



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

TESIS

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL TIEMPO, DE LA TEMPERATURA
Y DEL EMPAQUE DE ALMACENAMIENTO SOBRE LOS ATRIBUTOS
FISICOQUÍMICOS DE CALIDAD DE CONCHAS DE VAINILLA**

Para obtener el título de
Licenciada en Química de Alimentos

PRESENTA

Mariana Inés Flores Yañez

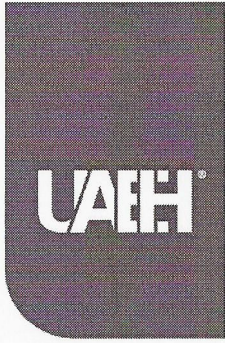
Directora

Dra. Elizabeth Contreras López

Codirector

Dr. Jesús Guadalupe Pérez Flores

Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, Marzo, 2024



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

Mineral de la Reforma, Hgo., a 20 de marzo de 2024

Número de control: ICBI-D/391/2024
Asunto: Autorización de impresión.

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

Con fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; 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 Pasante de la Licenciatura en Química de Alimentos **Mariana Inés Flores Yañez**, quien presenta el trabajo de titulación “**Estudio de la Influencia del tiempo, de la temperatura y del empaque de almacenamiento sobre los atributos fisicoquímicos de calidad de conchas de vainilla**”, después de revisar el trabajo en reunión de Sinodales ha decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: Dr. Luis Guillermo González Olivares

Secretario: Dr. Juan Ramírez Godínez

Vocal: Dra. Elizabeth Contreras López

Suplente: Dr. Jesús Guadalupe Pérez Flores

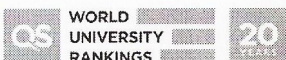
Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
“Amor, Orden y Progreso”

Dr. Otilio Arturo Acevedo Sandoval
Director del ICBI



OAAS/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. 2231 Fax 2109
direccion_icbi@uaeh.edu.mx

Dedico mi tesis principalmente a mi mamá y hermano, María Perla Flores Yáñez y Heber Alejandro Pérez Flores, que por ellos soy lo que soy, por acompañarme, apoyarme, guiarme y motivarme a seguir adelante, no rendirme ante los problemas que se presentaron, a enfrentar las adversidades y aprender de ellas.

A mi prima, Valeria Hernández Flores, mi mejor amiga y más grande confidente quien me ha dado su apoyo y amor desde que recuerdo.

A mis hermosas mascotas, Laila y Carla, quienes en mis noches de desvelo estudiando me acompañaron, me dieron su compañía, y sin decir palabras, me mostraron su apoyo y amor incondicional.

A mis amigos, que nos motivamos y ayudamos mutuamente, además de que me permitieron ser parte de su vida desde que nos conocimos.

A los profesores que creyeron en mí siempre y me apoyaron en cada paso del camino, dándome las herramientas para que este trabajo se hiciera posible, especialmente a quienes me dirigieron en este proyecto, a la Dra. Elizabeth Contreras López y al Dr. Jesús Guadalupe Pérez Flores.

Agradecimientos

Agradezco sinceramente a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por el invaluable respaldo brindado durante la ejecución experimental de este proyecto. Asimismo, agradezco a la universidad por brindarme la oportunidad de iniciar y concluir esta enriquecedora experiencia como estudiante universitaria.

Quiero extender mi más sincero agradecimiento al Dr. Jesús Guadalupe Pérez Flores y a la Dra. Elizabeth Contreras López por su destacada dirección académica, la cual fue fundamental para la exitosa culminación de este proyecto. Sus conocimientos, orientación y apoyo fueron esenciales en cada etapa del proceso, y su compromiso con mi crecimiento académico es invaluable.

Agradezco 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.

Agradezco a la Panadería El Serranillo.

Finalmente, deseo expresar mi más sincero agradecimiento al jurado evaluador por sus valiosos consejos y la enriquecedora retroalimentación proporcionada, la cual fue fundamental para llevar a buen término la tesis.

Índice general	i
Índice de figuras	v
Índice de tablas	vii
Lista de acrónimos	ix
Abstract	xi
Resumen	xv
Introducción	xix
1. Antecedentes generales: Panificación en México, calidad y desafíos en la vida útil del producto	1
1.1. Introducción	2
1.2. Definición del pan	5
1.3. Clasificación del pan	5
1.4. Ingredientes para la elaboración del pan	7
1.5. Historia del pan en México	8
1.5.1. Industria mexicana de panificación	9
1.5.2. Consumo de pan en México	10
1.5.3. Principales tipos de productos de panificación en México	10
1.5.4. Pan dulce en México	10

1.6. Pan tipo concha	14
1.6.1. Proceso de elaboración de las conchas	15
1.7. Desafíos en la vida útil del pan: Implicaciones para la calidad y sostenibilidad	15
1.8. Conclusión	18
1.9. Referencias	18
2. Vida útil de alimentos: Productos de panificación	23
2.1. Introducción	24
2.2. Vida útil de alimentos	26
2.3. Reacciones que afectan la vida útil de los alimentos	26
2.4. Determinación de vida útil en alimentos	30
2.5. Modelado cinético para estimar vida útil en alimentos	31
2.6. Desafíos de modelar reacciones en sistemas alimentarios	31
2.7. Influencia de la temperatura sobre las reacciones químicas y biológicas en los alimentos	34
2.8. Vida útil en productos de panificación	35
2.8.1. Envejecimiento del pan	37
2.9. Conclusiones y perspectivas	38
2.10. Referencias	39
3. Estudio de vida útil de conchas de vainilla	47
3.1. Introducción	48
3.2. Materiales y métodos	51
3.2.1. Metodología general	51
3.2.2. Muestras	51
3.2.3. Estudio de la vida útil de concha de vainilla	51
3.2.4. Determinación de los atributos fisicoquímicos de calidad	52
3.2.5. Análisis estadístico	52
3.2.6. Análisis cinético de los atributos fisicoquímicos de calidad en conchas de vainilla	55
3.2.7. Influencia de la temperatura sobre la constante de velocidad	55
3.2.8. Análisis termodinámico	56
3.3. Resultados y discusión	56
3.3.1. Influencia del empaque, de la temperatura y del tiempo de almacenamiento	56
3.3.2. Influencia del tiempo de almacenamiento	61
3.3.3. Análisis cinético	64
3.3.4. Análisis termodinámico	68
3.4. Conclusión y perspectivas	69
3.5. Referencias	70
A. Material suplementario	73

A.1. Conjunto de datos utilizados	73
A.2. Análisis estadístico con R	78
A.2.1. Análisis factorial	78
A.2.2. Influencia de la temperatura y del empaque de almacenamiento	79
A.2.3. Influencia del tiempo de almacenamiento	81
A.3. Análisis factorial	84

Índice de figuras

1.1. Pan de muerto.	4
1.2. Concha tradicional con cobertura de vainilla y de chocolate.	8
1.3. Canasta de pan dulce, muestra de la gran variedad de pan.	11
1.4. Tradicional rosca de reyes mexicana.	12
1.5. Piojosas.	13
3.1. Conchas de vainilla.	50
3.2. Diagrama de elaboración de conchas de vainilla.	53
3.3. Metodología para el estudio de la influencia del empaque en pan comercial.	54
3.4. Valores de cambio en el peso (g) de conchas de vainilla 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 ($p < 0.05$).	58
3.5. Valores de cambio en el contenido de humedad (g de H_2O 100 g^{-1} de muestra) de conchas de vainilla 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 ($p < 0.05$).	59
3.6. 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 ($p < 0.05$).	60

- 3.7. Gráficos de dispersión de la evolución en el tiempo del peso de las conchas de vainilla en las diferentes condiciones de estudio (CE). Las letras minúsculas diferentes indican diferencias en los tiempos de almacenamiento ($p < 0.05$). 62
- 3.8. Gráficos de dispersión de la evolución en el tiempo del contenido de humedad de las conchas de vainilla en las diferentes condiciones de estudio (CE). Las letras minúsculas diferentes indican diferencias en los tiempos de almacenamiento ($p < 0.05$). 63
- 3.9. Gráficos de dispersión de la evolución en el tiempo de la actividad de agua (AW) de las conchas de vainilla en las diferentes condiciones de estudio (CE). Las letras minúsculas diferentes indican diferencias en los tiempos de almacenamiento ($p < 0.05$). 66

1.1. Características del pan mexicano por diversas regiones.	14
2.1. Reacciones que afectan la calidad alimentaria.	28
2.2. Reacciones de los componentes clave en los alimentos.	29
3.1. Resumen de las condiciones de estudio (CE).	51
3.2. Ajuste de los datos experimentales al modelo de reacción de orden cero para conchas de vainilla.	64
3.3. Ajuste de los datos experimentales al modelo de reacción de primer orden para conchas de vainilla.	65
3.4. Ajuste de los datos experimentales al modelo de reacción de segundo orden para conchas de vainilla.	67
3.5. Parámetros termodinámicos y cinéticos del modelo de segundo orden que describe la variación de la actividad de agua (AW).	68
A.1. Organización del conjunto de datos.	74
A.2. ANOVA completo de la variación del peso de las conchas de vainilla.	84
A.3. ANOVA completo del contenido de humedad de las conchas de vainilla.	85
A.4. ANOVA completo de la actividad acuosa de las conchas de vainilla.	85

Lista de acrónimos

ANOVA	análisis de varianza	52
AW	actividad de agua	XXI
CE	condiciones de estudio	51
CV	concha(s) de vainilla	XX
SA	seguridad alimentaria	XX
VU	vida útil	XX

FOOD PRODUCTS' quality and shelf life, such as vanilla shells, are influenced by various factors during storage, including time, temperature, and packaging type. These elements interact complexly, affecting critical physicochemical attributes such as water activity, moisture content, and weight change. A detailed understanding of how these variables impact the quality of vanilla shells is valuable for optimizing storage conditions and, consequently, reducing food waste.

Therefore, the overarching objective of this thesis was to investigate the influence of storage time, temperature, and packaging on the physicochemical quality attributes of vanilla shells. This was achieved by monitoring water activity, moisture content, and weight change at 20, 30, and 40°C temperatures, with and without packaging. The purpose was to comprehend how these variables affect vanilla shells' quality and shelf life during storage and provide valuable insights for optimizing the conservation conditions.

To achieve this goal, the study pursued specific objectives:

1. Investigate and select the most relevant deterioration parameters for vanilla shells through a review of specialized literature and information gathered in the general background on baking in Mexico. This aimed to establish a solid foundation for identifying physicochemical quality attributes specific to vanilla shells.
2. Design and conduct an experimental protocol for systematic monitoring based on official analysis techniques of selected physicochemical attributes (water activity, moisture content, and weight change) at different temperatures (20, 30, and 40°C) and packaging conditions (with and without packaging) in vanilla shells. This aimed to contribute to the optimization of conservation conditions.
3. Conduct a rigorous statistical analysis of the results obtained in the experimental protocol, identifying significant patterns and relationships among the studied variables. This was done to validate the critical influence of time, temperature, and packaging on the stability and quality of vanilla shells.

