestra los resultados del ANOVA para el bisquet, en relación con la variabilidad de la humedad durante el tiempo que duró el estudio a las 2 temperaturas de 20 y 30°C. Los resultados revelaron que la temperatura de almacenamiento no tiene un impacto significativo en la variación del contenido de humedad (valor- $p=0.451017>0.05$). De hecho, esto puede ser observado en la Figura 2.4. En contraste, tiempo de almacenamiento mostró una influencia considerablemente significativa ($p=6.79 \times 10^{-8}<0.05$), lo cual puede ser observado en la Figura 2.5. La interacción entre Temperatura y Tiempo de almacenamiento también fue estadísticamente significativa ($p=0.000659<0.05$), indicando que el efecto conjunto de estos factores es diferente de la suma de sus efectos individuales. Estos resultados sugieren que la duración del almacenamiento

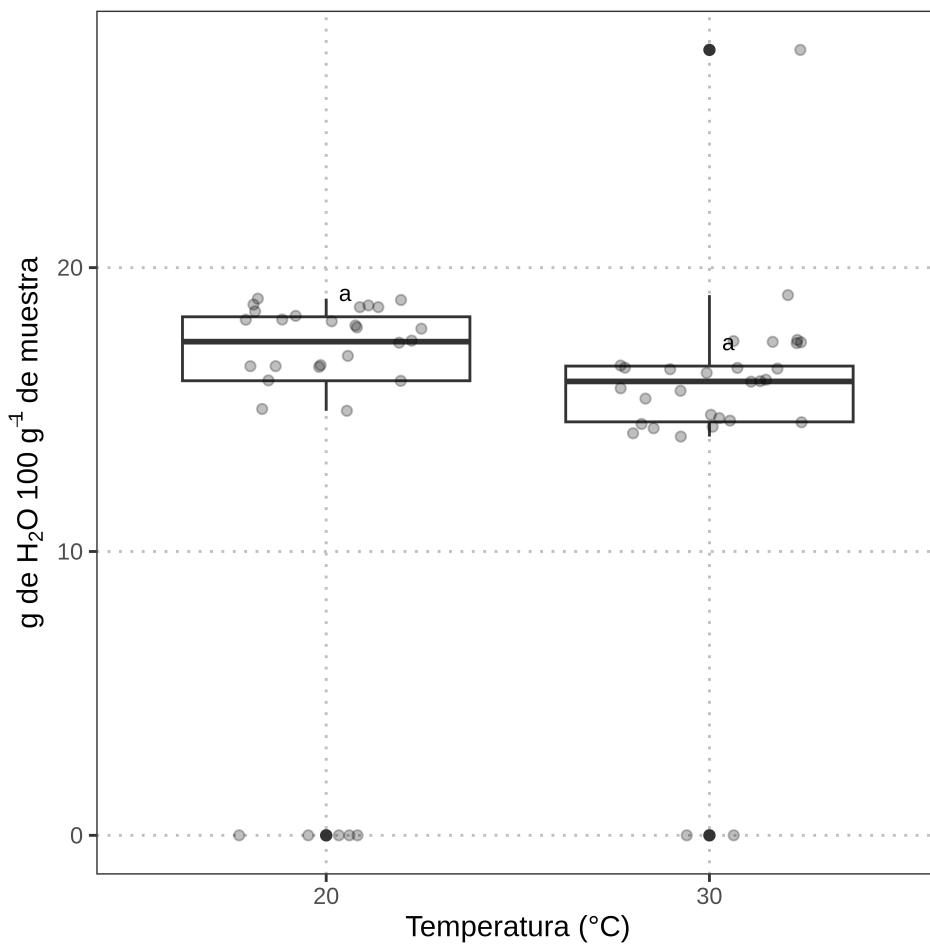


Figura 2.4: Valores de cambio en el contenido de humedad ($\text{g de H}_2\text{O } 100 \text{ g}^{-1}$ de muestra) de bisquets obtenidos en diversas condiciones de estudio. Los diagramas de caja y bigotes, diferenciados por letras minúsculas, evidencian discrepancias significativas entre los conjuntos de datos en distintas temperaturas de almacenamiento ($p < 0.05$).

tiene un efecto más pronunciado en el contenido de humedad del bisquet que la variación de temperatura, y la combinación de ambos factores contribuye de manera significativa a las variaciones observadas en el contenido de humedad.

La Tabla A.3 muestra los resultados del ANOVA para el bisquet, en relación con la variabilidad en la masa o peso del producto durante el tiempo que duró el estudio a las 2 temperaturas de 20 y 30°C. Los resultados revelaron que la temperatura de almacenamiento no presentó una influencia significativa en la variación de peso en el bisquet ($p=0.079 > 0.05$), indicando posiblemente un efecto leve pero no concluyente de la temperatura de almacenamiento, es puede ser observado en la Figura 2.6. En contraste, el tiempo de almacenamiento tiene un impacto significativo y sustancial en la evolución del peso del bisquet ($p < 4.93 \times 10^{-10} < 0.05$), sugiriendo que la duración del almacenamiento afecta de manera significativa al peso, esto puede ser observado en la Figura 2.7. La interacción entre la temperatura y el tiempo de almacenamiento no resulta significativa ($p=0.848 > 0.05$), lo que sugiere que la combinación de estos factores no influye de manera diferencial en la variación de peso. En conjunto, estos resultados sugieren que el tiempo de almacenamiento es el factor dominante en la variación del peso del bisquet, mientras que la temperatura parece tener un efecto menos pronunciado y no concluyente en este contexto.

La Tabla A.4 muestra los resultados del ANOVA para el bisquet, en relación con la variabilidad en la AW del producto durante el tiempo que duró el estudio a las 2 temperaturas de ensayo, de 20 y 30°C. Los resultados revelaron que tanto la temperatura como el tiempo de almacenamiento, y su interacción, tienen

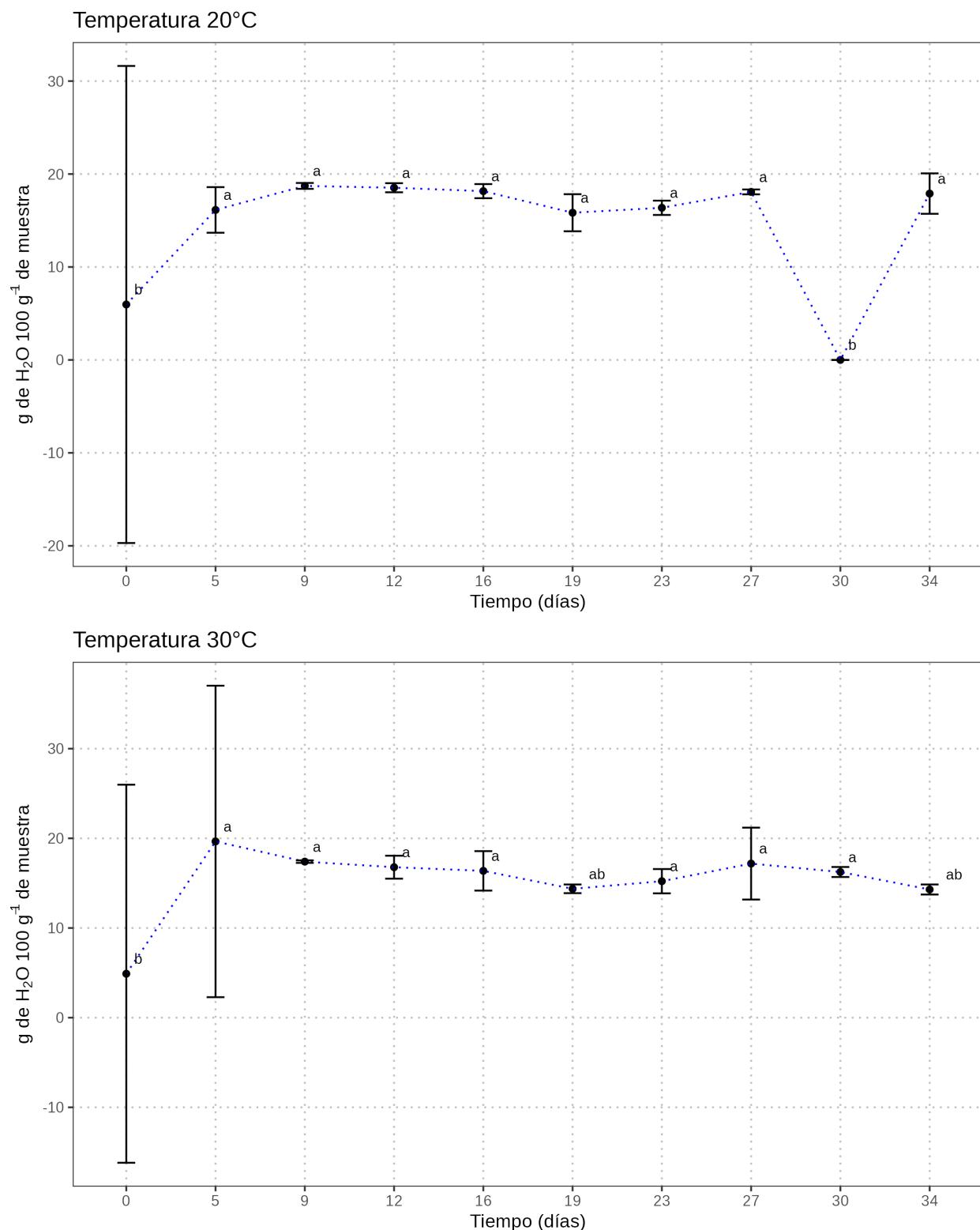


Figura 2.5: Gráfico de dispersión de la evolución en el tiempo de la humedad del bisquet en las diferentes condiciones de estudio (CE). La letras minúsculas indican diferencias en los tiempos de almacenamiento.

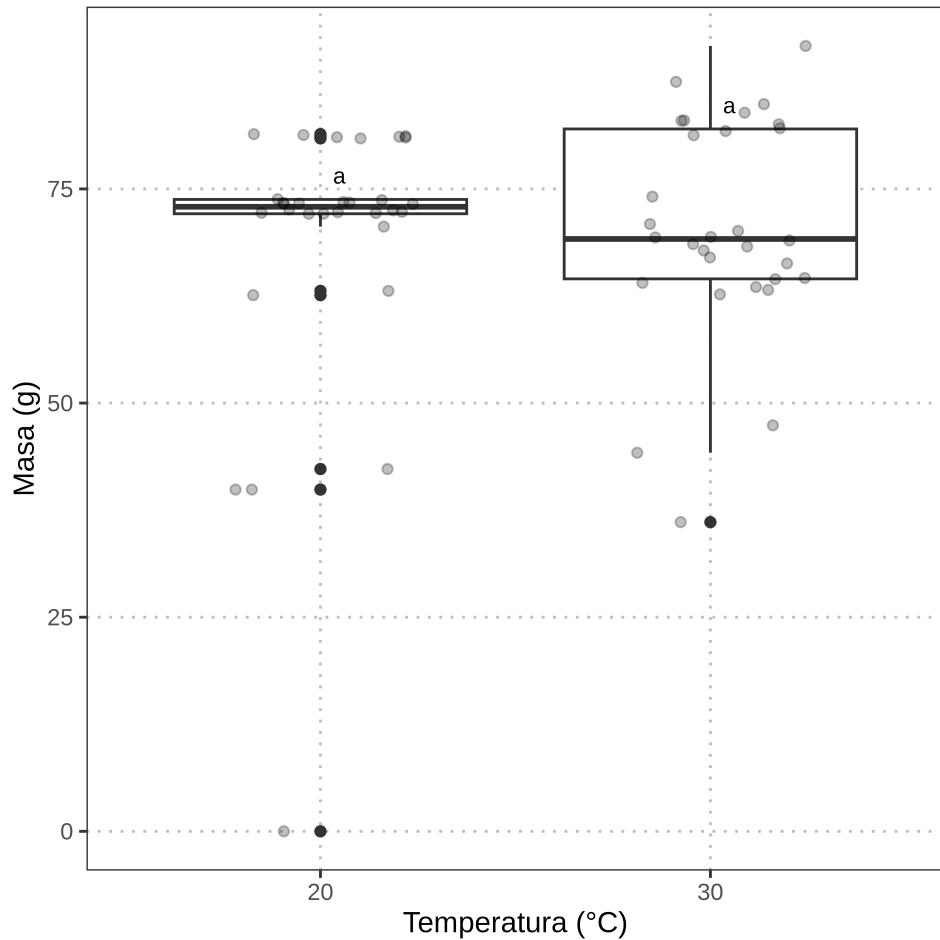


Figura 2.6: Valores de cambio en el peso (g) de bisquets obtenidos en diversas condiciones de estudio. Los diagramas de caja y bigotes, diferenciados por letras minúsculas, evidencian discrepancias significativas entre los conjuntos de datos en distintas temperaturas de almacenamiento ($p < 0.05$).