These specific objectives were addressed through the development of the following chapters, summarized as follows:

1. **Chapter I. General Background: Baking in Mexico, Quality, and Challenges in Product Shelf Life:** This chapter analyzed the importance of bread consumption and shelf life in the Mexican food industry. It explained that determining the shelf life of foods is a complex process involving various factors, such as quality criteria, analytical methods, storage tests, data analysis, modeling, interpretation of results, expiration date establishment, validation and verification, documentation and communication, and continuous monitoring. It also highlighted the challenges of kinetic modeling in food science due to the complexity of foods, biological variability, interconnected reactions, physical processes, non-isothermal conditions, and the lack of precise experimental data. The significant impact of temperature on chemical reactions, microbial growth, and enzymatic activity in foods was emphasized. Additionally, information about the history of bread in Mexico, the diversity of the baking industry, and the cultural importance of bread in Mexican cuisine was provided.
2. **Chapter II. Shelf life of food: Bakery products:** This chapter addressed the complexity of factors influencing the shelf life of food, with a particular focus on bakery products, and its connection to food waste, food safety, and the sustainability of the food system. The main objective was to summarize the impact of various elements, such as chemical, biochemical, physical, and microbiological reactions, along with sensory changes, on the shelf life of food, specifically emphasizing bakery products. The importance of modeling these changes through kinetic and statistical equations was highlighted, overcoming challenges in modeling food reactions, and the significance of collaboration between academia and industry was emphasized for developing applicable models. Technological innovation was presented as a promising approach to enhancing the shelf life of food. Additionally, the need to consider the complexity and biological variability in reaction modeling was emphasized to improve prediction accuracy. In conclusion, a comprehensive overview of factors affecting the shelf life of food was provided, underscoring the importance of multidisciplinary approaches to address food waste, enhance food safety, and promote sustainable practices in the food industry. The adoption of these strategies was identified as crucial for reducing food waste and improving the availability of nutritious food, thereby contributing to the sustainability of the food system.
3. **Chapter III. Effect of Packaging, Temperature, and Storage Time on the Physicochemical Quality Attributes of Vanilla Shells:** This chapter focused on evaluating how the quality of vanilla shells, a byproduct of the baking industry, was affected by packaging, temperature, and storage time. It was determined that the second-order kinetic model was the most suitable for describing changes in physicochemical attributes, such as weight, moisture content, and water activity. Analyses revealed that temperature and storage time were critical factors influencing these properties, with their interaction being key to the stability and quality of the product. Statistical analyses were conducted, and thermodynamic and kinetic parameters

were calculated, providing a detailed understanding of the dynamics of the involved reactions. This knowledge was essential for optimizing food formulation, processing, and storage to maintain quality and safety. Additionally, the issue of food waste and its impact on food safety was addressed, emphasizing the importance of strategies such as using active packaging and fermentation with whey to extend the shelf life of bread and other food products. It was concluded that understanding kinetic modeling and implementing appropriate conservation strategies were crucial for reducing food waste and improving food safety.

In conclusion, this thesis comprehensively examined the influence of time, temperature, and packaging on the physicochemical quality attributes of vanilla shells. Through a rigorous experimental protocol utilizing official analysis techniques, a systematic monitoring approach provided detailed insights into how these variables affect water activity, moisture content, and weight changes during storage at different temperatures and packaging conditions. The general background contextualized the importance of bread in the Mexican food industry, emphasizing the complexity of determining food shelf life. Additionally, the critical influence of these factors on physicochemical attributes was demonstrated, supported by statistical analyses and calculations of thermodynamic and kinetic parameters. This study contributed to understanding how storage conditions impact the quality of vanilla shells, offering fundamental perspectives for optimizing practices in the food industry, supporting sustainability, and enhancing the efficiency of managing similar food products.

LA calidad y vida útil de productos alimentarios, como las conchas de vainilla, se ven afectadas por diversos factores durante el almacenamiento, entre los cuales destacan tiempo, temperatura y tipo de empaque. Estos elementos interactúan de manera compleja, influyendo en atributos fisicoquímicos clave como la actividad acuosa, el contenido de humedad y el cambio de peso. La comprensión detallada de cómo estas variables afectan la calidad de las conchas de vainilla es útil para optimizar las condiciones de conservación y, por ende, reducir el desperdicio de alimentos.

Por lo tanto, el objetivo general de esta tesis fue investigar la influencia del tiempo, la temperatura y el empaque de almacenamiento en los atributos fisicoquímicos de calidad de conchas de vainilla, a través del monitoreo de la actividad acuosa, el contenido de humedad y el cambio de peso a temperaturas de 20, 30 y 40°C, con y sin empaque. El propósito es comprender cómo estas variables afectan la calidad y la vida útil del producto durante su almacenamiento y, además, proporcionar información valiosa para la optimización de las condiciones de conservación.

Para ello, fue necesario realizar este estudio, basándose en los siguientes objetivos específicos:

1. Investigar y seleccionar los parámetros de deterioro más relevantes para las conchas de vainilla mediante la consulta de literatura especializada y la información recopilada en los antecedentes generales sobre la panificación en México.
2. Diseñar y llevar a cabo un protocolo experimental para el monitoreo sistemático y basado en técnicas oficiales de análisis, de los atributos fisicoquímicos seleccionados (actividad de agua, contenido de humedad y cambio en el peso), a diferentes temperaturas (20, 30 y 40°C) y condiciones de empaque (con y sin empaque) en las conchas de vainilla, con la finalidad de contribuir a la optimización de las condiciones de conservación.
3. Realizar un análisis estadístico riguroso de los resultados obtenidos en el protocolo experimental, identificando patrones significativos y relaciones entre las variables estudiadas, con la finalidad de validar la influencia crítica del tiempo, de la temperatura y del empaque en la estabilidad y

calidad de las conchas de vainilla.

Los objetivos específicos de este estudio fueron abordados mediante el desarrollo de los siguientes capítulos, de los cuales se presenta un resumen.

1. **Capítulo I. Antecedentes generales: Panificación en México, calidad y desafíos en la vida útil del producto:** En este capítulo, la importancia del consumo y la vida útil del pan en la industria alimentaria de México fue analizada. Se explicó que determinar la vida útil de los alimentos es un proceso complejo que involucra diversos factores, tales como criterios de calidad, métodos analíticos, pruebas de almacenamiento, análisis de datos, modelado, interpretación de resultados, establecimiento de fecha de vencimiento, validación y verificación, documentación y comunicación, y monitoreo continuo. Además, se destacaron los desafíos del modelado cinético en la ciencia de los alimentos debido a la complejidad de los alimentos, la variabilidad biológica, las reacciones interconectadas, los procesos físicos, las condiciones no isotérmicas y la falta de datos experimentales precisos. Se enfatizó el impacto significativo de la temperatura en las reacciones químicas, el crecimiento microbiano y la actividad enzimática en los alimentos. Además, se proporcionó información sobre la historia del pan en México, la diversidad de la industria panadera y la importancia cultural del pan en la cocina mexicana.
2. **Capítulo II. Vida útil de alimentos: Productos de panificación:** Este capítulo abordó la complejidad de los factores que impactan la vida útil de los alimentos, centrándose especialmente en los productos de panificación, y su conexión con el desperdicio alimentario, la inocuidad alimentaria y la sostenibilidad del sistema alimentario. El objetivo principal fue resumir la influencia de diversos elementos, como reacciones químicas, bioquímicas, físicas y microbiológicas, junto con cambios sensoriales, en la vida útil de los alimentos, con un enfoque específico en los productos de panificación. Se destacó la importancia de modelar estos cambios mediante ecuaciones cinéticas y estadísticas, superando desafíos en el modelado de reacciones alimentarias, y se resaltó la relevancia de la colaboración entre academia e industria para desarrollar modelos aplicables. La innovación tecnológica se presentó como un enfoque prometedor para mejorar la vida útil de los alimentos. Además, se enfatizó la necesidad de considerar la complejidad y variabilidad biológica en el modelado de reacciones para mejorar la precisión de las predicciones. En conclusión, se proporcionó una visión integral de los factores que afectan la vida útil de los alimentos, subrayando la importancia de enfoques multidisciplinarios para abordar el desperdicio alimentario, mejorar la inocuidad y fomentar prácticas sostenibles en la industria alimentaria. La adopción de estas estrategias se vislumbró como clave para reducir el desperdicio de alimentos y mejorar tanto la disponibilidad de alimentos nutritivos como la sostenibilidad del sistema alimentario.
3. **Capítulo III. Efecto del empaque, de la temperatura y del tiempo de almacenamiento sobre los atributos fisicoquímicos de calidad de conchas de vainilla:** En este capítulo, se centró el estudio en evaluar cómo la calidad de las conchas de vainilla, un

subproducto de la industria panadera, fue afectada por el empaque, la temperatura y el tiempo de almacenamiento. Se determinó que el modelo cinético de segundo orden era el más adecuado para describir los cambios en los atributos fisicoquímicos, como el peso, contenido de humedad y actividad de agua. Los análisis revelaron que la temperatura y el tiempo de almacenamiento fueron factores críticos que influyeron en estas propiedades, siendo clave la interacción entre ellos para la estabilidad y calidad del producto. Se realizaron análisis estadísticos y se calcularon parámetros termodinámicos y cinéticos, proporcionando una comprensión detallada de la dinámica de las reacciones involucradas. Este conocimiento fue esencial para optimizar la formulación, procesamiento y almacenamiento de alimentos, con el objetivo de mantener su calidad y seguridad. Además, el problema del desperdicio de alimentos y su impacto en la seguridad alimentaria fue abordado, destacándose la importancia de estrategias como el uso de envases activos y la fermentación con suero de leche para prolongar la vida útil del pan y otros productos alimenticios. Se concluyó que la comprensión del modelado cinético y la implementación de estrategias adecuadas de conservación eran fundamentales para reducir el desperdicio de alimentos y mejorar la seguridad alimentaria.

Finalmente, como conclusión, la tesis examinó de manera integral la influencia del tiempo, la temperatura y el empaque en los atributos fisicoquímicos de calidad de las conchas de vainilla. A través de un protocolo experimental que aplicó técnicas oficiales de análisis, se realizó un monitoreo sistemático, permitiendo entender detalladamente cómo estas variables afectan la actividad acuosa, contenido de humedad y cambio de peso durante el almacenamiento a diversas temperaturas y condiciones de empaque. Los antecedentes generales proporcionaron contexto sobre la importancia del pan en la industria alimentaria de México, resaltando la complejidad del proceso para determinar la vida útil de los alimentos. Además, se evidenció la influencia crítica de estos factores en los atributos fisicoquímicos, respaldado por análisis estadísticos y cálculos de parámetros termodinámicos y cinéticos. Este estudio ofreció una contribución valiosa al entendimiento de cómo las condiciones de almacenamiento afectan la calidad de las conchas de vainilla, proporcionando perspectivas fundamentales para optimizar prácticas en la industria alimentaria, respaldando la sostenibilidad y eficiencia en la gestión de productos alimentarios similares.

Actualmente, los productos de panificación se consideran alimentos “básicos”, debido a que han sustituido en gran parte a otros cereales como el arroz en la canasta básica y en la alimentación en todo el mundo, y México no es una excepción. La industria panificadora mexicana se distingue por su rica herencia cultural, fuertemente influenciada por España y Francia desde la llegada del pan con Hernán Cortés en el siglo XVI. Los españoles introdujeron principalmente la materia prima, el trigo, y las técnicas de panificación, mientras que los franceses aportaron su *savoir-faire* en la elaboración de panes y pastelería. Esta fusión de técnicas y tradiciones culinarias ha dado lugar a una industria panificadora única en México. Por ejemplo, las piezas más populares incluyen el bolillo, la telera, y una variedad de panes dulces y salados con formas, colores, sabores y texturas únicas, incluso ha tenido un impacto en las dietas de otros países.

Como resultado, la panadería mexicana es esencial en la economía, cultura y tradiciones del país, reportando al menos hasta el año 2017 un consumo anual per cápita de 33.5 kg de pan de los cuales un 30 % o 25 % corresponde a pan dulce, dichas cifras ayudan a comprender la importancia de los productos de panificación en la dieta y cultura mexicana. Este alto consumo se debe a la diversidad y tradición de la panadería en el país, donde el pan es consumido diariamente y es un elemento esencial en diversas festividades y celebraciones, manteniendo una preferencia por el pan fresco y sin conservantes. La producción de pan en México es mayormente artesanal, dominada por pequeñas y medianas empresas; sin embargo, también se cuentan con grandes conglomerados como el Grupo Bimbo.

Entre la gran variedad de pan una de las piezas más destacables es la “concha”, la cual es una de las variedades dulces más tradicionales y emblemáticas de la panadería mexicana, siendo un elemento común en la mesa de estas familias durante el desayuno y la cena. Su importancia cultural se refleja en su consumo cotidiano, a menudo acompañado de bebidas calientes. Además de su característica cobertura dulce que se marca con un molde para imitar la forma característica de una concha marina, su masa incluye ingredientes adicionales como azúcar, mantequilla y huevos, lo que

le confiere una textura suave y sabores únicos. Por otro lado, la relevancia económica y social de esta variedad es considerable ya que es uno de los productos más representativos de una industria que constituye una parte importante de la economía del país. Así es como la concha se presenta como un elemento cotidiano en la dieta de las familias mexicanas debido a que no solo satisface una necesidad alimentaria, sino que también es un símbolo de la creatividad y diversidad de la panadería mexicana, y su consumo refleja las costumbres y tradiciones culturales del país.

Este tipo de productos suelen considerarse perecederos debido a diversos factores que influyen en la vida útil (VU) del pan, algunos ejemplos son, el tiempo, la temperatura de almacenamiento, así como el empaque utilizado, entre otros. El almacenamiento en largos periodos de tiempo y a temperaturas bajas conduce a un aumento en la tasa de envejecimiento del pan o bien por su término en inglés “staling”, este fenómeno se refiere a los cambios físicos y químicos que experimenta el pan durante su almacenamiento en periodos de tiempo prolongados, las consecuencias del envejecimiento se suelen ver reflejadas principalmente en la disminución de la calidad sensorial y en la textura del producto. De igual manera este fenómeno se manifiesta en la pérdida de la suavidad y frescura del pan, así como en un aumento de la firmeza y la sequedad de la miga. El envejecimiento del pan es un proceso complejo que involucra la recristalización de almidones, la redistribución del agua en la miga, y cambios en la estructura molecular del almidón.

Existen factores externos que pueden influir en el desarrollo de el envejecimiento, entre estos se encuentra el tipo de empaque utilizado, puesto que si bien puede actuar como barrera ante condiciones exteriores tales como el oxígeno, microorganismos, humedad, materia extraña, entre otras, que pueden alterar significativamente el producto; si no se escoge un material ideal no habrá un efecto de conservación eficiente. Entre otras medidas, la inclusión de fibras y almidones resistentes en la formulación del pan pueden resultar contraproducentes ya que pueden afectar sus características físicas y su vida útil, lo que se refleja en la reducción del volumen específico y el aumento de la dureza.

Debido a esto, la realización de esta tesis se justifica en los efectos de la VU sobre la creciente preocupación sobre el desperdicio de alimentos, la seguridad alimentaria (SA) y la sostenibilidad de la industria de panificación. La investigación sobre la influencia de tiempo, temperatura y empaque en los atributos fisicoquímicos de calidad de concha(s) de vainilla (CV) adquiere relevancia al ofrecer una perspectiva crítica sobre cómo optimizar las condiciones de almacenamiento de este producto, lo que no solo contribuirá a reducir el desperdicio de alimentos, sino también a garantizar la seguridad alimentaria y a promover prácticas sostenibles en la industria de panificación, beneficiando así a la sociedad y al medio ambiente. Resaltando que el presente proyecto se elabora a petición de una microempresa panadera ubicada en la localidad de Pachuca de Soto, Hidalgo, México, con la cual se ha colaborado previamente.

Los resultados de esta investigación proporcionarán datos relevantes para contribuir al conocimiento de como interactúan los factores externos e internos de un producto de panificación así como el

efecto que tienen ciertos parámetros controlables sobre el empaque, almacenamiento, distribución y venta de productos como la CV o productos de características similares para la microempresa asociada u otras que deseen realizar un análisis de sus productos. Cabe destacar que de igual manera se proporcionan datos y análisis muestrales reales con posible aplicación para la modificación de la formulación del producto o del empaque.

Debido a los planteamientos anteriores, el objetivo general de esta tesis fue investigar la influencia durante el almacenamiento, de factores como el tiempo, la temperatura y el empaque sobre los atributos fisicoquímicos de calidad de las CV, mediante el monitoreo de la actividad de agua (*AW*), el contenido de humedad y el cambio de peso a temperaturas de 20, 30 y 40°C, con y sin empaque, con la finalidad de comprender cómo estas variables afectan la calidad y la VU de las CV durante el almacenamiento y proporcionar información valiosa para la optimización de las condiciones de conservación de este producto.

CAPÍTULO 1

Antecedentes generales: Panificación en México, calidad y desafíos en la vida útil del producto

Resumen

LA INDUSTRIA PANADERA EN MÉXICO representa un sector clave en la cultura y economía del país, esta industria constantemente enfrenta desafíos para mantener la calidad y vida útil (VU) del pan y sus subproductos, estos desafíos impactan directamente en la seguridad alimentaria (SA) y los hábitos de consumo. El objetivo de este capítulo es explorar y describir la historia y las prácticas actuales de la panificación en México así como los desafíos asociados, para comprender cómo los ingredientes, procesos y tecnologías de conservación que influyen en la calidad y VU del pan y su impacto en la cultura alimentaria y economía mexicanas. Entre los aportes más importantes, se destaca la relevancia del pan en la vida cotidiana y festividades mexicanas, con un consumo promedio de 33.5 kg por persona al año, y la preferencia por la producción artesanal, que representa aproximadamente el 80 % de la producción total de pan. Además, se subraya la importancia de la mejora genética del trigo para la industria panificadora y cómo esto ha contribuido al aumento en el rendimiento promedio del trigo mexicano, materia prima para la producción de pan. Los desafíos identificados incluyen el entendimiento de la VU como un proceso multifacético que involucra numerosos factores, reconociendo el papel significativo de la temperatura en la aceleración de reacciones químicas, bioquímicas, físicas y microbiológicas que influyen en la reducción de VU de los alimentos. En conclusión, este capítulo proporciona una comprensión integral de la panificación en México, resaltando la importancia de la mejora continua en los procesos y tecnologías para optimizar la calidad y extender la VU del pan, manteniendo sus características para preservar su relevancia cultural y satisfaciendo las demandas del mercado y consumidor.

1.1. Introducción

Hoy en día el trigo cultivado en territorio mexicano ofrece beneficios propios que a su vez influyen en la producción de harinas y pan, por ejemplo, la resistencia genética del trigo mexicano a la roya de la hoja hasta 2001 resalta el cultivo de larga data y la importancia del trigo en México (Delgado-Sánchez et al., 2022). Sin embargo, en México, la idea de hacer pan con harina de trigo se puede situar en la época pre colonial con la preparación de tamales, que si bien todavía no son considerados pan, constituyen un antecedente del uso de masa para la creación de otro alimento. La masa que se utilizaba hasta ese entonces era de maíz, lo cual cambio tras la introducción de otros cereales como el trigo al territorio después de la colonización española. El pan se solía preparar en conventos, usualmente hecho por mujeres indígenas quienes potencialmente aprendieron las recetas y empezaron a prepararlo por su cuenta, combinando o inventando variedades de pan que fusionaban las costumbre culinarias mexicanas, españolas y en ocasiones Francesas (Morales Quezada, 2018).

Factores históricos y culturales más amplios también influyen en la evolución de la elaboración del pan en México. El uso de tubérculos como el camote y la yuca en la cocina mexicana, costumbres heredadas de las culturas prehispánicas, muestra las arraigadas tradiciones culinarias que han dado forma a las prácticas alimentarias del país, incluida la elaboración de pan en las que estos elementos se pueden presentar como parte de la formulación del pan o relleno del mismo (Meléndez Guadarrama & Hirose López, 2018). Además, la complejidad urbana de la Ciudad de México, construida sobre la ciudad prehispánica de Tenochtitlán, refleja las intrincadas capas de historia e intercambio cultural que han contribuido al desarrollo tanto de la cultura mexicana como de su gastronomía y por lo tanto de la panificación en México (Tirado De Salazar, 2020). En la época contemporánea, la incorporación de diversos ingredientes, como la harina de polen, algunas legumbres o incluso de otros cereales en la elaboración de pan refleja la continua búsqueda de innovación y adaptación de la producción de pan mexicano, atendiendo a las cambiantes preferencias de los consumidores y las tendencias culinarias (Lazcano-Hernandez et al., 2019). Esto demuestra la naturaleza dinámica de la elaboración de pan en México, que continúa evolucionando en respuesta a las cambiantes necesidades y preferencias de la sociedad.

La importancia cultural y económica del pan en México es polifacética y está profundamente arraigada en la historia y las tradiciones del país. Desde una perspectiva cultural, el pan tiene un simbolismo significativo en la cocina y las reuniones sociales mexicanas. Es un alimento básico que se ha integrado en diversos platos tradicionales y juega un papel central en las celebraciones religiosas y familiares. La importancia del pan se extiende más allá de su valor culinario, ya que también está entrelazado con rituales y prácticas curativas indígenas, lo que refleja la diversidad cultural y el patrimonio de México (Ramos Valencia, 2023).

La introducción de pan a la gastronomía mexicana puede considerarse como un intento de los españoles por colonizar los usos y costumbres de los indígenas, aunque fue un proceso lento y que

no terminó sustituyendo el consumo de productos como la tortilla, poco a poco se fue convirtiendo en parte de la dieta cotidiana de los mexicanos, al punto que para el siglo XVIII se estimaba que tan solo en ciudad de México se consumían cantidades de trigo similares a las de varias ciudades Europeas, eventualmente las panaderías fueron tomando su lugar en la cultura gastronómica del país. Posteriormente durante la invasión francesa y el imperio de Maximiliano de Habsburgo, se introdujeron las tradiciones y técnicas panaderas francesas y austriacas; todo esto demuestra lo estrecha que es la relación entre la historia del país y la industria panadera, posicionando al pan y sus derivados como un punto de unión entre culturas (Weis, 2012). Quizás uno de los mejores ejemplos sobre la importancia cultural del pan, es el pan de muerto, Figura 1.1. Se dice que dicho alimento solía prepararse con un pan de amaranto molido mezclado con sangre, preparación que fue modificada tras la colonización, en la que se comenzó a usar pan de trigo y azúcar pintada de rojo, convirtiendo al pan de muerto en un ejemplo claro del mestizaje de culturas que sobrevive incluso hoy en día, además de un elemento gastronómico icónico del país (Díaz Madurga, 2023).

Económicamente, la producción y el consumo de pan contribuyen sustancialmente a la economía del país. La interconexión de la industria del pan con otros sectores de la economía, como la agricultura, el transporte y el comercio minorista, subraya su importancia económica. Además, la demanda de pan estimula la actividad económica y las oportunidades de empleo, particularmente en los sectores agrícola y manufacturero. Esto se alinea con los hallazgos de (2019), quienes enfatizan las relaciones interindustriales y los encadenamientos productivos que genera el sector turístico en México, arrojando luz sobre el impacto económico de la producción y el consumo de pan (Arriaga Navarrete & González Pérez, 2019). La industria panificadora en México, en la que también se considera la producción de tortillas, supone una parte importante al producto interno bruto mexicano, reportando tan solo en el primer trimestre del año 2023 un aporte de \$5.48B MX (Data México, 2023).

Además, el consumo de pan refleja el comportamiento del consumidor y los patrones de gasto, lo que influye en la dinámica del mercado de alimentos y contribuye al panorama económico general. Las implicaciones económicas del consumo de pan también son evidentes en su papel como fuente de sustento para numerosos individuos involucrados en su producción, distribución y venta, contribuyendo así al desarrollo socioeconómico del país (Sánchez Carrera et al., 2021).

El pan durante su almacenamiento puede verse afectado por varios factores que afectan su VU, estos factores suelen estar sujetos a cambios microbiológicos, como el enmohecimiento o aparición de hongos en el pan, deterioro microbiológico o bien deterioro por levaduras; o bien, fenómenos fisicoquímicos como el envejecimiento del pan que a su vez implica cambios sensoriales como endurecimiento de la miga y pérdida de frescura en la corteza (Pateras, 2007).

Tomando en cuenta lo anterior planteado, el objetivo de este capítulo fue explorar y describir la historia, las prácticas actuales y los desafíos asociados con la panificación en México, creando y analizando una relación con cómo los ingredientes, procesos y tecnologías de conservación afectan la



Figura 1.1: Pan de muerto.

calidad y la VU del pan, para así lograr comprender mejor el impacto de los productos de panificación en la gastronomía mexicana y la economía del país.

1.2. Definición del pan

Según la NOM-247-SSA1-2008, el pan blanco es el producto que resulta de hornear una masa obtenida de harina fermentada, agua y sal, acondicionadores y mejoradores de masa, adicionado o no de aceites y grasas comestibles, leche, otros ingredientes y aditivos para alimentos.

El pan es el producto perecedero resultante de la cocción de una masa obtenida por la mezcla de harina de trigo, sal comestible y agua potable, fermentada por especies propias de la fermentación panadera, como *Saccharomyces cerevisiae* (Mesas & Alegre, 2002).