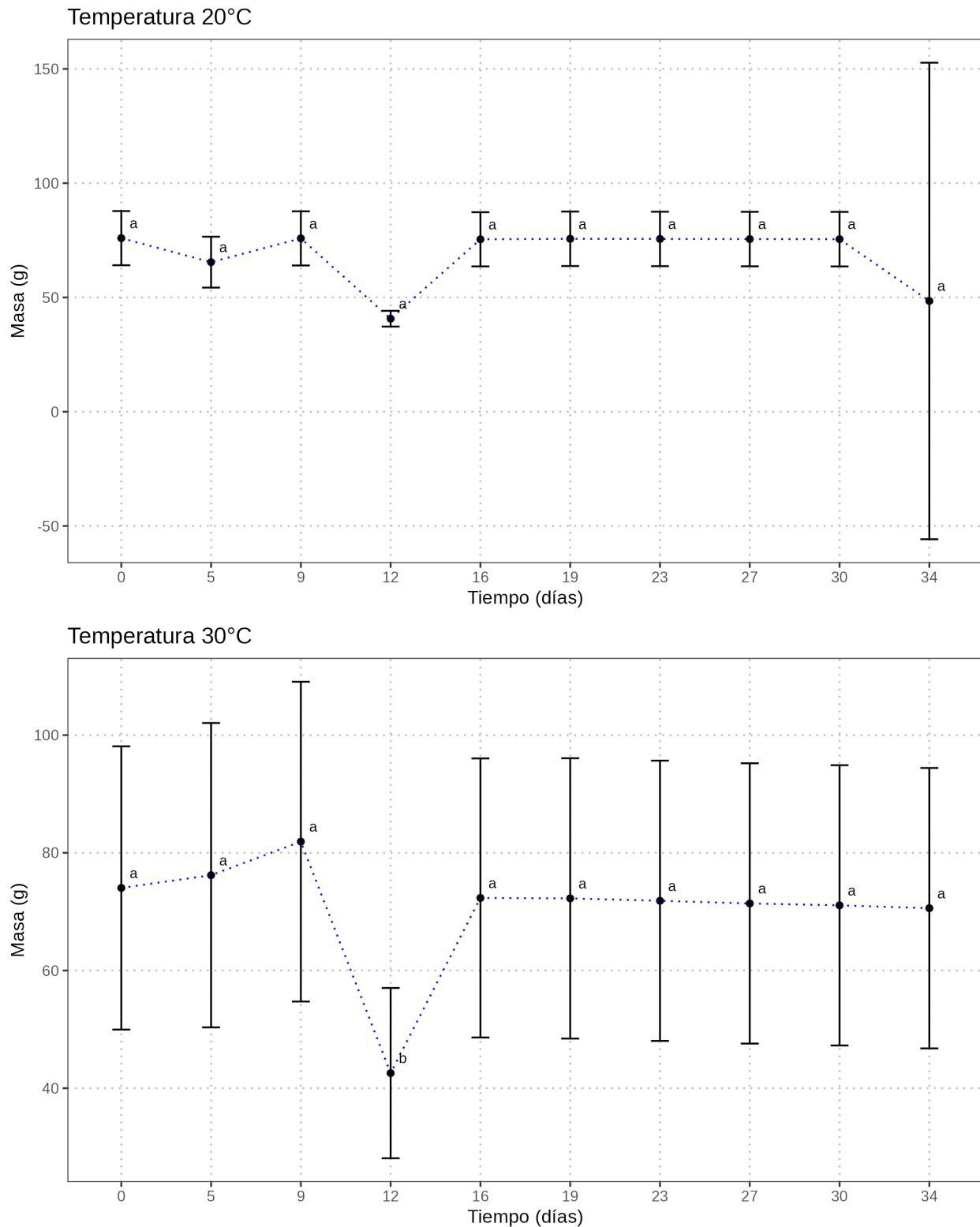


Figura 2.7: Gráfico de dispersión de la evolución en el tiempo de la pérdida de peso del bisquet en las diferentes condiciones de estudio (CE). La letras minúsculas indican diferencias en los tiempos de almacenamiento.

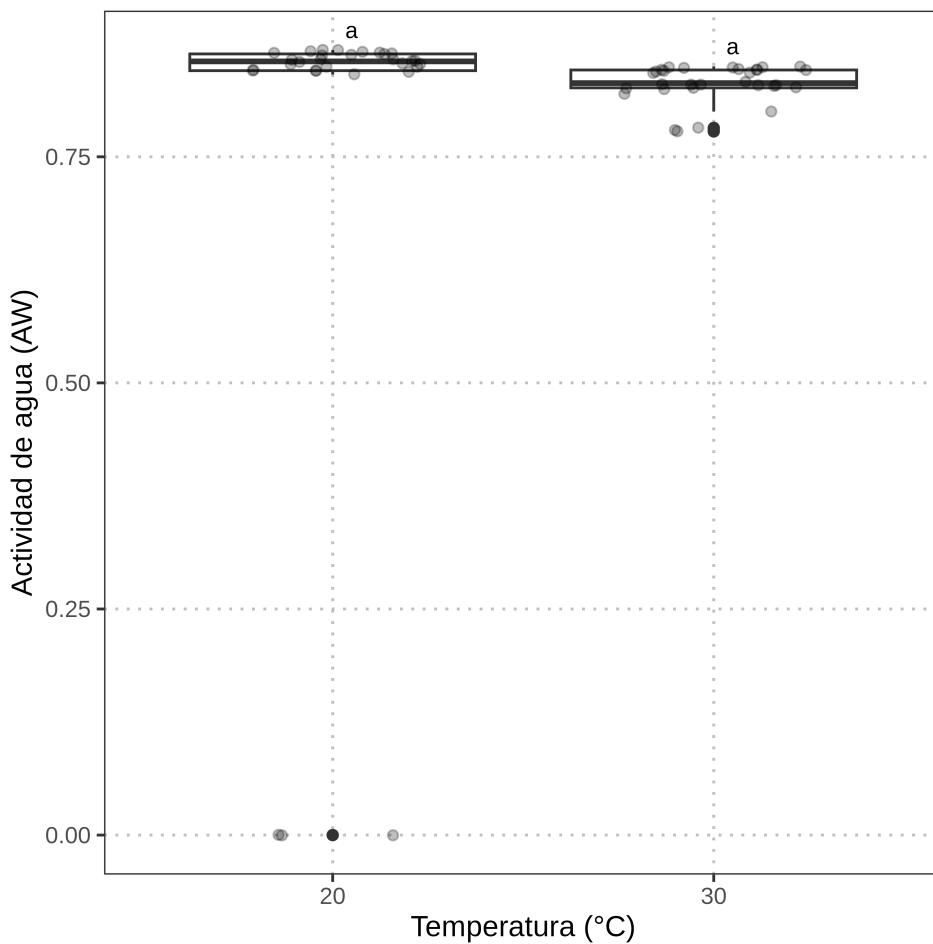


Figura 2.8: Valores de actividad de agua (AW) obtenidos en diversas condiciones de estudio. Los diagramas de caja y bigotes, marcados con distintas letras minúsculas, señalan diferencias significativas entre los conjuntos de datos a diversas temperaturas de almacenamiento ($p<0.05$).

un impacto extremadamente significativo ($p=2 \times 10^{-16} < 0.05$ en todos los casos). Los resultados pueden ser observados de manera gráfica en la Figura 2.8 y en la Figura 2.9. La Temperatura, con un valor F de 1248, y el Tiempo, con un valor F de 2548, exhiben efectos significativos e independientes en la variación de la AW. La interacción entre ambos factores (AB), también resulta altamente significativa (valor $F=2521$), indicando que la combinación de Temperatura y Tiempo afecta la AW de manera conjunta. En conjunto, estos resultados sugieren que tanto la Temperatura como el Tiempo, y su interacción, son factores críticos en la variación de la actividad del agua del bisquet, destacando la importancia de considerar estas variables en el almacenamiento y manipulación del producto.

2.3.2. Análisis cinético

Los resultados del análisis cinético, empleando los modelos de orden 0, 1 y 2 para caracterizar las variaciones en la AW, la pérdida de peso y el contenido de humedad del bisquet a distintas temperaturas de almacenamiento (20 y 30°C), se presentan en las Tablas 2.1, 2.2 y 2.3, respectivamente.

La Tabla 2.1 presenta los resultados del ajuste de los datos experimentales al modelo de reacción de orden cero para bisquots a diferentes temperaturas (20°C y 30°C) y atributos (contenido de humedad, AW y pérdida de peso). Para el contenido de humedad a 20°C, el parámetro Q_0 (13.1922 g de H₂O/100 g de muestra) representa la concentración inicial, mientras que la velocidad de la reacción (k) (0.1835 1/día)

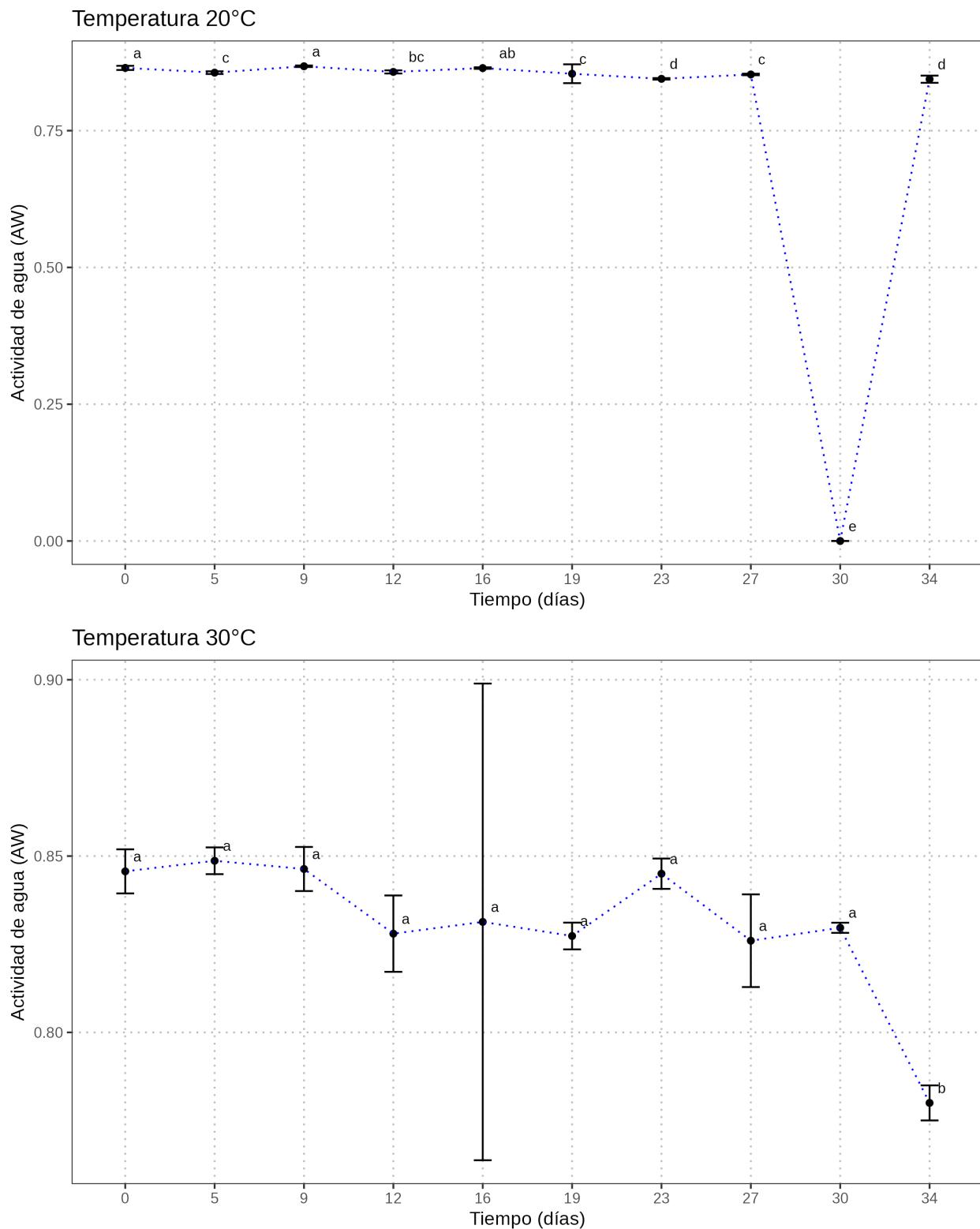


Figura 2.9: Gráfico de dispersión de la evolución en el tiempo de la AW del bisquet en las diferentes condiciones de estudio (CE). La letras minúsculas indican diferencias en los tiempos de almacenamiento.

indica la tasa de cambio, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.1835 que sugiere un bajo ajuste al modelo de orden cero. En contraste, la AW mostró un R^2 más elevado, de 0.5746, y la AW mostró un R^2 de 0.0958, indicando que el modelo de orden cero no se ajusta adecuadamente a estos atributos de calidad. A 30°C, tanto el contenido de humedad como la AW muestran ajustes más bajos con un R^2 de 0.1021 y 0.4452 respectivamente, mientras que la variación en el peso tiene un ajuste mínimo con un R^2 de 0.0096. Estos resultados sugieren que el modelo de orden cero puede no ser el más apropiado para describir la cinética de cambio en estos atributos, especialmente para la variación en el contenido de humedad y de AW. Podría ser necesario considerar modelos cinéticos más complejos para una descripción más precisa del comportamiento cinético de los bisquets durante el almacenamiento.

La Tabla 2.2 presenta los resultados del ajuste de los datos experimentales del modelo de reacción de primer orden para bisquets a diferentes temperaturas (20°C y 30°C) y atributos (contenido de humedad, AW y pérdida de peso). En este ajuste se destaca que el logaritmo natural de la concentración inicial Q_0 y la velocidad de la reacción k son los parámetros clave. A 20°C, la variación del contenido de humedad, de la AW y la pérdida de peso muestran un bajo ajuste con un R^2 de 0.1924, 0.5758 y 0.1217, respectivamente. A 30°C, el contenido de humedad y la AW presentan un R^2 de 0.1686 y 0.4414 respectivamente, indicando un ajuste bajo, pero el peso tiene un ajuste mínimo con R^2 de 0.0042. En general, la AW fue la que tuvo un mayor ajuste con este modelo a las condiciones de estudio.

La Tabla 2.3 muestra los resultados del ajuste de los datos experimentales del modelo de reacción de segundo orden para bisquets a diferentes temperaturas (20°C y 30°C) y atributos (contenido de humedad, AW y pérdida de peso). El modelo de reacción de segundo orden se caracteriza por la inversa de la concentración inicial $1/Q_0$ y la velocidad de la reacción k . Por lo tanto, a 20°C, el contenido de humedad y la AW muestran ajustes modestos (R^2 de 0.1939 y 0.5769), mientras que el peso tiene un ajuste más bajo (R^2 de 0.1234). A 30°C, el contenido de humedad y la AW tienen un R^2 de 0.3111 y 0.4375 respectivamente, indicando un mayor ajuste, pero el peso muestra un ajuste mínimo con un R^2 de 0.0038. En general, el modelo de reacción de segundo orden parece describir mejor las variaciones en la humedad y en AW en comparación con el peso.

Los resultados sugieren que la actividad de agua (AW) puede ser el atributo crítico de calidad para estimar la vida útil de los bisquets, ya que mostró el mayor ajuste lineal con los modelos cinéticos estudiados. Específicamente, el modelo de reacción de segundo orden a 20°C exhibió el mayor ajuste con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.5769. Esto implica que la AW tiene una relación más estrecha y predecible con el tiempo, según el modelo de segundo orden a 20°C, en comparación con otros atributos como el contenido de humedad y pérdida de peso. Este hallazgo destaca la importancia de la AW como un indicador clave para evaluar y predecir la vida útil de los bisquets, proporcionando información valiosa para la gestión de la calidad y la toma de decisiones en la producción y almacenamiento de este producto específico.