1.3. Clasificación del pan

Las distintas variedades de pan se pueden clasificar en dos grupos, la primera clasificación se basa en el cereal de procedencia de la harina con la que se elabora el pan, mientras que la segunda clasificación hace referencia al proceso de elaboración (Aquiye García et al., 2021). Estas clasificaciones podrían ser las más comunes y las que ejemplifican de manera más práctica la información para esta investigación.

Según la procedencia de la harina:

1. **Pan de trigo:** El pan elaborado con trigo posee un sabor muy agradable, una textura tierna y puede ser de 2 tipos: pan blanco o pan integral, la diferencia principal es si el tipo de harina es refinada o no, y por lo tanto, la cantidad de kcal que aportan al producto.
2. **Pan de centeno:** Posee una apariencia más compacta, debido a su bajo contenido de gluten, además tiene un sabor amargo y una apariencia oscura, usualmente se mezcla con otros tipos de harina para darle esponjosidad.
3. **Pan de cebada:** Posee un sabor menos intenso y es más compacto en comparación al pan de trigo, además de poseer una menor cantidad de gluten, no se considera apto para personas celíacas.
4. **Pan de avena:** Es uno de los panes con mejores valores nutricionales, además de ser ligeramente dulce, suave y denso es el más popular, y como su nombre lo dice, el principal ingrediente es la avena.
5. **Pan de maíz:** Esta variedad de pan suele tener un sabor dulce y una textura más dura a diferencia de otros panes, además resulta ser fácil de diferenciar debido al color amarillento que presenta, no contiene gluten y tiene un bajo nivel de purinas.

6. **Pan de soja:** Esta variedad de pan no contiene gluten, además es muy común que se combine con otros tipos de harina para lograr una mejor consistencia en la masa.
7. **Pan de espelta:** Contiene menos calorías que el tradicional, pero posee más fibra lo que permite facilitar la digestión y previene el estreñimiento.
8. **Pan de arroz:** pan muy popular en Japón, y países asiáticos, la miga del pan es densa, blanca y no posee gluten. Dicho pan tiene un alto contenido de almidón y un bajo contenido de proteínas.
9. **Pan de mijo:** Este pan posee un alto contenido proteínico, fibra y minerales como el magnesio y el hierro, además de que no contiene gluten.
10. **Pan de quinoa:** Es libre de gluten y posee un elevado nivel de proteínas, vitaminas, minerales y aminoácidos.

Según el proceso de elaboración:

1. **Panes sin levadura ni fermentación:** Se necesita el aporte de un gasificante (bicarbonato sódico + ácido tartárico) para lograr que la masa esponje. Este tipo de panes no contienen masa madre, ni levadura, algunos de ellos son: rati, chapati, paratha, puri, piadina, obleas
2. **Panes fermentados planos:** Algunos se colocan sobre placas, planchas o piedras calientes y en algunas civilizaciones suelen aplastar la masa contra las paredes de los hornos, algunos ejemplos son: pita, barbanilavash, regañá, focaccia, pizza
3. **Panes fermentados voluminosos:** En esta clasificación se ubica el pan francés y la mayoría de los panes europeos.

Hay referencias como el Código Alimentario Español , que ofrecen otro tipo de clasificación, demostrando la gran variedad de formas que tiene este alimento (Mesas & Alegre, 2002):

1. **Pan común:** Producto elaborado con harina de trigo, sal, levadura y agua, al que se le pueden añadir ciertos coadyuvantes tecnológicos y aditivos autorizados, y se divide en:
2. **Pan bregado:** De miga dura, español o candeal, es el elaborado con cilindros refinadores.
3. **Pan de flama:** O de miga blanda, es el obtenido con una mayor proporción de agua que el pan bregado y normalmente no necesita del uso de cilindros refinadores en su elaboración.
4. **Pan especial:** Es aquel que, por su composición, por incorporar algún aditivo o coadyuvante especial, por el tipo de harina, por otros ingredientes especiales (leche, huevos, grasas, cacao, etc.), por no llevar sal, por no haber sido fermentado, o por cualquier otra circunstancia autorizada, no corresponde a la definición básica de pan común.
5. **Pan integral:** Es aquel en cuya elaboración se utiliza harina integral, es decir, la obtenida por trituración del grano completo, sin separar ninguna parte del mismo.

6. **Pan de Viena:** O pan francés, es el pan de flama que entre sus ingredientes incluye azúcares, leche o ambos a la vez.
7. **Pan de molde:** O americano, es el pan de corteza blanda en cuya cocción se emplean moldes.
8. **Pan de cereales:** Es el elaborado con harina de trigo más otra harina en proporción no inferior al 51 %. Recibe el nombre de este último cereal. Ejemplo: pan de centeno, pan de maíz, etc.
9. **Pan de huevo:** Pan de leche, pan de miel y pan de pasas, etc., son panes especiales a los que se añade alguna de estas materias primas, recibiendo su nombre de la materia prima añadida.

1.4. Ingredientes para la elaboración del pan

Los ingredientes utilizados en la elaboración del pan son fundamentales para determinar las características finales del producto. La harina es el ingrediente principal y proporciona la estructura y la mayor parte de los sólidos del pan, la harina es la base de cualquier pan, en cuanto al pan hecho a base de harina de trigo se puede notar que existen diferentes grados de calidad dependiendo de las necesidades del producto, los grados se clasifican según el porcentaje de proteínas que contenga, usualmente se utiliza harina con un contenido de 14 % con capacidad de absorción de agua del 62 al 64 %. También se consideran los agentes leudantes, para que un producto de panificación se expanda durante su horneado es necesario que se produzcan gases y vapores, usualmente CO₂, cuando se utilizan levaduras este gas es producido debido a la fermentación, la cepa utilizada es *Saccharomyces cerevisiae*, la levadura es esencial para la fermentación, que influye en el volumen y la textura del pan; sin embargo, existen agentes leudantes químicos que también son comúnmente usados, como el bicarbonato de sodio, bicarbonato de potasio y bicarbonato de amonio, estos tienen su contraparte acidulante que puede ser ácido láctico, ácido acético o ácido cítrico, estos serán escogidos dependiendo de su contraparte, otro agente leudante es el polvo para hornear. El agua actúa como medio para la hidratación de la harina y la activación de la levadura. La sal no solo proporciona sabor, sino que también regula la fermentación y fortalece la estructura de la masa. Además, otros ingredientes como grasas, azúcares, leche, huevos, semillas, frutos secos, entre otros, pueden ser utilizados para enriquecer el sabor, la textura y el valor nutricional del pan (Edwards, 2007).

La calidad de los ingredientes es clave, ya que puede afectar la consistencia y las propiedades finales del pan. Por ejemplo, la calidad de la harina, que depende del contenido de proteínas y gluten, influye en la capacidad de retención de gas y la estructura del pan. La levadura fresca o seca utilizada debe estar activa para garantizar una fermentación adecuada. Asimismo, la adición de otros ingredientes, como frutas, frutos secos o granos enteros, puede requerir ajustes en la formulación y el proceso de elaboración del pan (Roman & Martínez, 2019).

1.5. Historia del pan en México

La historia del pan en México es una rica amalgama de tradiciones y culturas que se remonta a la época prehispánica, aunque el pan como lo conocemos hoy, que generalmente es hecho a base de harina de trigo, fue introducido por los españoles durante la conquista en el siglo XVI. Antes de esto, las civilizaciones indígenas mexicanas se alimentaban principalmente de maíz, pero no conocían el pan de trigo. Con la llegada de los españoles, el trigo se introdujo en la dieta mexicana, y con él, las técnicas europeas de panificación. La influencia española fue predominante en los primeros años de la colonización, pero con el tiempo, la panadería mexicana comenzó a adquirir su propio carácter distintivo. Los panaderos mexicanos empezaron a experimentar con ingredientes locales y a adaptar recetas europeas a los gustos y recursos disponibles en la región. Esto dio lugar a una variedad de panes únicos en México, como el bolillo, la telera y la concha, que se han convertido en elementos básicos de la dieta mexicana. La concha, en particular, es un pan dulce que se ha convertido en un símbolo de la panadería mexicana. Su cobertura crujiente y su forma característica, que recuerda a una concha marina, lo hacen inconfundible, Figura 1.2. Este pan es un elemento esencial en el desayuno y la merienda de muchas familias mexicanas y se disfruta a menudo con chocolate caliente o café. Parte de lo más reconocible de este pan es su textura esponjosa y suave, que se debe a parte de sus ingredientes como la sal, el azúcar y la mantequilla (Osorio-Diaz et al., 2014).



Figura 1.2: Concha tradicional con cobertura de vainilla y de chocolate.

A lo largo de los siglos, la panadería mexicana ha continuado evolucionando, y hoy en día, la industria está compuesta por una mezcla de pequeñas panaderías artesanales y grandes empresas como el Grupo Bimbo. La producción artesanal sigue siendo predominante, y muchas panaderías familiares han pasado sus recetas y técnicas de generación en generación. El consumo de pan en México es significativo, con un promedio de 33.5 kg de pan de harina y derivados dulces por persona al año. Este alto consumo refleja la importancia del pan en la vida cotidiana y en las festividades mexicanas. El pan no solo es un alimento básico, sino que también juega un papel central en eventos sociales y festivos, donde se elaboran panes especiales que reflejan la diversidad cultural y gastronómica del país ([Secretaría de Economía, 2017](#)).

La industria panificadora en México es diversa y dinámica, con una producción que se distribuye entre pequeñas panaderías artesanales y grandes empresas industriales. A pesar de los desafíos económicos y los cambios en los hábitos de consumo, la industria ha mantenido su relevancia, con ventas que ascienden a alrededor de 10,000 millones de dólares estadounidenses. La panadería artesanal representa aproximadamente el 80 % de la producción total de pan en México, lo que subraya la preferencia de los consumidores por productos frescos y tradicionales en contraste con aquellos producidos por grandes empresas. Parte de la industria panificadora en México es la producción de las materias primas como el trigo, en referencia a esto, la mejora genética del trigo ha sido fundamental para la industria panificadora mexicana, con instituciones como el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) y el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) trabajando en el desarrollo de variedades de trigo con características de calidad industrial deseables. Esto ha permitido un aumento en el rendimiento promedio del trigo mexicano, pasando de 740 kg/ha en 1940 a 4480 kg/ha en 2004, lo que ha contribuido significativamente a la industria panificadora del país ([Osorio-Díaz et al., 2014](#)).

1.5.1. Industria mexicana de panificación

La industria mexicana de panificación es un sector clave en la economía y cultura del país, destacándose por su rica historia y diversidad, la panadería mexicana ofrece una amplia gama de panes, tanto dulces como salados, que se caracterizan por sus formas, colores, sabores y texturas únicos. La producción es predominantemente artesanal, con una gran cantidad de pequeñas y medianas panaderías que contribuyen a la mayoría de la producción, aunque también hay grandes empresas como Grupo Bimbo que tienen una presencia significativa en el mercado. Los tipos de pan más populares en México incluyen el bolillo, la telera, la concha y diversos panes dulces, que son consumidos diariamente por la población. El consumo per cápita de pan de harina y derivados dulces es de 33.5 kg anuales, lo que refleja la importancia del pan en la dieta mexicana. Además, la industria panificadora mexicana se distingue por su preferencia por el pan fresco y sin conservantes, y es conocida por su capacidad para crear panes especiales para eventos y festivales específicos. La industria no solo satisface las necesidades alimentarias locales, sino que también ha influenciado las dietas en otros países, demostrando su relevancia global ([Osorio-Díaz et al., 2014](#)).

1.5.2. Consumo de pan en México

Hasta 2019 según la Cámara Nacional de la Industria Panificadora (CANAINPA), el consumo per cápita anual de pan fue de 33.5 kg, del cual entre el 70 % y 75 % corresponde al pan blanco, y el restante 30 % ó 25 %, a pan dulce, galletas y pasteles ([Abastur, 2019](#)).

Datos más recientes sobre elaboración y comercialización de productos de panadería y tortillas, en el primer trimestre de 2023 se registró un producto interno bruto de \$5.48B MX, evidenciando un alza de 0.93 % con respecto al trimestre anterior ([Secretaría de Economía, 2017](#)).