La pérdida de calidad, la degradación de los valores nutricionales y en un panorama general la degradación de un alimento, son consecuencia de factores internos, externos y las interacciones de estos en una matriz alimentaria. La posibilidad de identificar estos factores y entender como afectan a cada alimento supone una ventaja para extender su VU, con relación a este aspecto, el uso de modelos matemáticos permite evaluar una mayor cantidad de escenarios dadas las variables evaluadas, permitiendo la predicción del tiempo en el que su calidad y seguridad siguen en parámetros aceptables. Los modelos matemáticos y cinéticos entonces, permitirán describir los conjuntos de interacciones: los cambios en los atributos de calidad y sus marcadores en función del tiempo, y el efecto de las condiciones ambientales en estos cambios (Corradini, 2018) De esta manera se considera que la comprensión de los modelos cinéticos de orden cero, primer y segundo orden es crucial para predecir la vida útil de los productos alimenticios. Estos modelos se utilizan ampliamente para comprender la cinética de degradación de diversos componentes de los alimentos y estimar la tasa de deterioro de la calidad a lo largo del tiempo. Por ejemplo, los estudios con modelado cinético se han empleado previamente para predecir la vida útil de las frituras de coco seco en función de los cambios de calidad, lo que demuestra la aplicación práctica de los modelos cinéticos en la conservación de alimentos (Van Boekel, 2008). De manera similar, utilizaron modelos cinéticos para predecir la vida útil del chucrut de Sichuan, categorizándolo en diferentes períodos aceptables según el tiempo de almacenamiento (Choosuk et al., 2022). Además, el estudio se centró en desarrollar un modelo de predicción de la vida útil de la mezcla instantánea de Kheer en polvo, destacando la importancia del modelado cinético para comprender la degradación de los productos alimenticios a lo largo del tiempo (Du et al., 2022). Estos modelos cinéticos son esenciales para comprender el impacto de diversos factores, como la temperatura, el pH y las condiciones de almacenamiento,

en la calidad y vida útil de los alimentos. Por ejemplo, utilizaron modelos matemáticos para estudiar los efectos del pH, la temperatura y el cloruro de sodio en el crecimiento de *Bacillus stearothermophilus* en zanahorias saladas, lo que demuestra la aplicabilidad del modelado cinético en la evaluación de la seguridad alimentaria y la vida útil (Jha & Patel, 2014). Además, en un estudio se analizaron la cinética de reacción de oxidación de aceites comestibles a temperatura ambiente, enfatizando la importancia del modelado cinético para comprender los procesos de degradación que afectan la vida útil de los alimentos (Ng & Schaffner, 1997).

En relación a los estudios mencionados anteriormente y el presente, se ha considerado que para obtener resultados con un mínimo de confiabilidad, se requiere de un estudio en el que sea utilizadas al menos 3 temperaturas para poder estimar otros parámetros cinéticos y termodinámicos, tales como:

- Energía de activación (E_A)
- Factor preexponencial (A)
- Factor Q_{10}
- Entalpía de activación (ΔH^\ddagger)
- Entropía de activación (ΔS^\ddagger)

Estos parámetros son importantes en un estudio de vida útil de un alimento porque están relacionados con la cinética de las reacciones químicas y bioquímicas que ocurren durante el almacenamiento y procesamiento de los alimentos. La vida útil de un alimento está influenciada por la velocidad a la que ocurren estas reacciones, y los parámetros que mencionas están directamente relacionados con esa velocidad.

1. **Energía de activación (E_A)**: Este parámetro indica la energía mínima necesaria para que una reacción química o bioquímica ocurra. Cuanto mayor sea la energía de activación, más lentas serán las reacciones. Comprender este valor es clave para entender cómo la temperatura afecta la velocidad de las reacciones, ya que el aumento de la temperatura puede proporcionar la energía adicional necesaria para superar la barrera de activación y acelerar las reacciones. Como tema de estudio se ha propuesto el aprendizaje de máquinas, basado en inteligencia artificial y modelos de predicción, como innovación en el campo de estudio de las reacciones químicas, siendo que la energía de activación se da considerando la diferencia de energía entre los reactivos y estado de transición de una reacción. La posibilidad de determinar la velocidad dadas ciertas condiciones de estudio permite tener un mejor control de condiciones que puedan retrasar o acelerar ciertos procesos (Lewis-Atwell et al., 2022).
2. **Factor preexponencial (A)**: Este factor está relacionado con la frecuencia de colisiones efectivas entre las moléculas reactantes. Un valor alto de A indica una mayor probabilidad de que las moléculas colisionen de una manera que conduzca a la reacción. En otras palabras, el factor A está asociado con la frecuencia de las colisiones entre las moléculas, y su conocimiento es esencial para comprender la tasa de reacción en función de la temperatura. El factor pre exponencial junto con la energía de activación se suelen considerar en un conjunto para determinar la velocidad de las reacciones (He et al., 2018).
3. **Factor Q_{10}** : Este factor cuantifica el cambio en la velocidad de una reacción debido a un aumento de 10 grados Celsius en la temperatura. Proporciona información sobre cómo la temperatura afecta la velocidad de la reacción. Un valor de Q_{10} de 2 implica que la velocidad de la reacción se duplica por cada aumento de 10 grados Celsius en la temperatura. Es un parámetro crítico en la predicción de cómo la temperatura de almacenamiento afectará la vida útil de un alimento. Se ha reportado que el factor Q_{10} es confiable para predecir el efecto de la variación de temperaturas durante el estudio de VU de un alimento, en conjunto con un factor de aceleración de temperatura es posible extrapolar los resultados para bajas temperaturas (Rondón et al., 2004).
4. **Entalpía de activación (ΔH^\ddagger) y entropía de activación (ΔS^\ddagger)**: Estos parámetros están relacionados con la termodinámica de la reacción. ΔH^\ddagger es la energía necesaria para superar la barrera de activación, mientras que ΔS^\ddagger está relacionada con el cambio en la aleatoriedad de las moléculas durante la reacción. Comprender estos parámetros es esencial para evaluar cómo la termodinámica afecta la velocidad de la reacción y, por lo tanto, la vida útil del alimento. Se ha estudiado el papel de la entalpía y entropía en las interacciones de almidones con agua, ofreciendo una perspectiva diferente en el estudio de las interacciones de los componentes de los alimentos, mientras que los cambios de entalpía ofrecen mediciones de la variación de energía durante la sorción de las moléculas de agua con el almidón, la entropía puede estar asociada con las fuerzas de unión o repulsión en el sistema y está asociada con las disposiciones espaciales en la interfaz agua-almidón (McMinn et al., 2005).

Tabla 2.1: Ajuste de los datos experimentales al modelo de reacción de orden cero para bisquets.

T (°C)	Atributo (Q)	Q_0	k	R^2
20	Humedad	13.1922 ± 3.6453	0.1872 ± 0.1638	0.1835 ± 0.1604
20	Aw	0.8657 ± 0.001	-0.0006 ± 0.0001	0.5746 ± 0.0838
20	Peso	70.4385 ± 11.008	-0.1168 ± 0.6485	0.0958 ± 0.0329
30	Humedad	13.6548 ± 2.9638	0.0893 ± 0.1165	0.1021 ± 0.1047
30	Aw	0.8525 ± 0.0038	-0.0012 ± 0	0.4452 ± 0.0294
30	Peso	71.4215 ± 6.7462	-0.0575 ± 0.1197	0.0096 ± 0.0158

Tabla 2.2: Ajuste de los datos experimentales al modelo de reacción de primer orden para bisquets.

T (°C)	Atributo (Q)	$\ln Q_0$	k	R^2
20	Humedad	2.1528 ± 0.6051	0.0309 ± 0.0267	0.1924 ± 0.1668
20	Aw	-0.1442 ± 0.0012	-0.0007 ± 0.0001	0.5758 ± 0.0839
20	Peso	4.3894 ± 0.4357	-0.0165 ± 0.0362	0.1217 ± 0.0949
30	Humedad	2.1802 ± 0.5324	0.0239 ± 0.0223	0.1686 ± 0.1005
30	Aw	-0.1592 ± 0.0046	-0.0015 ± 0	0.4414 ± 0.0288
30	Peso	4.2389 ± 0.0958	-0.0002 ± 0.0014	0.0042 ± 0.0037

Tabla 2.3: Ajuste de los datos experimentales al modelo de reacción de segundo orden para bisquets.

T (°C)	Atributo (Q)	$1/Q_0$	k	R^2
20	Humedad	0.0432 ± 0.0129	0.0006 ± 0.0006	0.1939 ± 0.1699
NaN	Aw	1.1551 ± 0.0014	0.0008 ± 0.6322	0.5769 ± 0.0839
NaN	Peso	0.0165 ± 0.0002	-0.0001 ± 0.0001	0.1234 ± 0.1132
30	Humedad	0.0436 ± 0.0165	0.0008 ± 0.0006	0.3111 ± 0.2316
NaN	Aw	1.1721 ± 0.0056	0.0019 ± 0	0.4375 ± 0.0281
NaN	Peso	0.015 ± 0.0015	-9.93×10^{-6}	0.0038 ± 0.004

2.4. Conclusiones y perspectivas

Se concluyó que parámetros críticos en la determinación de la VU del bisquet fueron desempeñados tanto por la temperatura como por el tiempo de almacenamiento, afectando significativamente su contenido de humedad, la AW y pérdida de peso. Los hallazgos principales indicaron que la AW fue considerada como el atributo crítico de calidad para estimar la VU de los bisquets, con un mejor ajuste proporcionado por los modelos de reacción de segundo orden para describir las variaciones en la humedad y la AW. La importancia de controlar estas variables durante el almacenamiento fue subrayada para preservar la calidad del bisquet.

Las perspectivas de esta investigación se centran en profundizar en el entendimiento de cómo la temperatura y el tiempo de almacenamiento influyen en los atributos fisicoquímicos de calidad del bisquet, con un enfoque particular en la AW como un atributo crítico de calidad de la VU. La AW mostró el mayor ajuste lineal con los modelos cinéticos estudiados, especialmente a 20°C, se sugiere que futuras investigaciones podrían explorar la aplicación de estos hallazgos en la optimización de las condiciones de almacenamiento para prolongar la VU del bisquet sin comprometer su calidad. Además, se recomienda investigar la aplicación de tecnologías de envasado innovadoras que puedan mejorar la estabilidad de la AW y otros atributos críticos de calidad durante el almacenamiento. Esto podría incluir el estudio de atmósferas modificadas o el uso de materiales de envasado con propiedades específicas de barrera contra la humedad. Finalmente, sería valioso ampliar este estudio a otros productos de panadería similares para evaluar la generalidad de los modelos cinéticos utilizados y su aplicabilidad en la industria alimentaria más amplia.

Referencias

Al-Shammari, B. B., Al-Ali, R. M., & Al-Sahi, A. A. (2022). The Influence of Fenugreek Seeds Gum on Quality of Pan Bread During Storage. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1060(1), 012062. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1060/1/012062>

Choosuk, N., Meesuk, P., Renumarn, P., Phungamngoen, C., & Jakkranuhwat, N. (2022). Kinetic Modeling of Quality Changes and Shelf Life Prediction of Dried Coconut Chips. *Processes*, 10(7), 1392. <https://doi.org/10.3390/pr10071392>

Colwell, K. H., Axford, D. W. E., Chamberlain, N., & Elton, G. A. H. (1969). Effect of Storage Temperature on the Ageing of Concentrated Wheat Starch Gels. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 20(9), 550-555. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740200909>

Corradini, M. G. (2018). Shelf Life of Food Products: From Open Labeling to Real-Time Measurements. *Annual Review of Food Science and Technology*, 9(1), 251-269. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-030117-012433>

Du, J., Zhang, M., Zhang, L., Law, C. L., & Liu, K. (2022). Shelf-Life Prediction and Critical Value of Quality Index of Sichuan Sauerkraut Based on Kinetic Model and Principal Component Analysis. *Foods*, 11(12), 1762. <https://doi.org/10.3390/foods11121762>

Filipčev, B., Bodroža-Solarov, M., Pestorić, M., & Šimurina, O. (2017). Breadmaking Performance and Textural Changes during Storage of Composite Breads Made from Spelt Wheat and Different Forms of Amaranth Grain. *Food Science and Technology International*, 23(3), 235-244. <https://doi.org/10.1177/1082013216683133>

Ghalambor, P., Asadi, G., Mohammadi Nafchi, A., & Seyedin Ardebili, S. M. (2023). The Effects of Dually Modified (Hydrolyzed-Hydroxypropylated) Sago Starch on the Quality Characteristics of Frozen Dough and Bread. *Starch - Stärke*, 75(3-4), 2200183. <https://doi.org/10.1002/star.202200183>

He, Z.-D., Chen, Y.-X., Santos, E., & Schmickler, W. (2018). The Pre-exponential Factor in Electrochemistry. *Angewandte Chemie International Edition*, 57(27), 7948-7956. <https://doi.org/10.1002/anie.201800130>

Jha, A., & Patel, A. A. (2014). Kinetics of HMF Formation during Storage of Instant Kheer Mix Powder and Development of a Shelf-Life Prediction Model: SHELF LIFE OF KHEER MIX POWDER. *Journal of Food Processing and Preservation*, 38(1), 125-135. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2012.00754.x>

Lagrain, B., Wilderjans, E., Glorieux, C., & Delcour, J. A. (2012). Importance of Gluten and Starch for Structural and Textural Properties of Crumb from Fresh and Stored Bread. *Food Biophysics*, 7(2), 173-181. <https://doi.org/10.1007/s11483-012-9255-2>

Lewis-Atwell, T., Townsend, P. A., & Grayson, M. N. (2022). Machine Learning Activation Energies of Chemical Reactions. *WIREs Computational Molecular Science*, 12(4), e1593. <https://doi.org/10.1002/wcms.1593>

McMinn, W. A. M., Al-Muhtaseb, A. H., & Magee, T. R. A. (2005). Enthalpy-Entropy Compensation in Sorption Phenomena of Starch Materials. *Food Research International*, 38(5), 505-510. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2004.11.004>

Mihhalevski, A., Heinmaa, I., Traksmaa, R., Pehk, T., Mere, A., & Paalme, T. (2012). Structural Changes of Starch during Baking and Staling of Rye Bread. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(34), 8492-8500. <https://doi.org/10.1021/jf3021877>

Ng, T. M., & Schaffner, D. W. (1997). Mathematical Models for the Effects of pH, Temperature, and Sodium Chloride on the Growth of *Bacillus Stearothermophilus* in Salty Carrots. *Applied and Environmental Microbiology*, 63(4), 1237-1243. <https://doi.org/10.1128/aem.63.4.1237-1243.1997>

Osborne, B. G. (1998). NIR Measurements of the Development of Crystallinity in Stored Bread Crumb. *Analisis*, 26(4), 55-57. <https://doi.org/10.1051/analisis:199826040055>

Osella, C. A., Sánchez, H. D., Carrara, C. R., De La Torre, M. A., & Pilar Buera, M. (2005). Water Redistribution and Structural Changes of Starch During Storage of a Gluten-free Bread. *Starch - Stärke*, 57(5), 208-216. <https://doi.org/10.1002/star.200400330>

Rohleder, A. R., Scherf, K. A., Schieberle, P., & Koehler, P. (2019). Quantitative Analyses of Key Odorants and Their Precursors Reveal Differences in the Aroma of Gluten-Free Rice Bread and Wheat Bread.