1.5.3. Principales tipos de productos de panificación en México

Los principales tipos de productos de panificación en México se pueden dividir en dos categorías: pan dulce y pan salado. El pan dulce es especialmente diverso tal como lo muestra la Figura 1.3 , con alrededor de 1,200 variedades que incluyen al objeto de este estudio que es la concha. Los panaderos mexicanos son conocidos por su creatividad, produciendo panes dulces con una variedad de formas, tamaños, sabores, texturas y colores, utilizando ingredientes diversos y a menudo regionales. El pan salado, por otro lado, incluye alrededor de 400 variedades y es un alimento básico en la dieta mexicana. El bolillo, la telera y el birote son algunos de los tipos más comunes de pan salado, conocidos colectivamente como pan de labranza, y su nombre puede variar según la región del país. Estos panes se consumen típicamente en el desayuno y son la base para la “torta”, un tipo de sándwich muy popular en México. La influencia francesa es evidente en la panificación mexicana, ya que en algunas regiones el pan blanco o salado se conoce como pan francés, y en otras se le llama bolillos, teleras o *baguettes*. La diversidad de panes en México es notable, con aproximadamente 1,600 tipos de pan, lo que podría representar la mayor variedad de panes en el mundo. Esta diversidad se debe a las diferentes culturas regionales que aportan sus propios tipos de pan ([Osorio-Díaz et al., 2014](#)).

1.5.4. Pan dulce en México

El pan de dulce en México es una parte integral de la cultura y las tradiciones culinarias del país. Con una influencia histórica de países europeos como España y Francia, la panadería mexicana ha desarrollado una amplia variedad de panes dulces, cada uno con formas, colores, sabores y texturas únicos. Entre los más populares se encuentran la concha, así como otros panes como el bolillo y la telera, que también son consumidos con frecuencia. Además de las variedades de pan dulce que se venden en panaderías tradicionales o diversas tiendas, existen panes que son característico de fiestas o costumbres mexicanas, entre estos esta el pan de feria, que como su nombre indica son comercializados en ferias usualmente ofrecidas a santos de las regiones en las que se celebran, estos son adornados coloridamente y ofrecen diversos sabores como nuez, vainilla y nata, son de textura suave; el pan de muerto es un tipo de pan que sirve para más de un propósito en la tradición



Figura 1.3: Canasta de pan dulce, muestra de la gran variedad de pan.

mexicana del Día de Muertos, ya que además de consumirlo sirve como elemento del tradicional altar de muertos, hoy en día el pan de muertos es un pan de trigo redondo, la masa se suele acomodar en la parte superior en tiras con protuberancias que pretenden imitar huesos y en la punta una bola que representa el cráneo, además de que es cubierto con azúcar granulada, su sabor es dulce y a veces es saborizado con naranja; otra variedad representativa de las tradiciones es la rosca de reyes ilustrada en la Figura 1.4, la variedad consumida en México fue resultado de mestizaje de culturas siendo la otra parte la cultura española, este pan es decorado con ate de frutas (un dulce tradicional mexicano) y mantequilla, en su interior usualmente hay muñecos de plástico que representan al niño Jesús de la religión católica (Morales Quezada, 2018; Osorio-Diaz et al., 2014). Otro pan típico de México son las piojosas (Figura 1.5).



Figura 1.4: Tradicional rosca de reyes mexicana.



Figura 1.5: Piojosas.

La producción de pan de dulce en México es mayoritariamente artesanal, llevada a cabo por una multitud de pequeñas y medianas panaderías que mantienen vivas las técnicas tradicionales de panificación. Sin embargo, la industria también cuenta con la presencia de grandes empresas como Grupo Bimbo, que tienen un impacto significativo en el mercado. El consumo de pan de dulce es una tradición cotidiana en México, con una preferencia por productos frescos y sin conservantes, algunos de estos productos se pueden observar en la Tabla 3.1. El consumo anual de pan de harina y derivados dulces es de 33.5 kg por persona, lo que subraya la importancia del pan de dulce en la dieta mexicana. Además, la industria panificadora mexicana no solo satisface las necesidades locales, sino que también ha influenciado las dietas en otros países, demostrando su relevancia global (Osorio-Díaz et al., 2014).

Tabla 1.1: Características del pan mexicano por diversas regiones.

Tipo de pan	Características	Nombre del pan
Esponjado en forma de hojaldre	Incorporado con azúcar con miga de hojaldras pequeñas	Bísquet, cuadro o barra
Esponjado suave homogéneo	Con azúcar y miga esponjada, se adorna con frutilla, chispas de chocolate, nueces, almendras o con algún glaseado	Panques, magdalenas
Compacto semiduro homogéneo	Azucarado de miga compacta y corteza semidura	Trenza de canela, roscas planas, piedras, ladrillos, cochinitos
Compacto duro homogéneo	Azucarado de miga y corteza dura	Todos los tipos de galleta
Compacto desmoronable homogéneo	De miga desmoronable y corteza dura	Polvorones
Compacto laminado	Azucarado de miga en forma de láminas (feite), se decoran con azúcar caramelizada, azúcar glass, coco o mermelada	Banderillas, trenzas, campechanas, orejas, empanadas

1.6. Pan tipo concha

El pan tipo concha es uno de los panes dulces más emblemáticos de la panadería mexicana, reconocido por su cobertura azucarada que imita la forma de una concha marina. Este pan es comúnmente encontrado en las mesas de desayuno de las familias mexicanas y se disfruta tradicionalmente

con chocolate caliente. La masa de la concha es suave y esponjosa, y se elabora con ingredientes adicionales como azúcar, mantequilla y huevos, que contribuyen a su textura única. Una vez que la masa está lista, se toma un pequeño pedazo y se cubre con una pasta dulce hecha con diferentes sabores. Luego, se utiliza un molde para marcar la forma característica de concha en la cobertura. La cobertura de la concha puede variar en color, incluyendo opciones como chocolate, blanco, amarillo y rosa, lo que hace a este pan muy atractivo visualmente. La creatividad de los panaderos mexicanos se refleja en la diversidad de sabores y colores que se pueden encontrar en las conchas, haciendo de cada una una pieza única dentro de la rica tradición de la panificación en México (Osorio-Diaz et al., 2014).

1.6.1. Proceso de elaboración de las conchas

El proceso general para elaborar pan implica una serie de pasos fundamentales que influyen en la calidad y características del producto final. Inicialmente, la selección de ingredientes de alta calidad, como la harina de trigo, el agua, la levadura y la sal, es clave para el éxito del proceso (Callejo et al., 2019). La mezcla de estos ingredientes, junto con la fermentación, es un paso crítico que influye en la formación de la estructura de la miga y el desarrollo del sabor del pan (Hernández-Parada et al., 2022; Nionelli & Rizzello, 2016).

El amasado es una etapa importante que contribuye a la formación del gluten, lo que a su vez influye en la textura y la capacidad de retención de gas del pan (Murat Karaoğlu & Gürbüz Kotancilar, 2006). Posteriormente, el proceso de fermentación permite que la masa desarrolle su sabor característico y su estructura porosa (Lhomme et al., 2016). La formación de la corteza durante el horneado es esencial para la retención de la forma y la textura del pan (Purlis & Salvadori, 2009). Además, la temperatura y el tiempo de horneado son factores críticos que influyen en la formación del color y el sabor del pan (Nivelle et al., 2017).

La utilización de diferentes técnicas, como el par-horneado y el almacenamiento en refrigeración, puede afectar la calidad y la VU del pan (Murat Karaoğlu & Gürbüz Kotancilar, 2006). La adición de ingredientes especiales, como fibras dietéticas, granos enteros o colorantes naturales, puede modificar las propiedades nutricionales y sensoriales del pan (Francavilla & Joye, 2022; Gamel et al., 2023; Sabanis et al., 2009). Además, la optimización de variables de proceso, como la temperatura y la humedad, puede influir en las características de calidad del pan (Olurin et al., 2021).

1.7. Desafíos en la vida útil del pan: Implicaciones para la calidad y sostenibilidad

Los factores que influyen en la VU del pan suelen evolucionar dependiendo del tiempo, temperatura de almacenamiento, formulación del pan, así como el empaque utilizado, entre otros factores externos, estos factores pueden expresar sus efectos de manera individual o bien conjunta. El almacenamiento

a largo plazo y a temperaturas más bajas, sin llegar a temperaturas de congelación, conducen a un aumento en la tasa de envejecimiento del pan, esto implica principalmente la retrogradación de almidones y redistribución del agua, lo que se manifiesta en cambios en la textura y la calidad sensorial. Además, el tipo de empaque desempeña un papel crítico en la preservación del pan, ya que el uso de materiales adecuados con barrera de oxígeno puede prevenir el deterioro microbiano y la alteración del producto (Upasen & Wattanachai, 2018). De igual manera, la inclusión de fibras y almidones resistentes en la formulación del pan puede afectar sus características físicas y su VU, lo que se refleja en la reducción del volumen específico y el aumento de la dureza (Rosell & Santos, 2010).

Asimismo, la adición de conservantes químicos y etanol ha demostrado tener un efecto sinérgico en la prolongación de la VU del pan al prevenir el deterioro microbiano (Katsinis et al., 2008). Por otro lado, la calidad del pan se ve influenciada por la adición de ingredientes como fibras, leudantes biológicos y otros componentes, lo que puede afectar la digestibilidad de las proteínas, la estructura de la miga y la VU del producto (Venturi et al., 2021). Como se ha mencionado el envejecimiento del pan, también conocido por su término en inglés como “staling”, se refiere a los cambios físicos y químicos que experimenta el pan con el tiempo, lo que resulta en una disminución de su calidad sensorial y textura, lo cual se manifiesta en la pérdida de la suavidad y frescura del pan, así como en un aumento de la firmeza y la sequedad de la miga. El envejecimiento del pan es un proceso complejo que involucra la recristalización de almidones, la redistribución del agua en la miga, y cambios en la estructura molecular del almidón, lo que afecta la textura y la palatabilidad del producto final, se considera un problema constante en la industria y a pesar de que se ha estudiado por varios años aún no se tiene una solución universal, pues el fenómeno dependerá enteramente de las características del producto y sus condiciones de almacenamiento (Mihhalevski et al., 2012; Miyazaki et al., 2004; Tasiguano et al., 2019).

La velocidad de envejecimiento del pan está influenciada por varios factores, como la composición de la harina, la presencia de enzimas, la adición de aditivos alimentarios, y las condiciones de almacenamiento. Por ejemplo, la recristalización de almidones es un factor clave en el envejecimiento del pan, y se ha observado que la presencia de ciertos aditivos, como la glucosa oxidasa, puede retardar este proceso al afectar la estructura del almidón (Alasino et al., 2011; Tasiguano et al., 2019). Asimismo, la adición de ingredientes como fibras, almidones resistentes, y emulsificantes puede influir en la velocidad de envejecimiento del pan al modificar la interacción entre los componentes de la masa y la miga (Mihhalevski et al., 2012).

Los alimentos suelen ser considerados una matriz en donde ocurren fenómenos químicos, bioquímicos, microbiológicos y físicos que suelen interactuar entre ellos, provocando indicadores de calidad basados en estas reacciones no sean constantes, cambiando con el tiempo y siendo afectados por factores externos al alimento, por la naturaleza de estas interacciones es posible abordarlas desde un punto de vista cinético, que trasladado a un modelo cinético enfocado a alimentos permite el entendimiento, predicción y control del comportamiento del deterioro de un alimento basado en

diversas variables de estudio ajustadas a cada caso ([Van Boekel, 2008](#)).

Puntualmente, el uso de modelos cinéticos en la ciencia de los alimentos es necesario para comprender y optimizar diversos procesos relacionados con la producción, conservación y calidad de los alimentos. Este modelado implica la aplicación de técnicas matemáticas y estadísticas para describir y predecir los cambios que ocurren en los componentes y propiedades de los alimentos a lo largo del tiempo. Por ejemplo, la importancia del modelado cinético en formulaciones de pan sin gluten reside en comprender los efectos de los hidrocoloides en la reología de la masa y los parámetros de calidad del pan, destacando su importancia para mejorar la estructura, la sensación en boca, la aceptabilidad y la VU del pan sin gluten, todos parámetros de importancia para la introducción de un nuevo producto al mercado ([Lazaridou et al., 2007](#)).