Journal of Agricultural and Food Chemistry, 67(40), 11179-11186. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b04800>

Rondón, E., Pacheco Delahaye, E., & Ortega, F. (2004). Estimación de la vida útil de un análogo comercial de mayonesa utilizando el factor de aceleración Q10. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 21(1), 68-83.

Tsai, C.-L., Sugiyama, J., Shibata, M., Kokawa, M., Fujita, K., Tsuta, M., Nabetani, H., & Araki, T. (2012). Changes in the Texture and Viscoelastic Properties of Bread Containing Rice Porridge during Storage. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 76(2), 331-335. <https://doi.org/10.1271/bbb.110722>

Universidad Anáhuac Querétaro. (2020). *Bisquets*.

Van Boekel, M. A. J. S. (2008). Kinetic Modeling of Food Quality: A Critical Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 7(1), 144-158. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2007.00036.x>

Wilson, R. H., Goodfellow, B. J., Belton, P. S., Osborne, B. G., Oliver, G., & Russell, P. L. (1991). Comparison of Fourier Transform Mid Infrared Spectroscopy and near Infrared Reflectance Spectroscopy with Differential Scanning Calorimetry for the Study of the Staling of Bread. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 54(3), 471-483. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740540318>

Zhou, J., Ke, Y., Barba, F. J., Xiao, S., Hu, X., Qin, X., Ding, W., Lyu, Q., Wang, X., & Liu, G. (2019). The Addition of α -Cyclodextrin and γ -Cyclodextrin Affect Quality of Dough and Prebaked Bread During Frozen Storage. *Foods*, 8(5), 174. <https://doi.org/10.3390/foods8050174>

CAPÍTULO 3

Estudio de vida útil de la rebanada

Resumen

EL ESTUDIO DE ESTE CAPÍTULO 3 estuvo centrado en la vida útil de la rebanada de pan, un tipo de pan que puede presentarse de forma cuadrada, de masa suave y cortada en porciones individuales para su venta. El objetivo principal del capítulo fue analizar cómo la temperatura y el tiempo de almacenamiento afectaron la variabilidad de la actividad de agua, el contenido de humedad y el peso de las rebanadas, atributos fisicoquímicos de calidad esenciales para determinar la calidad y la vida útil del producto. Para alcanzar este objetivo, se emplearon pruebas de vida útil aceleradas, análisis estadístico y análisis cinético, utilizando muestras de pan proporcionadas por una empresa ubicada en Pachuca de Soto, Hidalgo, México. Los resultados obtenidos a través de un análisis de varianza de dos vías revelaron efectos significativos tanto de la temperatura como del tiempo de almacenamiento en la variabilidad de los atributos fisicoquímicos de calidad mencionados, con diferencias significativas en los conjuntos de datos a las temperaturas de almacenamiento estudiadas ($p<0.05$), de 20 y 30°C. Estos hallazgos sugieren que tanto la temperatura como el tiempo de almacenamiento juegan un papel crítico en la determinación de la vida útil de la rebanada, afectando directamente su contenido de humedad, su peso y su actividad de agua, siendo el cambio en el contenido de humedad el atributo crítico de calidad para determinar la vida útil. En conclusión, el estudio demostró que el control adecuado de la temperatura y el tiempo de almacenamiento es determinante para maximizar la vida útil de las rebanadas, alineándose con el objetivo de discernir cuál de estos atributos fisicoquímicos tiene una influencia predominante en la duración efectiva del producto, y ofreciendo perspectivas para futuras investigaciones que permitan determinar el punto crítico de calidad para la estimación de la vida útil de este tipo de pan.

Lista de acrónimos

ANOVA	análisis de varianza	20
AW	actividad de agua	15
VU	vida útil	2

3.1. Introducción

La rebanada se refiere a un pan grande tipo panqué, que se corta para su venta en porciones individuales, es de masa suave, esponjada, generalmente horneado en moldes rectangulares (Larousse, 2021). El procedimiento tradicional para la elaboración de esta variedad de pan es la siguiente (Gutiérrez, 2020):

1. En leche tibia se disuelve la levadura seca y se deja reposar 5 minutos, esto con el objetivo de activarla.
2. Se mezclan los ingredientes secos (harina de trigo, azúcar, sal y canela).
3. Se incorporan los huevos a la mezcla hasta lograr una masa homogénea.
4. Se agrega la levadura activada disuelta en leche, posteriormente la mantequilla y se continua homogeneizando.
5. Se deja reposar la masa durante una hora en un lugar cálido.
6. Se estira la masa y posteriormente se le da forma de barra de pan. Esta masa se hornea a 190°C por 50 minutos.
7. Una vez se ha dejado enfriar se cortan las porciones que se deseen, tal como se muestra en la figura 3.1.

En la Figura 3.2 se muestra el diagrama de flujo considerado para la elaboración de las rebanadas.

El pan es un producto perecedero, suele perder rápidamente su frescura. Todo tipo de pan tiene sus características únicas que no solo le confieren sabores y apariencias únicas sino que pueden determinar como evolucionan sus fenómenos de deterioro. El fenómeno de deterioro más común en productos de panificación es el envejecimiento o *staling* por su término en inglés. El envejecimiento del pan se refiere a una serie de cambios fisicoquímicos que afectan al pan durante su almacenamiento y que contribuyen al deterioro del alimento, suele manifestarse en cambios sensoriales y de textura (Gray & Bemiller, 2003). La retrogradación de la amilopectina es común en el fenómeno de envejecimiento del pan, esta asociado con la recristalización de almidones en el pan, este fenómeno contribuye al endurecimiento de la migra, una característica que no es deseada (Chinachoti, 2018; Gray & Bemiller, 2003). Otro fenómeno común en el envejecimiento es la migración de agua, se relaciona con aspectos como la deshidratación, el equilibrio de humedad entre la migra y la corteza y la redistribución de la humedad entre los componentes del pan. Este fenómeno se suelen manifestar con cambios en la textura, como el endurecimiento de la migra y en emblandecimiento de la corteza. Para controlar este fenómeno se prefiere alentar el proceso de deshidratación en vez de aumentar el contenido de humedad desde el principio (Baik & Chinachoti, 2000; Gray & Bemiller, 2003).

Otros factores como la temperatura y el tiempo se relacionan directamente con la velocidad en la que se desarrollan los fenómenos de envejecimiento, por ejemplo, se ha estudiado el efecto de las bajas temperaturas en pan, mientras que temperaturas de retrogradación aceleran los fenómenos de envejecimiento, se ha demostrado que temperaturas de congelamiento podrían contribuir a almacenarlo por períodos de tiempo más prolongados si así se desea. Aún a esas temperaturas existen cambios que se deben a modificaciones en los valores de factores como la AW, humedad y la pérdida de peso, el estudio de estos factores y su evolución en el tiempo podrían ser una buena opción para entender el fenómeno de envejecimiento en los distintos tipos de pan (Ribotta & Le Bail, 2007).

El fenómeno de envejecimiento se puede retrasar con aditivos anti-envejecimiento en el pan; no obstante, es necesario tomar en cuenta las tendencias actuales del mercado y estas apuntan a un producto que cada vez contenga menos aditivos. Herramientas como los estudios de vida útil nos ayudan a predecir los cambios de un alimento durante su almacenamiento, a su vez, los datos que se obtienen de estos estudios ayudan a crear métodos para retrasar los fenómenos de degradación. El uso de modelos estadísticos de predicción junto a pruebas de vida útil aceleradas. Ofrece resultados relativamente rápidos que benefician a la industria por sus bajos costos; ofrece al investigador un respaldo estadístico en sus resultados. Ya que los alimentos son una matriz alimentaria, implica que dentro de este se lleven a cabo muchas reacciones que suelen estar relacionadas entre ellas, el modelado cinético permite comprender el comportamiento ante distintas condiciones de almacenamiento (Van Boekel, 2008).

Considerando los conocimientos anteriores, se determina que el objetivo de este capítulo fue en analizar el impacto de la temperatura y el tiempo de almacenamiento en la AW, contenido de humedad y pérdida de peso, aspectos fisicoquímicos que inciden en la calidad de muestras de rebanadas. Este análisis se llevó a cabo mediante pruebas de vida útil aceleradas, con el objetivo de discernir cuál de estos atributos fisicoquímicos tiene una influencia predominante en la duración efectiva del producto.



Figura 3.1: Rebanada tradicional.

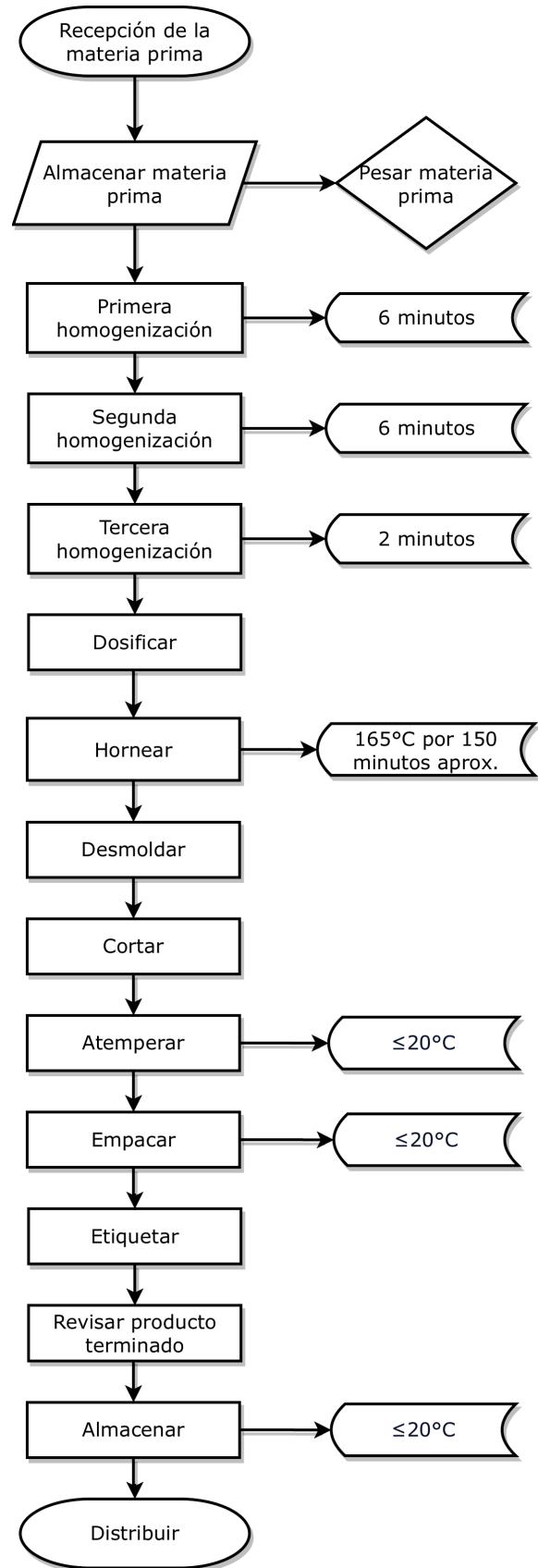


Figura 3.2: Diagrama de flujo para la elaboración de rebanadas.



Figura 3.3: Metodología general para el estudio de vida útil de la rebanada.

3.2. Materiales y métodos

3.3. Muestras

Se utilizaron rebanadas de pan proporcionadas por una empresa productora de pan ubicada en Pachuca de Soto, Hidalgo, México.

3.3.1. Estudio de vida útil, análisis estadístico y cinético

La investigación sobre vida útil (VU) de las rebanadas se llevó a cabo según lo detallado en la Sección 2.2.3. Asimismo, el análisis estadístico se realizó conforme a lo expuesto en la Sección 2.2.4, mientras que el análisis cinético se llevó a cabo de acuerdo con la descripción en la Sección 2.2.5. Todas estas secciones están incluidas en el **Capítulo 2**. Una serie de imágenes con las diferentes etapas de este estudio se mostró en la Figura 3.3.

3.4. Resultados y discusión

3.4.1. Influencia del tiempo y de la temperatura de almacenamiento

El análisis de varianza (ANOVA) de dos vías realizado evaluó la influencia de dos factores, temperatura y tiempo de almacenamiento, así como su interacción, sobre la variabilidad en los atributos fisicoquímicos de calidad de la rebanada: humedad, pérdida de peso y actividad de agua (AW). Los resultados del ANOVA se muestran en el material suplementario en la Subsección A.3.