Además, el modelado cinético ha sido fundamental para estudiar el impacto de diferentes factores en la calidad y VU del pan. Por ejemplo, el uso de análisis de modelos estadísticos para optimizar el fermento láctico con harina de quinua como alternativa bioconservante para pan envasado, demostrando el potencial del modelado cinético para predecir la mejora de la VU del pan mediante el uso de conservantes naturales ([Dallagnol et al., 2015](#)). De manera similar, se ha demostrado que se puede emplear modelos matemáticos para estudiar la pérdida de peso de la corteza del pan tostado durante el proceso de horneado basados en factores del proceso como la temperatura, destacando la utilidad de los modelos cinéticos para comprender y controlar los cambios relacionados con el horneado que afectan la calidad del pan ([Mohammadi Golchin et al., 2021](#)).

Igualmente, este tipo de modelado se ha aplicado para optimizar el proceso de elaboración de pan, utilizando modelos matemáticos adecuados para la cinética de envejecimiento para establecer relaciones entre la reología de la masa, la VU y las características sensoriales del pan, enfatizando el papel del modelado cinético en optimización de procesos y control de calidad ([Razavizadegan Jahromi et al., 2014](#)). Además, de utilizar un sistema modelo para estudiar la cinética de reacción de entrecruzamiento de gliadina-glutenina en la elaboración de pan, mostrando la aplicación del modelado cinético para comprender las reacciones fundamentales que influyen en la calidad del pan ([Lagrain et al., 2008](#)).

Su importancia radica en la predicción y control de la calidad de los alimentos radica en su capacidad para describir y predecir las transformaciones que experimentan los alimentos durante su procesamiento, almacenamiento y consumo. Este enfoque es fundamental para comprender y optimizar procesos como la inactivación de patógenos, la digestión de alimentos, la formación de compuestos aromáticos y la generación de subproductos no deseados, como acrilamida y furano, durante el procesamiento térmico y la fritura ([Mariotti-Celis et al., 2017](#); [Martins et al., 2000](#); [Parker et al., 2012](#); [Srivastava et al., 2018](#); [Wang & Wang, 2006](#)). Además, el modelado cinético es esencial para predecir la bioacumulación de contaminantes en la cadena alimentaria, lo que permite evaluar los riesgos asociados con la presencia de compuestos tóxicos en los alimentos ([Bermúdez-Aguirre & Corradini, 2012](#)). Sin embargo, el modelado cinético en la ciencia de los alimentos presenta desafíos significativos debido a la complejidad inherente de los alimentos, la variabilidad biológica y las

interconexiones entre múltiples reacciones. La diversidad de matrices alimentarias, la presencia de componentes biológicos activos y la influencia de factores ambientales dificultan la modelización precisa de los procesos cinéticos en los alimentos (Bermúdez-Aguirre & Corradini, 2012; Martins et al., 2000; Pinon et al., 2004). Además, la variabilidad en la composición de los alimentos y la interacción entre múltiples reacciones químicas y bioquímicas plantean desafíos para la predicción precisa de la calidad y seguridad de los alimentos. A pesar de estos desafíos, el modelado cinético sigue siendo una herramienta invaluable para la industria alimentaria, ya que proporciona información relevante para el diseño de procesos, la optimización de la calidad de los alimentos y la evaluación de riesgos. La integración de enfoques computacionales avanzados, como el uso de redes neuronales y modelos de aprendizaje automático, está abriendo nuevas oportunidades para abordar la complejidad de los sistemas alimentarios y mejorar la precisión de las predicciones cinéticas (Hernández-Pérez et al., 2004). Además, el desarrollo y validación de protocolos experimentales específicos para la modelización cinética en alimentos son fundamentales para garantizar la fiabilidad y aplicabilidad de los modelos.

1.8. Conclusión

Este capítulo ha cumplido con el objetivo de explorar y describir la historia, las prácticas actuales y los desafíos asociados con la panificación en México. Se ha destacado la importancia del pan en la cultura y economía mexicanas, y se ha reflejado su papel central en la vida cotidiana y festividades. La producción artesanal, que representa aproximadamente el 80 % de la producción total de pan, subraya la preferencia de los consumidores por productos frescos y tradicionales, mientras que la mejora genética del trigo ha contribuido significativamente a la industria panificadora del país. Por otro lado, se ha reconocido la influencia de factores como la selección de ingredientes de alta calidad, el procesamiento y el empaque en la estabilidad y vida útil del producto. La utilización de modelos cinéticos, como los modelos de Arrhenius y Gompertz modificados, es esencial para predecir la vida útil y establecer fechas de caducidad basadas en criterios de calidad. Este análisis proporciona una base para futuras investigaciones y desarrollos en la industria panificadora que busquen optimizar la calidad y extender la vida útil del pan, manteniendo su relevancia cultural y satisfaciendo las demandas del mercado.

1.9. Referencias

- Abastur. (2019). *Del horno a los negocios: la industria panificadora en México*. <https://www.abastur.com/es/blog/del-horno-a-los-negocios-la-industria-panificadora-en-mexico.html>.
- Alasino, M. C., Osella, C. A., De La Torre, M. A., & Sánchez, H. D. (2011). Efecto de Oxidantes y Emulsionantes sobre la Calidad del Pan elaborado con incorporación de Harina de Arvejas

- (*Pisum sativum*) inactivadas Enzimáticamente. *Información Tecnológica*, 22(1), 41–50. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642011000100006>
- Aquije García, C. F., Cisneros Pasco, C. I., Lavallo Ortiz, M. J., Salazar Eneque, I. E., & Servigón Echeverría, S. T. (2021). *Diseño de Planta de Producción de pan a base de masa madre y harina de maíz morado* [Trabajo de Investigación].
- Arriaga Navarrete, R., & González Pérez, C. R. (2019). El sector turismo y sus eslabonamientos productivos: Un análisis de insumo-producto y consumo endógeno. *Revista de Economía, Facultad de Economía, Universidad Autónoma de Yucatán*, 36(92), 94–128. <https://doi.org/10.33937/rev.eco.2019.118>
- Bermúdez-Aguirre, D., & Corradini, M. G. (2012). Inactivation kinetics of Salmonella spp. Under thermal and emerging treatments: A review. *Food Research International*, 45(2), 700–712. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.05.040>
- Callejo, M. J., Vargas-Kostiuk, M.-E., Ribeiro, M., & Rodríguez-Quijano, M. (2019). Triticum aestivum ssp. Vulgare and ssp. Spelta cultivars: 2. Bread-making optimisation. *European Food Research and Technology*, 245(7), 1399–1408. <https://doi.org/10.1007/s00217-019-03268-2>
- Dallagnol, A. M., Pescuma, M., Rollán, G., Torino, M. I., & De Valdez, G. F. (2015). Optimization of lactic ferment with quinoa flour as bio-preservative alternative for packed bread. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 99(9), 3839–3849. <https://doi.org/10.1007/s00253-015-6473-9>
- Data México. (2023). Elaboración de Productos de Panadería y Tortillas: Salarios, producción, inversión, oportunidades y complejidad. In *Data México*. <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/industry/bakeries-and-tortilla-manufacturing>.
- Delgado-Sánchez, L. M., Huerta-Espino, J., Benítez-Riquelme, I., Ammar, K., & Aguilar-Rincón, V. H. (2022). Acción Génica Y Genes Que Otorgan Resistencia a Roya De La Hoja En Trigo Cristalino. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 45(1), 83. <https://doi.org/10.35196/rfm.2022.1.83>
- Díaz Madurga, L. (2023). Pan de muerto, todo sobre el dulce mexicano típico del Día de Muertos. *National Geographic*.
- Edwards, W. P. (2007). *The Science of Bakery Products*. Royal Society of Chemistry.
- Francavilla, A., & Joye, I. J. (2022). Anthocyanin Content of Crackers and Bread Made with Purple and Blue Wheat Varieties. *Molecules*, 27(21), 7180. <https://doi.org/10.3390/molecules27217180>
- Gamel, T. H., Saeed, S. M. G., Ali, R., & Abdel-Aal, E.-S. M. (2023). Purple Wheat: Food Development, Anthocyanin Stability, and Potential Health Benefits. *Foods*, 12(7), 1358. <https://doi.org/10.3390/foods12071358>
- Hernández-Parada, N., González-Ríos, O., Suárez-Quiroz, M. L., Hernández-Estrada, Z. J., Figueroa-Hernández, C. Y., Figueroa-Cárdenas, J. D. D., Rayas-Duarte, P., & Figueroa-Espinoza, M. C. (2022). Exploiting the Native Microorganisms from Different Food Matrices to Formulate Starter Cultures for Sourdough Bread Production. *Microorganisms*, 11(1), 109. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11010109>

- Hernández-Pérez, J. A., García-Alvarado, M. A., Trystram, G., & Heyd, B. (2004). Neural networks for the heat and mass transfer prediction during drying of cassava and mango. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 5(1), 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2003.10.004>
- Katsinis, G., Rigas, F., & Doulia, D. (2008). Synergistic effect of chemical preservatives with ethanol on the microbial shelf life of bread by factorial design. *International Journal of Food Science & Technology*, 43(2), 208–215. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01386.x>
- Lagrain, B., Brijs, K., & Delcour, J. A. (2008). Reaction Kinetics of Gliadin-Glutelin Cross-Linking in Model Systems and in Bread Making. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(22), 10660–10666. <https://doi.org/10.1021/jf801894r>
- Lazaridou, A., Duta, D., Papageorgiou, M., Belc, N., & Biliaderis, C. G. (2007). Effects of hydrocolloids on dough rheology and bread quality parameters in gluten-free formulations. *Journal of Food Engineering*, 79(3), 1033–1047. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.03.032>
- Lazcano-Hernandez, M. A., Navarro-Cruz, A. R., Sanches, R. Á.-S., Hernandez-Abundez, J. A., Zeron-Alvarado, C. A., & Pereira, D. S. (2019). Incorporación de harina de polen en panificación. *Revista Verde de Agroecología e Desenvolvimento Sustentável*, 14(1), 48. <https://doi.org/10.18378/rvads.v14i1.5920>
- Lhomme, E., Urien, C., Legrand, J., Dousset, X., Onno, B., & Sicard, D. (2016). Sourdough microbial community dynamics: An analysis during French organic bread-making processes. *Food Microbiology*, 53, 41–50. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2014.11.014>
- Mariotti-Celis, M. S., Zúñiga, R. N., Cortés, P., & Pedreschi, F. (2017). A Kinetic Study of Furan Formation in Wheat Flour-Based Model Systems during Frying. *Journal of Food Science*, 82(1), 232–239. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13552>
- Martins, S. I. F. S., Jongen, W. M. F., & Van Boekel, M. A. J. S. (2000). A review of Maillard reaction in food and implications to kinetic modelling. *Trends in Food Science & Technology*, 11(9-10), 364–373. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(01\)00022-X](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(01)00022-X)
- Meléndez Guadarrama, L., & Hirose López, J. (2018). El camote (*Ipomoea batatas*) y la yuca (*Manihot esculenta*) entre los mayas yucatecos, ch'oles y huastecos. *Estudios de Cultura Maya*, 52, 193. <https://doi.org/10.19130/iifl.ecm.2018.52.941>
- Mesas, J. M., & Alegre, M. T. (2002). El pan y su proceso de elaboración. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 3(5), 307–313.
- Mihhalevski, A., Heinmaa, I., Traksmäa, 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>
- Miyazaki, M., Maeda, T., & Morita, N. (2004). Effect of various dextrin substitutions for wheat flour on dough properties and bread qualities. *Food Research International*, 37(1), 59–65. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2003.08.007>
- Mohammadi Golchin, F., Movahhed, S., Eshaghi, M., & Ahmadi Chenarbon, H. (2021). Mathematical modeling of weight loss and crust temperature of toast bread containing guar gum during baking