La Tabla A.5 muestra el ANOVA de dos vías, en relación con la variabilidad en el contenido de humedad del producto durante el tiempo que duró el estudio a las 2 temperaturas de 20 y 30°C. Los resultados

revelaron efectos significativos tanto para la temperatura ($p = 2.48 \times 10^{-3} < 0.05$) como para el tiempo de almacenamiento ($p = 9.63 \times 10^{-4} < 0.05$). Los resultados pueden ser observados gráficamente en las Figuras 3.4 y 3.5. Estos resultados indican que tanto la temperatura como el tiempo tienen una influencia estadísticamente significativa en la viabilidad del contenido de humedad de la rebanada. Sin embargo, la interacción entre ambos factores (AB), la temperatura y el tiempo de almacenamiento, no mostró significancia estadística ($p = 2.8 \times 10^{-1} > 0.05$), sugiriendo que el efecto combinado de ambas variables no es diferente de lo que se esperaría por sus efectos individuales.

La Tabla A.6 muestra los resultados del ANOVA para la rebanada, en relación con la variabilidad en la masa o peso del producto durante el tiempo que duró el estudio a las 2 temperaturas de 20 y 30°C. Los resultados revelaron que la temperatura de almacenamiento no tuvo un efecto significativo en la variabilidad en el peso de la rebanada ($p = 7.79 \times 10^{-2} > 0.05$). En contraste, el tiempo de almacenamiento mostró un impacto significativo ($p = 4.93 \times 10^{-10} < 0.05$) en la variabilidad del peso. Estos resultados pueden ser observados en las Figuras 3.6 y 3.7. Sin embargo, la interacción entre la temperatura y el tiempo (AB) no fue estadísticamente significativa ($p = 8.48 \times 10^{-1} > 0.05$), indicando que la combinación de ambas variables no afectó la variabilidad de manera diferencial en comparación con sus efectos individuales.

La Tabla A.7 muestra los resultados del ANOVA para la rebanada, en relación con la variabilidad en la masa o peso del producto durante el tiempo que duró el estudio a las 2 temperaturas de 20 y 30°C. Los resultados revelaron que tanto la temperatura ($p = 7.31 \times 10^{-5} < 0.05$) como el tiempo de almacenamiento ($p = 1.93 \times 10^{-5} < 0.05$) tuvieron efectos significativos en la variabilidad en la AW de la rebanada. Estos resultados pueden ser observados gráficamente en las Figuras 3.8 y 3.9. Además, la interacción entre la temperatura y el tiempo (AB) mostró un impacto altamente significativo ($p = 1.66 \times 10^{-7} < 0.05$). Estos resultados indican que tanto las variables individuales como su combinación contribuyen de manera significativa a la variabilidad en la AW.

3.4.2. Análisis cinético

Los resultados del análisis cinético, empleando los modelos de orden 0, 1 y 2 para caracterizar las variaciones en la AW, la pérdida de peso y el contenido de humedad de la rebanada a distintas temperaturas de almacenamiento (20 y 30°C), se presentan en las Tablas 3.1, 3.2 y 3.3, respectivamente.

En la Tabla 3.1, se muestran los resultados de la adaptación de los datos experimentales de contenido de humedad, de AW y la pérdida de peso de las rebanadas de pan almacenadas a temperaturas de 20 y 30°C mediante la aplicación de la ecuación de orden 0. Los parámetros ajustados de la ecuación, representados por Q_0 (valor inicial), k (constante de velocidad), y R^2 (coeficiente de determinación), ofrecen una perspectiva sobre la cinética de los cambios observados.

Al analizar los valores de R^2 para cada atributo a 20 y 30°C, se observó que la variación en el peso tiene los coeficientes de determinación más altos en ambas temperaturas. A 20°C, el R^2 para el peso fue de 0.0846, mientras que a 30°C fue de 0.0043. Aunque los valores no son muy altos, comparativamente son superiores a los R^2 asociados con el contenido de humedad y la AW en ambas temperaturas.

La k en el contexto de la ecuación de orden 0 representa la tasa de cambio del atributo de calidad con el tiempo. Para determinar qué atributo y en qué condiciones tiene la mayor constante de velocidad, se debe examinar los valores de k en la Tabla 3.1. En este caso, al analizar los valores de k , se observó que la constante de velocidad más alta se encuentra en la variación del contenido de humedad a 20°C, donde k fue de 0.2406. Esto indica que a 20°C, la humedad tuvo la mayor tasa de cambio entre los atributos mencionados. En este caso, la mayor constante de velocidad para el contenido de humedad a 20°C sugiere una rápida disminución de este atributo con el tiempo a esa temperatura.

Tabla 3.1: Ajuste de los datos experimentales al modelo de reacción de orden cero para rebanadas.

T (°C)	Atributo (Q)	$\ln Q_0$	k	R^2
20	Humedad	2.2897 ± 0.6579	0.0322 ± 0.0261	0.2047 ± 0.1649
	Aw	-0.146 ± 0.0019	0.0004 ± 0.0001	0.0078 ± 0.0036
	Peso	4.3775 ± 0.0749	0.0043 ± 0.0004	0.0735 ± 0.0142
30	Humedad	2.2216 ± 0.4603	0.0208 ± 0.0222	0.115 ± 0.0953

T (°C)	Atributo (Q)	$\ln Q_0$	k	R^2
	Aw	-0.1333 ± 0.0134	-0.0059 ± 0.0035	0.1118 ± 0.0314
	Peso	4.3873 ± 0.1002	0.0013 ± 0.0001	0.0077 ± 0.0005

La Tabla 3.2 presenta los resultados del ajuste de los datos experimentales, acerca de la variación en el contenido de humedad, en AW y la pérdida de peso de las rebanadas de pan almacenadas a 20 y 30°C, utilizando la ecuación de orden 1. Se observó que el atributo de calidad que mostró el mejor ajuste lineal fue la variación en el peso, especialmente a 30°C, donde la constante de velocidad (k) es menor en comparación con los cambios en el contenido de humedad y la AW. Esto indicó una relación más lineal y predecible entre el tiempo de almacenamiento y el cambio en el peso a 30°C. Por otro lado, el atributo de calidad que exhibió la mayor k fue la variación del contenido de humedad a 20°C, lo que sugirió una tasa más significativa de cambio en la humedad en ese rango de temperatura. Estos hallazgos pueden tener implicaciones importantes para la calidad y la estabilidad del producto almacenado, destacando la sensibilidad de ciertos atributos a las condiciones de almacenamiento específicas.

Tabla 3.2: Ajuste de los datos experimentales al modelo de reacción de primer orden para rebanadas.

T (°C)	Atributo (Q)	$\frac{1}{Q_0}$	k	R^2
20	Humedad	0.0385 ± 0.0093	0.0004 ± 0.0004	0.1004 ± 0.0765
	Aw	1.159 ± 0.0022	-0.0004 ± 0.6351	0.0087 ± 0.0036
	Peso	0.0129 ± 0.0009	-0.0001 ± 0	0.0634 ± 0.0118
30	Humedad	0.0486 ± 0.0317	0.001 ± 0.0008	0.2786 ± 0.2829
	Aw	1.129 ± 0.0274	0.0105 ± 0.0072	0.1066 ± 0.0369
	Peso	0.0128 ± 0.0013	0 ± 0	0.0113 ± 0.0002

La Tabla 3.3 exhibe los resultados derivados de ajustar los datos experimentales que reflejan la variabilidad en el contenido de humedad, la AW y la pérdida de peso de la rebanada de pan almacenada a temperaturas de 20 y 30°C, mediante la aplicación de la ecuación de segundo orden. Se observó que el atributo de calidad que mostró un mejor ajuste lineal, indicado por un valor más alto de R^2 , fue la AW a 20°C, con un R^2 de 0.0087 ± 0.0036 . Este resultado sugiere que la relación entre la AW y la temperatura a 20°C siguió un patrón más predecible mediante la ecuación de orden 2 en comparación con la variación en el contenido de humedad y del peso a esa misma temperatura.

En cuanto a la mayor constante de velocidad, se observó que la k más alta se encontró en la relación entre la humedad y la temperatura a 30°C, con un valor de 0.2786 ± 0.2829 1/día. Esto indicó que el contenido de humedad a 30°C experimentó cambios más rápidos en comparación con las otras condiciones evaluadas. Es importante destacar que la interpretación de estos resultados debe considerar la incertidumbre asociada a cada parámetro, ya que las cifras de error proporcionadas son fundamentales para evaluar la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Tabla 3.3: Ajuste de los datos experimentales al modelo de reacción de segundo orden para rebanadas.

T (°C)	Atributo (Q)	$\frac{1}{Q_0}$	k	R^2
20	Humedad	0.0385 ± 0.0093	0.0004 ± 0.0004	0.1004 ± 0.0765
	Aw	1.159 ± 0.0022	-0.0004 ± 0.6351	0.0087 ± 0.0036
	Peso	0.0129 ± 0.0009	-0.0001 ± 0	0.0634 ± 0.0118
30	Humedad	0.0486 ± 0.0317	0.001 ± 0.0008	0.2786 ± 0.2829
	Aw	1.129 ± 0.0274	0.0105 ± 0.0072	0.1066 ± 0.0369
	Peso	0.0128 ± 0.0013	$-2.32 \times 10^{-5} \pm 4.79 \times 10^{-6}$	0.0113 ± 0.0002

De acuerdo con todo lo anterior, el cambio en la humedad podría ser seleccionado como un atributo crítico de calidad para estimar la VU del producto debido a varios factores clave revelados por los análisis cinéticos.

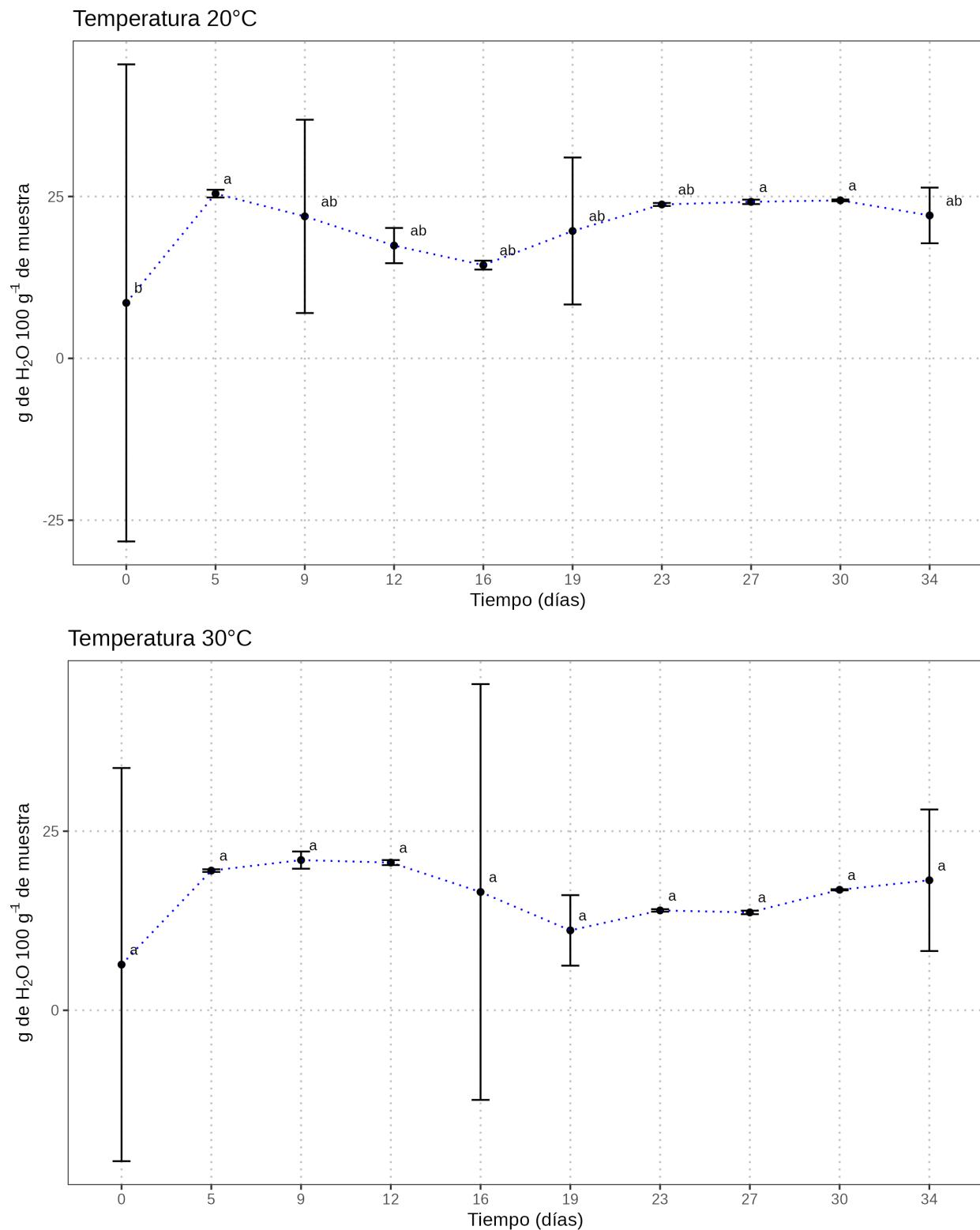


Figura 3.4: Gráfico de dispersión de la evolución en el tiempo de la humedad de la rebanada en las diferentes condiciones de estudio (CE). La letras minúsculas indican diferencias en los tiempos de almacenamiento.

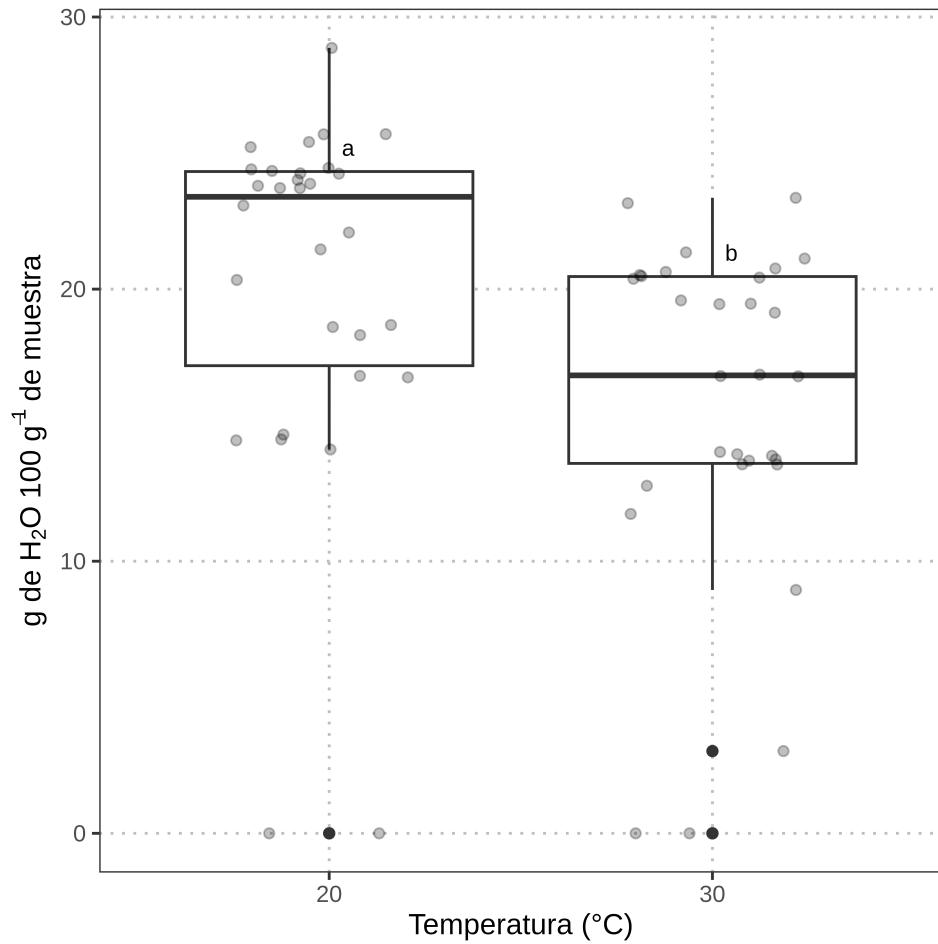


Figura 3.5: Valores de cambio en el contenido de humedad ($\text{g de H}_2\text{O } 100 \text{ g}^{-1}$ de muestra) de rebanadas obtenidos en diversas condiciones de estudio. Los diagramas de caja y bigotes, diferenciados por letras minúsculas, evidencian discrepancias significativas entre los conjuntos de datos en distintas temperaturas de almacenamiento ($p < 0.05$).

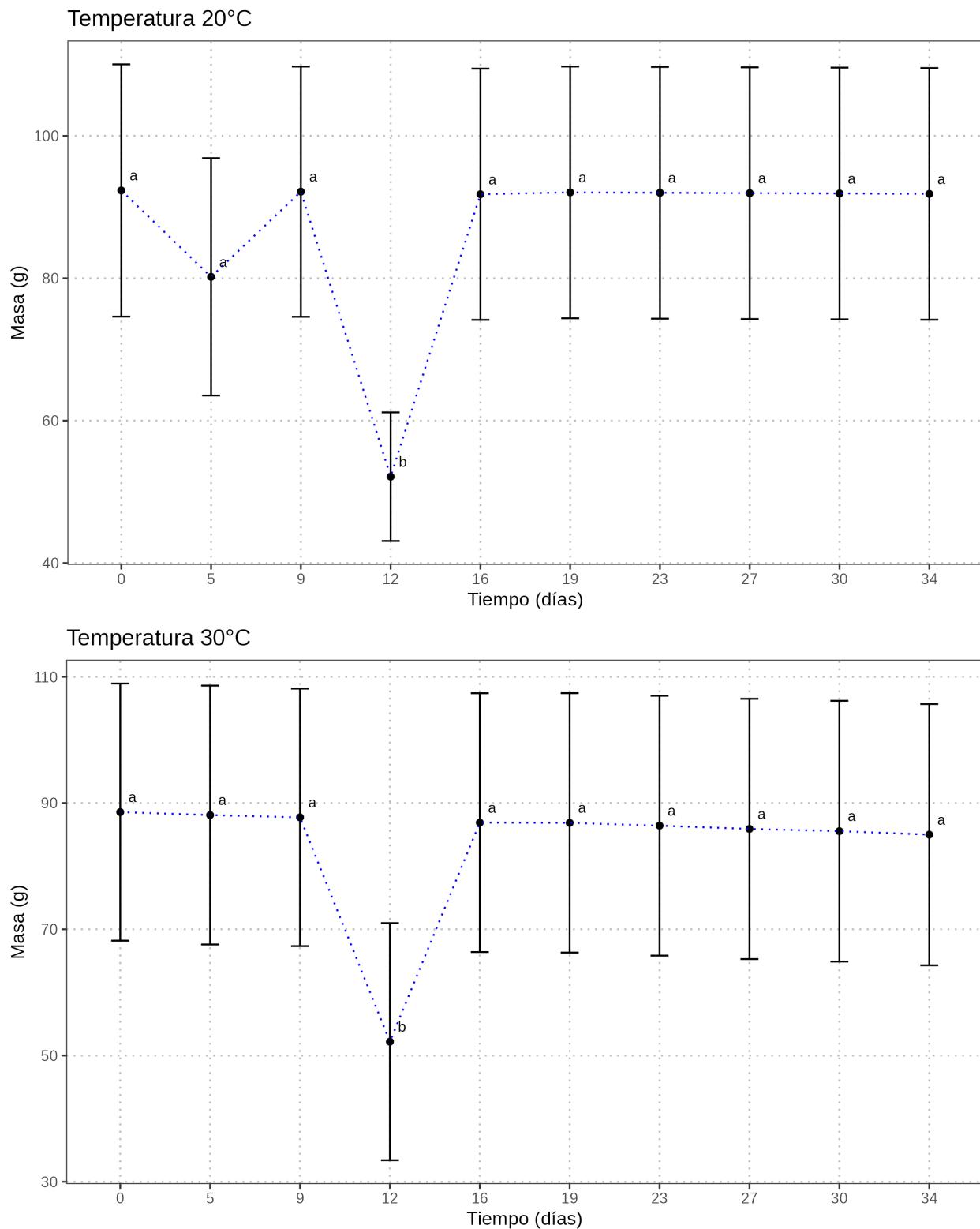


Figura 3.6: Gráfico de dispersión de la evolución en el tiempo de la pérdida de peso de la rebanada en las diferentes condiciones de estudio (CE). La letras minúsculas indican diferencias en los tiempos de almacenamiento.

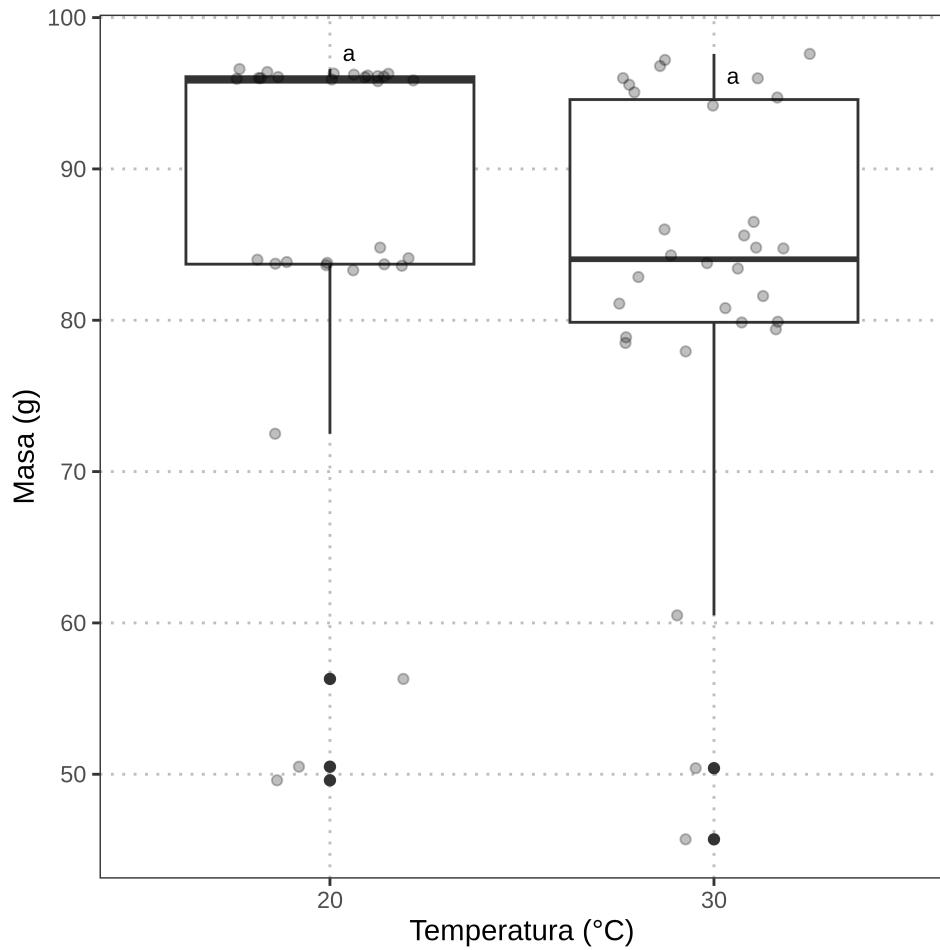


Figura 3.7: Valores de cambio en el peso (g) de rebanadas obtenidos en diversas condiciones de estudio. Los diagramas de caja y bigotes, diferenciados por letras minúsculas, evidencian discrepancias significativas entre los conjuntos de datos en distintas temperaturas de almacenamiento ($p<0.05$).

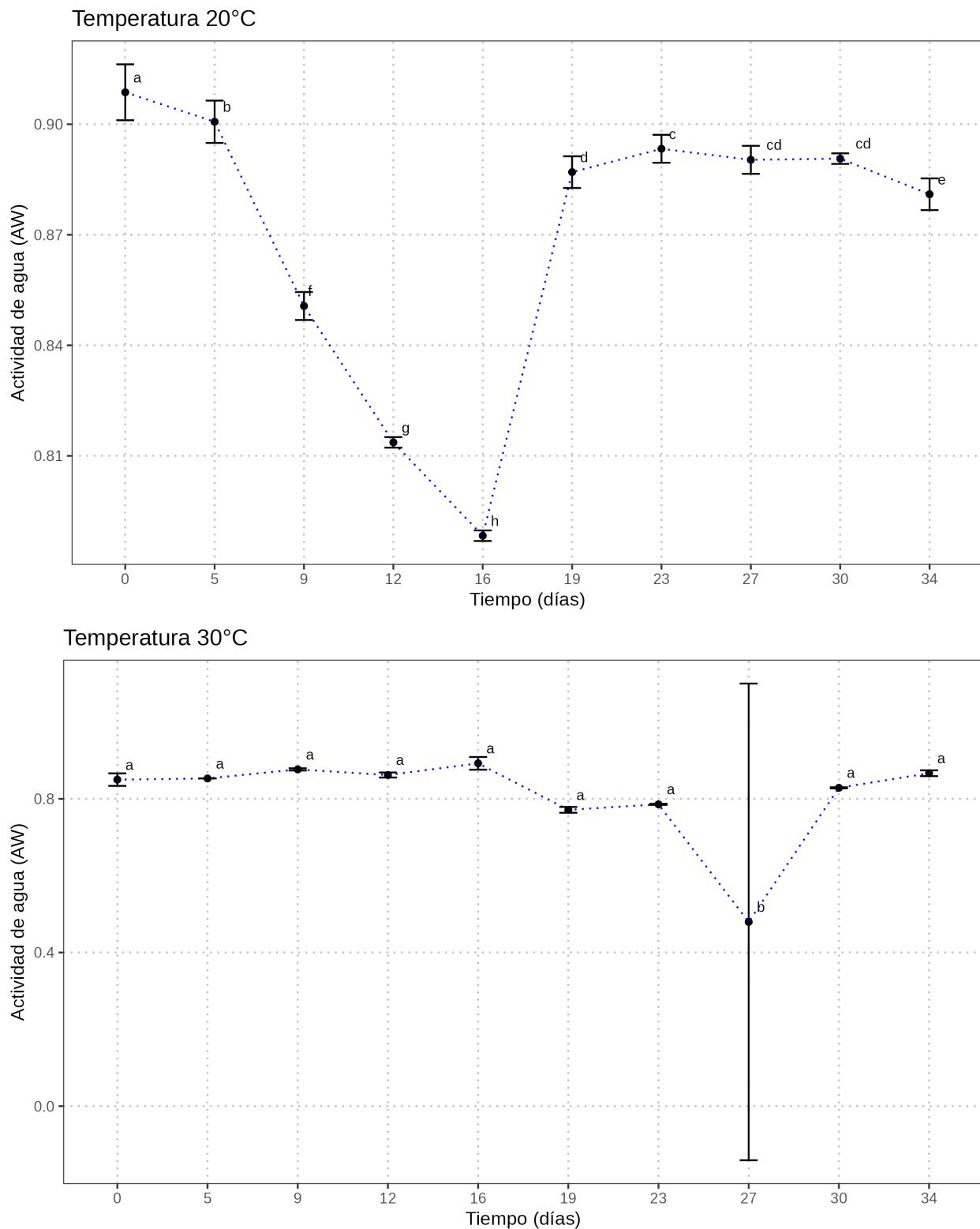


Figura 3.8: Gráfico de dispersión de la evolución en el tiempo de la AW de la rebanada en las diferentes condiciones de estudio (CE). La letras minúsculas indican diferencias en los tiempos de almacenamiento.