- process. *Food Science & Nutrition*, 9(1), 272–281. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1993>
- Morales Quezada, I. (2018). History made of bread. *Voices of Mexico*, 56–63.
- Murat Karaoğlu, M., & Gürbüz Kotancilar, H. (2006). Effect of partial baking, storage and rebaking process on the quality of white pan bread. *International Journal of Food Science & Technology*, 41(s2), 108–114. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01432.x>
- Nionelli, L., & Rizzello, C. (2016). Sourdough-Based Biotechnologies for the Production of Gluten-Free Foods. *Foods*, 5(4), 65. <https://doi.org/10.3390/foods5030065>
- Nivelle, M. A., Bosmans, G. M., & Delcour, J. A. (2017). The Impact of Parbaking on the Crumb Firming Mechanism of Fully Baked Tin Wheat Bread. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(46), 10074–10083. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b03053>
- Olurin, T. O., Dudu, O. E., Olaniyan, A. M., & Ogunmoyela, O. A. B. (2021). Effect of optimizing process variables on the quality characteristics of cassava-wheat composite bread. *Journal of Agriculture and Food Sciences*, 19(1), 1–17. <https://doi.org/10.4314/jafs.v19i1.1>
- Osorio-Diaz, P., Sanchez-Pardo, M. E., & Bello-Perez, L. A. (2014). Mexican Bakery Products. In W. Zhou, Y. H. Hui, I. De Leyn, M. A. Pagani, C. M. Rosell, J. D. Selman, & N. Therdthai (Eds.), *Bakery Products Science and Technology* (1st ed., pp. 723–734). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118792001.ch41>
- Parker, J. K., Balagiannis, D. P., Higley, J., Smith, G., Wedzicha, B. L., & Mottram, D. S. (2012). Kinetic Model for the Formation of Acrylamide during the Finish-Frying of Commercial French Fries. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(36), 9321–9331. <https://doi.org/10.1021/jf302415n>
- Pateras, I. M. C. (2007). Bread Spoilage and Staling. In *Technology of Breadmaking* (pp. 275–298). Springer US. https://doi.org/10.1007/0-387-38565-7_10
- Pinon, A., Zwietering, M., Perrier, L., Membré, J.-M., Leporq, B., Mettler, E., Thuault, D., Coroller, L., Stahl, V., & Vialette, M. (2004). Development and Validation of Experimental Protocols for Use of Cardinal Models for Prediction of Microorganism Growth in Food Products. *Applied and Environmental Microbiology*, 70(2), 1081–1087. <https://doi.org/10.1128/AEM.70.2.1081-1087.2004>
- Purlis, E., & Salvadori, V. O. (2009). Modelling the browning of bread during baking. *Food Research International*, 42(7), 865–870. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.03.007>
- Ramos Valencia, J. E. (2023). Payalchi 'o'ob : Las oraciones en maya yucateco para curar enfermedades. *Razón Crítica*, 14, 1–30. <https://doi.org/10.21789/25007807.1960>
- Razavizadegan Jahromi, S. H., Tabatabae Yazdi, F., Karimi, M., & Mortazavi, S. A. (2014). Bread-Making Process Optimization: Staling Kinetics, Relationship of Batter Rheology, Shelf Life, Quality and Sensory Characteristics of Barbari Bread: Improving the Bread and Dough Properties. *Journal of Food Processing and Preservation*, 38(4), 1447–1460. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12104>
- Roman, L., & Martinez, M. M. (2019). Structural Basis of Resistant Starch (RS) in Bread: Natural

- and Commercial Alternatives. *Foods*, 8(7), 267. <https://doi.org/10.3390/foods8070267>
- Rosell, C. M., & Santos, E. (2010). Impact of fibers on physical characteristics of fresh and staled bake off bread. *Journal of Food Engineering*, 98(2), 273–281. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.01.008>
- Sabanis, D., Lebesi, D., & Tzia, C. (2009). Effect of dietary fibre enrichment on selected properties of gluten-free bread. *LWT - Food Science and Technology*, 42(8), 1380–1389. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.03.010>
- Sánchez Carrera, E. J., González Lara, J. M., & Policardo, L. (2021). Crecimiento Impulsado Por Los Salarios En México: Un Análisis De Regresión Umbral. *Investigación Económica*, 81(319), 90. <https://doi.org/10.22201/fe.01851667p.2022.319.79600>
- Secretaría de Economía. (2017). Conoce más sobre la industria panificadora en México. In *gob.mx*. <http://www.gob.mx/se/articulos/conoce-mas-sobre-la-industria-panificadora-en-mexico?idiom=es>.
- Srivastava, R., Bousquière, J., Cepeda-Vázquez, M., Roux, S., Bonazzi, C., & Rega, B. (2018). Kinetic study of furan and furfural generation during baking of cake models. *Food Chemistry*, 267, 329–336. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.06.126>
- Tasiguano, B. L., Villarreal, C., Schmiele, M., Vernaza, M. G., Tasiguano, B. L., Villarreal, C., Schmiele, M., & Vernaza, M. G. (2019). Effect of Cooking Time of Pumpkin (*Cucurbita maxima*) and the addition of Glucose Oxidase on the Increase of Resistant Starch in Loaf Bread. *Información Tecnológica*, 30(3), 167–178. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000300167>
- Tirado De Salazar, R. O. (2020). El análisis arqueológico-urbanístico: Una metodología integral para el estudio de la primera Ciudad de México. *Revista Historia Autónoma*, 16, 123. <https://doi.org/10.15366/rha2020.16.007>
- Upasen, S., & Wattanachai, P. (2018). Packaging to prolong shelf life of preservative-free white bread. *Heliyon*, 4(9), e00802. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00802>
- 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>
- Venturi, M., Galli, V., Pini, N., Guerrini, S., Sodi, C., & Granchi, L. (2021). Influence of different leavening agents on technological and nutritional characteristics of whole grain breads obtained from ancient and modern flour varieties. *European Food Research and Technology*, 247(7), 1701–1710. <https://doi.org/10.1007/s00217-021-03740-y>
- Wang, X., & Wang, W. (2006). Bioaccumulation and transfer of benzo(a)pyrene in a simplified marine food chain. *Marine Ecology Progress Series*, 312, 101–111. <https://doi.org/10.3354/meps312101>
- Weis, R. (2012). *Bakers and Basques: A Social History of Bread in Mexico*. University of New Mexico Press.

CAPÍTULO 2

Vida útil de alimentos: Productos de panificación

Resumen

EN el presente capítulo, se abarcó la complejidad existente de los factores que influyen en la vida útil de los alimentos, particularmente en los productos de panificación, y cómo estos factores contribuyen al desperdicio de alimentos, afectando negativamente la inocuidad de los alimentos y la sostenibilidad del sistema alimentario. El objetivo general del capítulo fue resumir la influencia de diversos factores como las reacciones químicas, bioquímicas, físicas y microbiológicas, así como los cambios sensoriales, sobre la VU de los alimentos con un enfoque final en los productos de panificación. Entre los principales hallazgos, se destacó la importancia de modelar los cambios en los alimentos, haciendo uso de ecuaciones cinéticas y de la estadística para superar los desafíos en el modelado de las reacciones en alimentos, la relevancia de la colaboración entre academia e industria para el desarrollo de modelos aplicables+ y la innovación tecnológica se presentaron como un enfoque prometedor para mejorar la VU de los alimentos. Además, se subrayó la necesidad de considerar la complejidad de los alimentos y la variabilidad biológica en el modelado de reacciones para mejorar la precisión de las predicciones. En conclusión, este capítulo proporcionó un panorama integral sobre los factores que afectan la VU de los alimentos y destacó la importancia de adoptar enfoques multidisciplinarios para abordar el desperdicio de alimentos, mejorar la inocuidad alimentaria y promover prácticas sostenibles en la industria alimentaria. La adopción de estas estrategias permitirá reducir el desperdicio de alimentos y mejorará la disponibilidad de alimentos nutritivos, así como la sostenibilidad del sistema alimentario.

2.1. Introducción

El desperdicio de alimentos en la industria alimentaria puede ser definido como aquellos alimentos o subproductos alimenticios que han perdido sus características de calidad o inocuidad y por lo tanto no son aptos para el consumo humano (Tavill, 2020). Esta problemática se relaciona estrechamente con la seguridad alimentaria (SA), ya que afecta la disponibilidad y el acceso a los alimentos. La SA se compone de cuatro pilares: disponibilidad, acceso, uso de los alimentos y estabilidad de la oferta (Urquía-Fernández Robles, 2013) (Bulgach et al., 2021). El desperdicio de alimentos impacta directamente en la disponibilidad de alimentos, lo que a su vez afecta el acceso a una alimentación adecuada. Además, el desperdicio de alimentos puede influir en la estabilidad de la oferta de los mismos, ya que la sobreproducción y la subutilización de alimentos pueden generar fluctuaciones en la disponibilidad de alimentos en el mercado (Mundo-Rosas et al., 2019).

La SA se refiere a la situación en la que todas las personas tienen en todo momento acceso físico, social y económico a suficientes alimentos inocuos y nutritivos que satisfacen sus necesidades dietéticas y preferencias alimentarias para llevar una vida activa y sana (Solórzano & Solís, 2014). La disponibilidad se refiere a la existencia de suficientes alimentos en el mercado, el acceso se relaciona con la capacidad de las personas para adquirir o acceder a esos alimentos, el uso de los alimentos se refiere a la utilización biológica de los nutrientes y la estabilidad de la oferta se relaciona con la capacidad de mantener un suministro constante de alimentos a lo largo del tiempo (Bulgach et al., 2021).

La SA es clave para garantizar una alimentación adecuada y prevenir la malnutrición en todas sus formas, incluida la desnutrición y la obesidad (Aguilar-Estrada et al., 2019). Además, está estrechamente relacionada con la pobreza, ya que las personas que viven en la pobreza pueden enfrentar dificultades para acceder a alimentos nutritivos y suficientes. Por lo tanto, la SA es un componente esencial para lograr el desarrollo sostenible y la erradicación del hambre.

La SA y el desperdicio de comida se suelen relacionar por las implicaciones morales que suponen, mientras que países con gran cantidad de recursos y posibilidad de desarrollo de la industria alimentaria hacen un mal uso de recursos y recurren a la sobreproducción, otros países que no tienen el mismo contexto suelen tener un inventario escaso de estos productos o bien los pocos que hay tienen un precio poco accesible (Toma et al., 2020).

La relación entre el desperdicio de alimentos y la SA también se evidencia en la importancia de programas de asistencia alimentaria que buscan aumentar el consumo de alimentos de alto valor nutricional. El desperdicio de alimentos impacta negativamente en la eficacia de estos programas, ya que la disponibilidad de alimentos no saludables puede contribuir al consumo excesivo de energía y al aumento de la obesidad, lo que afecta la calidad de la alimentación y la nutrición de la población (Mundo-Rosas et al., 2019).

Además, el desperdicio de alimentos puede influir en la inseguridad alimentaria a nivel de hogar. Estudios han demostrado que la diversidad de la dieta está altamente correlacionada con la inseguri-

dad alimentaria, y que la diversidad de la dieta puede ser un indicador útil para medir la seguridad alimentaria (Vega-Macedo et al., 2013). El desperdicio de alimentos puede reducir la diversidad de la dieta al limitar la disponibilidad de diferentes tipos de alimentos, lo que a su vez puede aumentar la inseguridad alimentaria en los hogares.

Por otro lado, existe el concepto de inocuidad alimentaria que no debe ser confundido con SA. La inocuidad alimentaria se puede definir como un atributo intrínseco de la calidad de un alimento que va a definir si dicho alimento o no es apto para el consumo humano, se consideran aspectos como la ausencia o no de contaminación bacteriana, crecimiento de microorganismos patógenos o cualquier otro factor que pueda afectar la inocuidad y salud humana, entre estos otros factores se incluye la pérdida de nutrientes o formación de compuestos dañinos por una incorrecta manipulación de alimento. Debido a lo anterior, se puede decir que la inocuidad alimentaria se ve afectada por factores microbiológicos, biológicos, químicos y físicos (Abu et al., 2020).

En el caso específico del desperdicio de pan, se reconoce el impacto significativo en la SA. El pan es un alimento básico en muchas culturas y su desperdicio afecta la disponibilidad y el acceso a alimentos, lo que a su vez influye en la estabilidad de la oferta alimentaria. El desperdicio de pan contribuye a la inseguridad alimentaria al reducir la disponibilidad de alimentos, especialmente en comunidades vulnerables. Además, el desperdicio de pan tiene implicaciones económicas y ambientales significativas. El pan desperdiciado representa una pérdida de recursos económicos y contribuye a la generación de residuos, lo que afecta la sostenibilidad del sistema alimentario. Esto a su vez puede influir en la estabilidad de la oferta de alimentos y en la capacidad de las comunidades para acceder a alimentos nutritivos (El Bilali & Ben Hassen, 2020).