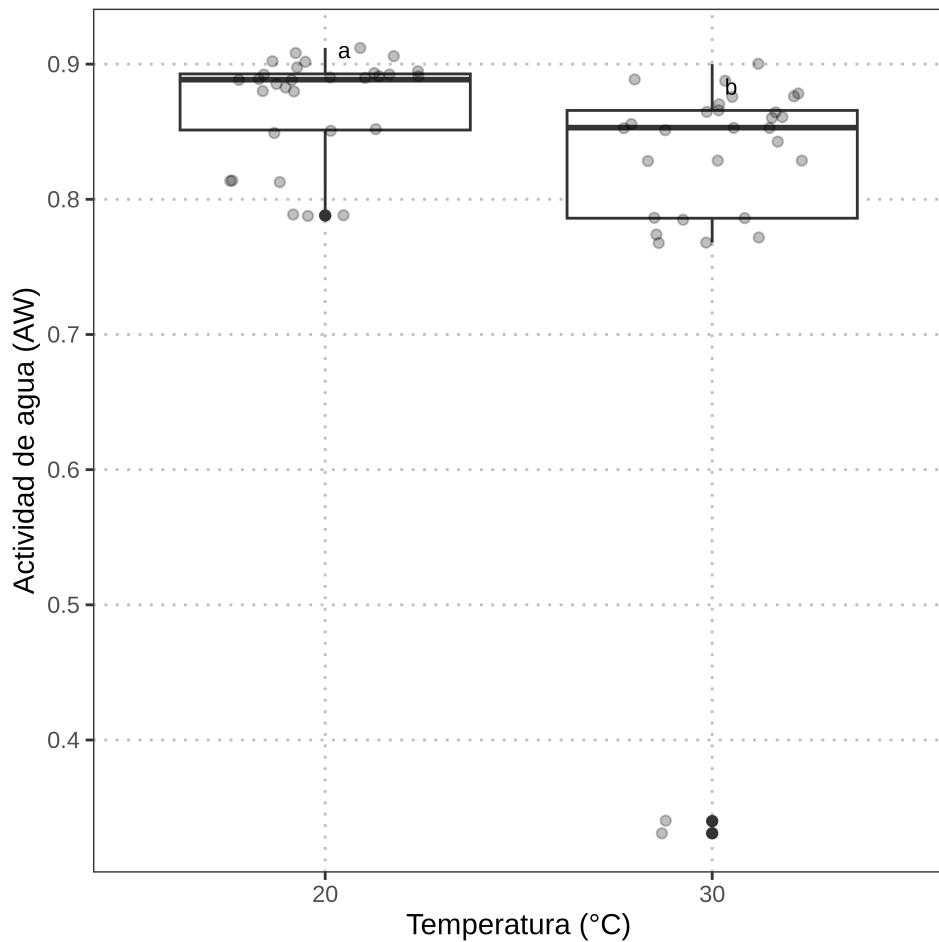


Figura 3.9: Valores de actividad de agua (AW) obtenidos en diversas condiciones de estudio. Los diagramas de caja y bigotes, marcados con distintas letras minúsculas, señalan diferencias significativas entre los conjuntos de datos a diversas temperaturas de almacenamiento ($p<0.05$).

En primer lugar, el modelo de reacción de primer orden para la humedad a 20°C exhibe el mejor ajuste lineal según el valor del coeficiente de determinación ($R^2 = 0.2047 \pm 0.1649$), lo que sugiere que la relación entre la humedad y el tiempo sigue un patrón más predecible en comparación con otros atributos y condiciones. Adicionalmente, el análisis de las constantes de velocidad (k) reveló que, particularmente a 30°C, el cambio en la humedad presentó la mayor constante de velocidad ($k = 0.2786 \pm 0.2829$), indicando cambios más rápidos a esta temperatura en comparación con otros atributos y condiciones evaluadas. Esto implica que el contenido de humedad es un parámetro dinámico y sensible que experimenta alteraciones significativas en un corto periodo a temperaturas más elevadas.

El análisis de estos parámetros proporciona información valiosa sobre la estabilidad y las variaciones en las propiedades físicas de las rebanadas bajo diferentes condiciones de temperatura, siendo esenciales para comprender y optimizar los procesos de almacenamiento. Se requieren estudios adicionales que permitan determinar el punto crítico de calidad para realizar la estimación de la vida útil de este producto.

3.5. Conclusiones y perspectivas

El presente estudio sobre la VU de las rebanadas de pan, fue enfocado en la influencia de la temperatura y el tiempo de almacenamiento en los atributos fisicoquímicos de calidad, tales como el contenido de humedad, la pérdida de peso y la AW, lo que permitió alcanzar el objetivo de comprender cómo estos factores afectan la calidad del producto. Los hallazgos principales revelaron que tanto la temperatura como el tiempo de almacenamiento tienen un impacto significativo en la calidad de las rebanadas de pan, con la AW y el contenido de humedad siendo particularmente sensibles a estas variables. De hecho, la investigación demostró que la variabilidad en el contenido de humedad fue el atributo crítico de calidad para estimar la VU de las rebanadas de pan. Estos resultados subrayaron la importancia de un control adecuado de la temperatura y el tiempo de almacenamiento para preservar la calidad del pan rebanado, proporcionando una base sólida para futuras investigaciones destinadas a optimizar los procesos de almacenamiento y extender la VU del producto.

Las perspectivas de esta investigación sugieren la necesidad de incorporar análisis sensoriales para complementar los hallazgos fisicoquímicos, con el fin de detectar el punto crítico de calidad que permita predecir la VU del producto. Aunque los resultados obtenidos proporcionan una base sólida sobre cómo la temperatura y el tiempo de almacenamiento afectan aspectos clave como la humedad, la pérdida de peso y la actividad de agua, el análisis sensorial podría ofrecer una comprensión más profunda de cómo estos cambios fisicoquímicos se traducen en percepciones sensoriales por parte de los consumidores, lo cual sería relevante para determinar el momento exacto en que el producto deja de ser aceptable.

Además, para prolongar la VU del producto, se recomienda explorar estrategias como el ajuste de las condiciones de empaque, por ejemplo, mediante la utilización de atmósferas modificadas o empaques con propiedades específicas de barrera contra la humedad y el oxígeno. Otra estrategia podría ser la incorporación de ingredientes naturales con propiedades antimicrobianas y antioxidantes, que puedan inhibir el crecimiento de microorganismos y la oxidación, respectivamente, sin comprometer las características sensoriales del producto. Finalmente, el control riguroso de las condiciones de almacenamiento, especialmente la temperatura, basado en los resultados obtenidos, se presenta como una medida esencial para minimizar los cambios fisicoquímicos y sensoriales adversos durante el almacenamiento.

Estas perspectivas ofrecen oportunidades para futuras investigaciones que profundicen en el análisis sensorial y la optimización de estrategias de conservación, además de que brindan a la industria panadera opciones viables para mejorar la calidad y extender la VU de sus productos, asegurando así una mejor experiencia para el consumidor.

Referencias

Baik, M.-Y., & Chinachoti, P. (2000). Moisture Redistribution and Phase Transitions During Bread Staling. *Cereal Chemistry*, 77(4), 484-488. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2000.77.4.484>

Chinachoti, P. (2018). *Bread Staling*. CRC Press.

Gray, J. A., & Bemiller, J. N. (2003). Bread Staling: Molecular Basis and Control. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2(1), 1-21. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2003.tb00011.x>

Gutiérrez, M. (2020). *Rebanadas de Mantequilla*. Larousse.

Larousse. (2021). Rebanada • Larousse Cocina. En *Larousse Cocina*.

Ribotta, P. D., & Le Bail, A. (2007). Thermo-Physical Assessment of Bread during Staling. *LWT - Food Science and Technology*, 40(5), 879-884. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2006.03.023>

Van Boekel, M. A. J. S. (2008). Kinetic Modeling of Food Quality: A Critical Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 7(1), 144-158. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2007.00036.x>

APÉNDICE A

Material suplementario

A.1. Conjunto de datos

LA TABLA A.1 está diseñada para permitir un análisis detallado de cómo estas condiciones afectan diferentes atributos de calidad, los cuales se refieren en la columna determinaciones y pueden hacer alusión a la AW, humedad y peso.

Tabla A.1: Configuración del conjunto de datos utilizado para el análisis.

Temperatura	Tiempo	Atributo de calidad
20	0	Determinación 1
20	0	Determinación 2
20	0	Determinación 3
20	5	Determinación 1
20	5	Determinación 2
20	5	Determinación 3
20	9	Determinación 1
20	9	Determinación 2
20	9	Determinación 3
20	12	Determinación 1
20	12	Determinación 2
20	12	Determinación 3
20	16	Determinación 1
20	16	Determinación 2
20	16	Determinación 3
20	19	Determinación 1
20	19	Determinación 2
20	19	Determinación 3
20	23	Determinación 1
20	23	Determinación 2
20	23	Determinación 3
20	27	Determinación 1
20	27	Determinación 2
20	27	Determinación 3
20	30	Determinación 1

Temperatura	Tiempo	Atributo de calidad
20	30	Determinación 2
20	30	Determinación 3
20	34	Determinación 1
20	34	Determinación 2
20	34	Determinación 3
30	0	Determinación 1
30	0	Determinación 2
30	0	Determinación 3
30	5	Determinación 1
30	5	Determinación 2
30	5	Determinación 3
30	9	Determinación 1
30	9	Determinación 2
30	9	Determinación 3
30	12	Determinación 1
30	12	Determinación 2
30	12	Determinación 3
30	16	Determinación 1
30	16	Determinación 2
30	16	Determinación 3
30	19	Determinación 1
30	19	Determinación 2
30	19	Determinación 3
30	23	Determinación 1
30	23	Determinación 2
30	23	Determinación 3
30	27	Determinación 1
30	27	Determinación 2
30	27	Determinación 3
30	30	Determinación 1
30	30	Determinación 2
30	30	Determinación 3
30	34	Determinación 1
30	34	Determinación 2
30	34	Determinación 3

A.2. Análisis estadístico con R

A.2.1. Influencia del tiempo y de la temperatura de almacenamiento

Fue utilizado un código en R para realizar un análisis de varianza (ANOVA) para investigar la variabilidad en la variable de respuesta del atributo crítico de calidad en cuestión, en este caso, para la actividad de agua (AW) en función de dos factores: “Temperatura” y “Tiempo” de almacenamiento. A continuación, se explican las etapas del código:

1. Cargar las librerías:

```
1 library(readxl)
2
```

Importa la librería “readxl” que se utiliza para leer archivos de Excel.

2. Cargar los datos:

```

1  dataset <- read_excel("datos_aw.xlsx")
2

```

Lee los datos desde un archivo de Excel llamado “datos_aw.xlsx” y los almacena en el objeto “dataset”.

3. Adjuntar y mostrar los datos:

```

1  attach(dataset)
2  names(dataset)
3  str(dataset)
4

```

- **attach(dataset)**: Adjunta el conjunto de datos, permitiendo referirse a las variables directamente por sus nombres.
- **names(dataset)**: Muestra los nombres de las variables en el conjunto de datos.
- **str(dataset)**: Muestra la estructura de los datos, proporcionando información sobre las variables y sus tipos.

4. Establecer las variables:

```

1  factor1_temperatura <- factor(Temperatura)
2  factor2_tiempo <- factor(Tiempo)
3  respuesta_aw <- dataset$aw
4

```

- **factor1_temperatura** y **factor2_tiempo**: Convierten las variables “Temperatura” y “Tiempo” en factores.
- **respuesta_aw**: Extrae la variable de respuesta “aw” del conjunto de datos.

5. Cálculo de la tabla ANOVA:

```

1  model <- lm(respuesta_aw ~ (factor1_temperatura + factor2_tiempo)^2)
2  anova <- aov(model)
3

```

- **model**: Crea un modelo lineal utilizando la función lm(), con una fórmula que incluye interacciones cuadráticas entre “Temperatura” y “Tiempo”.
- **anova**: Realiza el análisis de varianza (ANOVA) sobre el modelo lineal.

6. Mostrar el resumen del ANOVA:

```

1  summary(anova)
2

```

Muestra un resumen del análisis de varianza, que incluye estadísticas como las sumas de cuadrados, grados de libertad, F-statistics y p-values.

7. Guardar el resumen en un archivo de texto plano (.txt):

```

1  capture.output(
2    summary(anova),           # Objeto a exportar
3    file = "anova_aw.txt"     # Nombre del archivo
4  )
5

```

Captura la salida del resumen ANOVA y la guarda en un archivo de texto llamado “anova_aw.txt”.

A continuación se muestra el código implementado:

```

1 ## =====
2 # Proyecto: Vida útil de bisquet
3 # Análisis de varianza
4 # Autor: Jesús Guadalupe Pérez Flores
5 # Pachuca de Soto, Hgo., México. 2024
6 ## =====
7 # Cargar las librerías:
8 library(readxl)
9 # Cargar los datos:
10 dataset <- read_excel("datos_aw.xlsx")
11 # Adjuntar y mostrar los datos:
12 attach(dataset)
13 names(dataset)
14 str(dataset)
15 # Establecer las variables
16 factor1_temperatura <- factor(Temperatura)
17 factor2_tiempo <- factor(Tiempo)
18 respuesta_aw <- dataset$aw
19 # Cálculo de la tabla ANOVA
20 model <- lm(respuesta_aw ~ (factor1_temperatura + factor2_tiempo)^2)
21 anova <- aov(model)
22 summary(anova)
23 # Guardar el resumen en un archivo de texto plano (.txt)
24 capture.output(
25   summary(anova),           # Objeto a ser exportado
26   file = "anova_aw.txt" # Nombre del documento
27 )

```

A.2.2. Influencia del tiempo de almacenamiento

Este código en R realiza un análisis de datos y crea gráficos utilizando el paquete `ggplot2` para visualizar la relación entre la variable de respuesta “aw” y la variable explicativa “Tiempo” para dos temperaturas diferentes (20°C y 30°C). Aquí está una explicación por etapas:

1. Cargar bibliotecas:

```

1 library(readxl)
2 library(multcompView)
3 library(ggplot2)
4 library(dplyr)
5 library(gridExtra)
6

```

Carga las librerías necesarias, incluyendo aquellas para leer archivos Excel (`readxl`), visualización de letras compactas (`multcompView`), creación de gráficos (`ggplot2`), manipulación de datos (`dplyr`), y organización de gráficos (`gridExtra`).

2. Importar la base de datos:

```

1 dataset <- read_excel("datos_aw.xlsx")
2

```

Lee los datos desde un archivo Excel llamado “datos_aw.xlsx” y los almacena en el objeto `dataset`.

3. Función para realizar el análisis y crear el gráfico:

```

1 analyze_and_plot <- function(temperatura) {
2   # ... (ver explicación detallada en los puntos siguientes)
3   return(gg)
4 }
5

```

Define una función llamada `analyze_and_plot` que toma una temperatura como argumento, realiza análisis y crea un gráfico utilizando `ggplot2`, y luego devuelve el objeto `ggplot`.

4. Análisis y gráfico para la temperatura 20°C:

```
1 gg_temp_20 <- analyze_and_plot(20)
2
```

Llama a la función `analyze_and_plot` con la temperatura 20°C y guarda el gráfico resultante en `gg_temp_20`.

5. Análisis y gráfico para la temperatura 30°C:

```
1 gg_temp_30 <- analyze_and_plot(30)
2
```

Llama a la función `analyze_and_plot` con la temperatura 30°C y guarda el gráfico resultante en `gg_temp_30`.

6. Organizar los gráficos en filas:

```
1 combined_plot <- grid.arrange(
2   gg_temp_20 + ggtitle("Temperatura 20 \u00b0C"),
3   gg_temp_30 + ggtitle("Temperatura 30 \u00b0C"),
4   ncol = 1,
5   nrow = 2
6 )
7
```

Utiliza la función `grid.arrange` para organizar los dos gráficos en una sola imagen con dos filas. Añade títulos a cada gráfico.

7. Guardar la imagen combinada:

```
1 ggsave("aw_plots_Tiempo.png", combined_plot, width = 8, height = 10, dpi = 300)
2
```

Guarda la imagen combinada en un archivo llamado “aw_plots_Tiempo.png” con un ancho de 8 pulgadas, alto de 10 pulgadas y resolución de 300 dpi.

A continuación se muestra el código implementado:

```
1 #### =====
2 # Proyecto: Vida útil de bisquet
3 # Gráficos de dispersión + ANOVA + Tukey test
4 # Autor: Jesús Guadalupe Pérez Flores
5 # Pachuca de Soto, Hgo., México. 2024
6 #### =====
7 # Instalar los paquetes necesarios si no los tienes instalados
8 #install.packages(c("readxl", "multcompView", "ggplot2", "dplyr", "gridExtra"))
9 # Cargar bibliotecas
10 library(readxl)
11 library(multcompView)
12 library(ggplot2)
13 library(dplyr)
14 library(gridExtra)
15 # Importar la base de datos
16 dataset <- read_excel("datos_aw.xlsx")
17 # Función para realizar el análisis y crear el gráfico
18 analyze_and_plot <- function(temperatura) {
19   # Filtrar el dataset para la temperatura dada
20   subset_dataset <- subset(dataset, Temperatura == temperatura)
21   # Convertir Tiempo a factor y ordenar los niveles
22   subset_dataset$Tiempo <- factor(subset_dataset$Tiempo, levels = unique(subset_dataset$Tiempo))
23   # Calcular la media y el intervalo de confianza del 95% para aw por Tiempo
24   summary_data <- subset_dataset %>%
25     group_by(Tiempo) %>%
26     summarise(
```

```

27     mean_aw = mean(aw),
28     lower_ci = mean_aw - qt(0.975, length(aw) - 1) * sd(aw) / sqrt(length(aw)),
29     upper_ci = mean_aw + qt(0.975, length(aw) - 1) * sd(aw) / sqrt(length(aw))
30   )
31 # Análisis de varianza
32 model <- lm(aw ~ Tiempo, data = subset_dataset)
33 anova_result <- aov(model)
34 summary(anova_result)
35 # Prueba de Tukey
36 tukey_result <- TukeyHSD(anova_result)
37 # Visualizar las letras solo para los niveles presentes en los datos
38 cld <- multcompLetters4(anova_result, tukey_result)
39 # Creación de una tabla con los datos resumidos y la visualización de letras compactas
40 Tk <- group_by(subset_dataset, Tiempo) %>%
41   summarise(mean = mean(aw)) %>%
42   arrange(desc(mean))
43 # Extracción de la pantalla de letras compactas y agregando a la tabla Tk
44 cld <- as.data.frame.list(cld$Tiempo)
45 Tk$cld <- cld$Letters
46 # Crear un gráfico de dispersión con barras de error y línea
47 gg <- ggplot(summary_data, aes(x = Tiempo, y = mean_aw)) +
48   geom_point() +
49   geom_line(aes(group = 1), color = "blue", linetype = "dotted") +
50   geom_errorbar(aes(ymin = lower_ci, ymax = upper_ci), width = 0.2) +
51   labs(x = "Tiempo (días)",
52        y = "Actividad de agua (AW)") +
53   theme_bw() +
54   theme(panel.grid.major = element_line(color = "gray", linetype = "dotted"),
55         minor = element_blank()) +
56   geom_text(data = Tk, aes(x = Tiempo, y = mean, label = cld), size = 3, vjust = -1, hjust
57             = -1)
58 # Devuelve el gráfico ggplot
59 return(gg)
60 }
61 # Llamar a la función para cada temperatura
62 gg_temp_20 <- analyze_and_plot(20)
63 gg_temp_30 <- analyze_and_plot(30)
64 # Organizar los gráficos en filas
65 combined_plot <- grid.arrange(
66   gg_temp_20 + ggtitle("Temperatura 20 \u00b0C"),
67   gg_temp_30 + ggtitle("Temperatura 30 \u00b0C"),
68   ncol = 1,
69   nrow = 2
70 )
71 # Guardar la imagen combinada
72 ggsave("aw_plots_Tiempo.png", combined_plot, width = 8, height = 10, dpi = 300)

```

Este código se ajustó para trabajar con conjuntos de datos que representan la variación en el contenido de humedad y el peso del bisquet y de la rebanada a lo largo de su almacenamiento en diversas condiciones de estudio.

A.2.3. Influencia de la temperatura de almacenamiento

Este código en R realiza un análisis estadístico y visualización de datos utilizando diversas técnicas, como análisis de varianza (ANOVA), prueba de Tukey y creación de boxplots. A continuación, se explica el código por etapas:

1. Cargar las librerías:

```

1  library(readxl)
2  library(ggplot2)
3  library(multcompView)
4  library(dplyr)
5

```

Importa las librerías necesarias para leer archivos de Excel, realizar gráficos, realizar análisis estadísticos y manipulación de datos.

2. Importar la base de datos:

```
1 dataset <- read_excel("datos_aw.xlsx")
2
```

Lee los datos desde un archivo Excel llamado “datos_aw.xlsx” y los almacena en el objeto **dataset**.

3. Adjuntar los datos y mostrarlos de forma compacta:

```
1 attach(dataset)
2 str(dataset)
3
```

- **attach(dataset)**: Adjunta el conjunto de datos, permitiendo referirse a las variables directamente por sus nombres.
- **str(dataset)**: Muestra la estructura de los datos de forma compacta.

4. Análisis de varianza de 2 vías:

```
1 model <- lm(aw ~ Temperatura, data = dataset)
2 anova <- aov(model)
3 summary(anova)
4
```

- Ajusta un modelo lineal (**lm**) para analizar el efecto de la variable “Temperatura” en la variable de respuesta “aw”.
- Realiza un análisis de varianza (ANOVA) y muestra un resumen de los resultados.

5. Tukey’s test:

```
1 tukey <- TukeyHSD(x = anova, 'Temperatura', conf.level = 0.95)
2 print(tukey)
3
```

Realiza la prueba de Tukey para comparar las medias de las diferentes categorías de “Temperatura”.

6. Compactar las letras en una pantalla:

```
1 cld <- multcompLetters4(anova, tukey)
2 print(cld)
3
```

Muestra las letras compactas resultantes del análisis de Tukey.

7. Creación de una tabla con los datos resumidos y la visualización de letras compactas:

```
1 Tk <- group_by(dataset, Temperatura) %>%
2   summarise(mean = mean(aw), quant = quantile(aw, probs = 0.75)) %>%
3   arrange(desc(mean))
4 cld <- as.data.frame.list(cld$Temperatura)
5 Tk$cld <- cld$Letters
6 print(Tk)
7
```

- Crea una tabla resumida que incluye la media y el tercer cuartil (cuantil 75 %) para cada nivel de “Temperatura”.
- Agrega las letras compactas resultantes del análisis de Tukey a la tabla.

8. Creación de la boxplot y guardado de la figura final:

```

1 ggplot(dataset, aes(Temperatura, aw)) +
2   geom_boxplot() +
3   geom_jitter(width = 0.25, alpha = 0.25) +
4   labs(x = "Temperatura (\u00b0C)", y = "Actividad de agua (AW)") +
5   theme_bw() +
6   theme(panel.grid.major = element_line(color = "gray", linetype = "dotted"),
7         panel.grid.minor = element_blank()) +
8   geom_text(data = Tk, aes(x = Temperatura, y = quant, label = cld), size = 3,
9             vjust = -1, hjust = -1)
10  ggsave("boxplot_Temperatura_aw.png", width = 5, height = 5, dpi = 1000)
11

```

- Crea un boxplot con puntos superpuestos utilizando ggplot2.
- Agrega letras compactas a los puntos que representan las medias de cada grupo de “Temperatura”.
- Guarda la figura resultante en un archivo llamado “boxplot_Temperatura_aw.png”.

A continuación se muestra el código implementado:

```

1 ## =====
2 # Proyecto: Vida útil de bisquet
3 # Boxplot + ANOVA + Tukey test
4 # Autor: Jesús Guadalupe Pérez Flores
5 # Pachuca de Soto, Hgo., México. 2024
6 ## =====
7 # Cargar las librerías adecuadas:
8 library(readxl)
9 library(ggplot2)
10 library(multcompView)
11 library(dplyr)
12 # Importar la base de datos
13 dataset <- read_excel("datos_aw.xlsx")
14 # Adjuntar los datos
15 attach(dataset)
16 # Mostrar de forma compacta los datos
17 str(dataset)
18 # Análisis de varianza de 2 vías
19 # Determinar el efecto del Tiempo y de la Temperatura de almacenamiento sobre el atributo de
20 # calidad
21 model <- lm( aw ~ Temperatura, data = dataset )
22 anova <- aov(model)
23 summary(anova)
24 # Tukey's test
25 # La prueba de Tukey estudia cada par de TEMPERATURA:
26 tukey <- TukeyHSD(x=anova, 'Temperatura', conf.level=0.95)
27 print(tukey)
28 # Compactar las letras en una pantalla
29 cld <- multcompLetters4(anova, tukey)
30 print(cld)
31 # Creación de una tabla con los datos resumidos y la visualización de letras compactas
32 # Tabla con el factor (Temperatura) y el 3er cuartil
33 Tk <- group_by(dataset, Temperatura) %>%
34   summarise(mean=mean(aw), quant = quantile(aw, probs = 0.75)) %>%
35   arrange(desc(mean))
36 # Extracción de la pantalla de letras compactas y agregando a la tabla Tk
37 cld <- as.data.frame.list(cld$Temperatura)
38 Tk$cld <- cld$Letters
39 print(Tk)
40 # Creación de la boxplot
41 ggplot(dataset, aes(Temperatura, aw)) +
42   geom_boxplot() +
43   geom_jitter(width=0.25, alpha=0.25) +
44   labs(x="Temperatura (\u00b0C)", y="Actividad de agua (AW)") + # Personalizar los ejes
45   theme_bw() +
46   theme(panel.grid.major = element_line(color = "gray", linetype = "dotted"), panel.grid.
47         minor = element_blank()) +

```

```

46   geom_text(data = Tk, aes(x = Temperatura, y = quant, label = cld), size = 3, vjust=-1,
47   hjust =-1) # Agregar las letras
47 # saving the final figure
48 ggsave("boxplot_Temperatura_aw.png", width = 5, height = 5, dpi = 1000)

```

Este código se ajustó para trabajar con conjuntos de datos que representan la variación en el contenido de humedad y el peso de las conchas de vainilla a lo largo de su almacenamiento en diversas condiciones de estudio.

A.3. Resultados del análisis de varianza de dos vías

En las Tablas A.2, A.3 y A.4, se presentan los resultados del análisis de varianza (ANOVA) que examina la influencia de tres factores principales en bisquets: la temperatura de almacenamiento y el tiempo de almacenamiento en relación con los atributos fisicoquímicos de calidad de las conchas de vainilla. Estos atributos incluyen la variación del peso, el contenido de humedad y la AW.

Tabla A.2: ANOVA completo de la humedad del bisquet.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor-p
A: Temperatura	1	6.8	6.79	0.579	0.451017
B: Tiempo	9	1064.7	118.3	10.094	$6.79 \times 10^{-8}***$
AB	9	447.2	49.69	4.24	0.000659
Residuales	40	468.8	11.72		

Tabla A.3: ANOVA completo del peso del bisquet.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor-p
A: Temperatura	1	61	60.9	0.428	0.516853
B: Tiempo	9	6495	721.7	5.065	0.000141
AB	9	1022	113.5	0.797	0.621099
Residuales	40	5699	142.5		

Tabla A.4: ANOVA completo de la AW del bisquet.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor-p
A: Temperatura	1	0.0545	0.05448	1248	$2 \times 10^{-16}***$
B: Tiempo	9	1.0011	0.11123	2548	$2 \times 10^{-16}***$
AB	9	0.9905	0.11006	2521	$2 \times 10^{-16}***$
Residuales	40	0.0017	0.00004		

En las Tablas A.5, A.6 y A.7, se presentan los resultados del análisis de varianza (ANOVA) que examina la influencia de tres factores principales en bisquets: la temperatura de almacenamiento y el tiempo de almacenamiento en relación con los atributos fisicoquímicos de calidad de las conchas de vainilla. Estos atributos incluyen la variación del peso, el contenido de humedad y la AW.

Tabla A.5: ANOVA completo de la humedad de las rebanadas.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor-p
A: Temperatura	1	292	292.01	10.432	$2.48 \times 10^{-3}***$
B: Tiempo	9	1019	113.18	4.043	$9.63 \times 10^{-4}***$
AB	9	320	35.56	1.27	$2.8 \times 10^{-1}***$
Residuales	40	1120	27.99		

Tabla A.6: ANOVA completo del peso de las rebanadas.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor-p
A: Temperatura	1	186	185.9	3.274	$7.79 \times 10^{-2}***$
B: Tiempo	9	7383	820.3	14.45	$4.93 \times 10^{-10}***$
AB	9	268	29.8	0.525	$8.48 \times 10^{-1}***$
Residuales	40	2271	56.8		

Tabla A.7: ANOVA completo de la AW de las rebanadas.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor-p
A: Temperatura	1	0.06112	0.06112	19.554	$7.31 \times 10^{-5}***$
B: Tiempo	9	0.17472	0.01941	6.211	$1.93 \times 10^{-5}***$
AB	9	0.26469	0.02941	9.409	$1.66 \times 10^{-7}***$
Residuales	40	0.12503	0.00313		