La reutilización del pan desperdiciado como ingrediente en la elaboración de nuevos productos alimenticios, como galletas o bebidas funcionales, puede ayudar a reducir el desperdicio de alimentos y a mejorar la disponibilidad de alimentos nutritivos (Nguyen et al., 2022). Asimismo, la valorización del pan desperdiciado a través de la producción de materiales como electrodos para desalinización o materiales carbonosos puede ofrecer oportunidades para reducir el impacto ambiental del desperdicio de pan (Wood et al., 2021).

Con base en lo expuesto anteriormente, el objetivo de este capítulo fue resumir la influencia de diversos factores, como el desperdicio de alimentos, la seguridad y la inocuidad alimentaria, así como las reacciones químicas, bioquímicas, físicas y microbiológicas, junto con los cambios sensoriales, sobre la VU de los alimentos, abordando de forma general la VU de los productos de panificación. Esto, a través de la definición de criterios de calidad, la selección de métodos analíticos pertinentes, la concepción de estudios orientados a la VU y la interpretación de los resultados obtenidos. La finalidad fue brindar un panorama general que permita establecer prácticas que prolonguen la durabilidad de los alimentos, reduzcan el desperdicio y, de esta manera, contribuyan a la sostenibilidad y eficiencia en el consumo de recursos.

2.2. Vida útil de alimentos

La vida útil (VU) de los alimentos se refiere al período durante el cual un alimento puede ser almacenado y consumido sin comprometer la SA ni la calidad del producto. Esta determinación es crítica para garantizar la seguridad de los consumidores y prevenir el desperdicio de alimentos. Durante el almacenamiento influyen factores como la alteración incipiente, el control de la temperatura de refrigeración y el descongelamiento adecuado, dependiendo del control de estos la VU se puede prolongar o reducir (Rezende et al., 2021). Diversas técnicas enfocadas a los empaques se han buscado desarrollar e implementar para reducir los fenómenos de degradación de alimentos, tal como el uso de películas comestibles y biopolímeros a base de subproductos del mango, han demostrado ser eficaces para prolongar la VU de los alimentos sin comprometer su calidad organoléptica (Carvajal-Larenas et al., 2021; Estudillo-Díaz et al., 2022). Asimismo diversas técnica como la aplicación de altas presiones u otras tecnologías puede aumentar la VU de los alimentos, aunque es importante considerar su impacto en la calidad del producto final, evitando que hayan cambios organolépticos o pérdidas nutricionales (Martínez Giron et al., 2021). La estimación de la VU sensorial de los alimentos es un tema de investigación en constante evolución, lo que ha llevado al desarrollo de metodologías para su estimación (Sánchez-González & Pérez, 2016). Además, se ha observado un creciente interés en los antimicrobianos de origen natural para prolongar la VU de los alimentos y garantizar su seguridad para el consumidor (Cabeza Herrera et al., 2015).

En el contexto actual, la amplia gama de alimentos industrializados ha modificado los patrones alimenticios, lo que puede contribuir al aumento de enfermedades crónicas degenerativas, debido a que las personas suelen relacionar el término de alimento industrializado con el uso de aditivos, las industrias se han visto en la necesidad de reducir el uso de estos y optar por otros métodos de conservación (Ortega Ibarra et al., 2021). La percepción de los alimentos saludables y la disponibilidad de alimentos también influyen en los hábitos alimenticios y, por ende, en la VU de los alimentos (Bekelman et al., 2016; Espeche & Rojo, 2021). Es importante considerar que la VU de los alimentos no solo tiene implicaciones económicas, sino también en la salud pública, ya que la ingesta de alimentos poco saludables puede contribuir a enfermedades relacionadas con la nutrición (Ortega Ibarra et al., 2021; Palau & Russolillo, 2017).

2.3. Reacciones que afectan la vida útil de los alimentos

Las reacciones que influyen en la VU de los alimentos pueden clasificarse en varias categorías, incluyendo reacciones químicas, reacciones bioquímicas, reacciones físicas y cambios microbiológicos. Cada una de estas categorías tiene un impacto significativo en la calidad y seguridad de los alimentos a lo largo del tiempo (Lai & Heldman, 1982; Lúcia F. Pereira & Kelly G. Abreu, 2020; Van Boekel, 2008; Wu et al., 2019).

1. **Reacciones químicas:** Incluyen la oxidación lipídica, que puede llevar a la rancidez que

se manifiesta en una pérdida de la calidad sensorial. además de la pérdida de ácidos grasos esenciales. La reacción de Maillard, que ocurre entre azúcares y proteínas, puede resultar en cambios de color, sabor y aroma, así como en la pérdida de valor nutritivo. La velocidad de estas reacciones suele incrementarse a temperaturas más altas, además pueden verse influenciadas por el pH y la presencia de ciertos metales que actúan como catalizadores en la Tabla 2.1 se muestran algunas reacciones y sus consecuencias.

2. **Reacciones bioquímicas:** Las reacciones químicas y biológicas desempeñan un papel crítico en la determinación de la VU de los alimentos, debido a que muchos alimentos contienen enzimas endógenas que pueden catalizar reacciones que llevan a cambios en la calidad sensorial. Por ejemplo, la oxidación enzimática puede causar el pardeamiento de frutas y verduras, mientras que la hidrólisis enzimática de lípidos puede generar sabores a jabón o rancios en alimentos como la leche cruda. La actividad enzimática puede ser deseable en ciertos procesos, como la maduración del queso, pero en la mayoría de los casos, es necesario desactivar las enzimas para prevenir la degradación de la calidad.
3. **Reacciones físicas:** Los cambios en la textura de los alimentos suelen ser consecuencia de fenómenos como la gelificación de biopolímeros, la cristalización de almidones y la migración de humedad entre las fases de un sistema alimentario, todos estos suelen reducir la VU. Estos procesos pueden ser complejos y están influenciados por la composición del alimento, el tratamiento térmico y las condiciones de almacenamiento.
4. **Cambios microbiológicos:** El crecimiento de microorganismos es generalmente indeseable, ya que puede llevar a la descomposición del alimento y, en el caso de patógenos, puede resultar en enfermedades transmitidas por alimentos. La VU de un alimento se puede reducir significativamente si los microorganismos patógenos o de deterioro se multiplican a niveles considerados no aceptables por las normas de calidad y salubridad vigentes. La tasa de crecimiento microbiano depende de algunos factores como la temperatura, la actividad del agua, el pH y la presencia de conservantes.
5. **Cambios en la estructura y textura:** Los cambios en la estructura y textura de los alimentos pueden ser causados por procesos como la deshidratación, la recristalización de azúcares o grasas, y la retrogradación del almidón. Estos cambios pueden afectar la palatabilidad y la apariencia del alimento, lo que a su vez puede influir en la percepción de calidad por parte del consumidor.
6. **Cambios en el color y sabor:** Además de la reacción de Maillard y la oxidación de lípidos, otros cambios en el color y sabor pueden ser causados por la degradación de pigmentos naturales como los carotenoides y clorofilas, y por la pérdida o cambio de compuestos volátiles que contribuyen al aroma.

Dependiendo de los componentes de los alimentos estos pueden tener diversos cambios que se deban a la degradación de estas moléculas, algunas reacciones se muestran en la Tabla 2.2.

Para controlar y prevenir estas reacciones, los fabricantes de alimentos utilizan una variedad de

técnicas, como el control de la temperatura, la modificación de la atmósfera del empaque, la reducción de la actividad del agua, el ajuste del pH, la adición de antioxidantes y conservantes, y el procesamiento térmico.

Es importante elegir una técnica adecuada de conservación debido a que pueden ocurrir situaciones como la interacción de los alimentos con los materiales de envasado, lo cual puede provocar la migración de sustancias químicas desde el envase hacia los alimentos, lo que influye en la seguridad y la calidad de los productos alimenticios (Alamri et al., 2021). Por lo tanto, comprender las cinéticas de estos factores, las interacciones de los componentes del alimento, además de la interacción del alimento y su empaque permitirá el desarrollo de estrategias de conservación de alimentos para garantizar la seguridad y calidad de los productos alimenticios a lo largo de su VU (Wells & Singh, 1988).

Tabla 2.1: Reacciones que afectan la calidad alimentaria.

Ejemplo	Tipo	Consecuencias
Pardeamiento no enzimático	Reacción química (reacción de Maillard)	Color, sabor y aroma, valor nutritivo, formación de compuestos toxicológicamente sospechosos (acrilamida).
Oxidación de grasas	Reacción química	Pérdida de ácidos grasos esenciales, sabor rancio, formación de compuestos toxicológicamente sospechosos.
Oxidación de grasas	Reacción bioquímica (lipoxigenasa)	Sabores desagradables, principalmente debido a la formación de aldehídos y cetonas.
Hidrólisis	Reacción química	Cambios de sabor, contenido de vitaminas.
Lipólisis	Reacción bioquímica (lipasa)	Formación de ácidos grasos libres, sabor rancio.
Proteólisis	Reacción bioquímica (proteasas)	Formación de aminoácidos y péptidos, sabor amargo, compuestos de sabor, cambios en la textura.
Pardeamiento enzimático	Reacción bioquímica de polifenoles	Pardeamiento.
Separación	Reacción física	Sedimentación.
Solidificación	Combinación de reacción química y física	Formación de gel, cambios de textura.

Tabla 2.2: Reacciones de los componentes clave en los alimentos.

Componente	Reacción	Consecuencias
Proteínas	Desnaturalización	Gelación, precipitación, solubilidad, inactivación de factores antinutrientes.
	Hidrólisis	Formación de péptidos y aminoácidos, cambios de textura.
	Desamidación	Pérdida de carga y cambio de reactividad.
	Reacción de Maillard	Reticulación, pérdida de valor nutricional, pardeamiento.
Lípidos	Oxidación	Pérdida de ácidos grasos esenciales, rancidez.
	Endurecimiento de grasa	Formación de ácidos grasos trans.
	Hidrólisis (generalmente enzimática)	Formación de ácidos grasos libres lo que produce un mal sabor o a jabón.
Mono y disacáridos	Reacción de Maillard	Pardeamiento no enzimático.
	Caramelización	Cambios de sabor y color.
	Hidrólisis	Inversión de azúcar.
Polisacáridos	Hidrólisis (enzimáticamente durante la maduración, químicamente durante la cocción)	Ablandamiento del tejido, cambios de textura.
	Interacción física con otros componentes	Gelificación, separación de fases.
	Gelatinización y retrogradación del almidón	Endurecimiento del pan.
Polifenoles	Polimerización enzimática	Pardeamiento.
	Interacción con proteínas	Reticulación, gelificación.
Vitaminas	Oxidación	Pérdida de valor nutricional.

2.4. Determinación de vida útil en alimentos

Determinar la VU de un alimento es un proceso complejo que implica varios pasos y consideraciones. A continuación, se describen los pasos generales para determinar la VU de un producto alimenticio (Van Boekel, 2008)

1. **Definición de criterios de calidad:** Antes de comenzar cualquier estudio de VU, es necesario definir los criterios de calidad que son importantes para el producto en cuestión. Estos pueden incluir aspectos sensoriales (sabor, olor, textura), químicos (pH, contenido de humedad, oxidación), microbiológicos (carga bacteriana) y nutricionales.
2. **Selección de métodos analíticos:** Se deben seleccionar métodos analíticos adecuados para medir los criterios de calidad definidos. Estos métodos deben ser precisos, reproducibles y, preferiblemente, rápidos.
3. **Diseño del estudio de vida útil:** El diseño del estudio debe considerar las condiciones de almacenamiento (temperatura, humedad, luz), el empaque y la frecuencia de muestreo. Se deben realizar pruebas tanto en condiciones reales de almacenamiento como en condiciones aceleradas para predecir la VU en un tiempo más corto.
4. **Realización de pruebas de almacenamiento:** Los productos se almacenan bajo las condiciones definidas y controladas, estas se muestrean periódicamente para evaluar los cambios en los criterios de calidad. Las pruebas de almacenamiento acelerado pueden incluir temperaturas más altas para acelerar las reacciones de deterioro.
5. **Análisis de datos y modelado:** Los datos recopilados se analizan para determinar la tasa de cambio en los criterios de calidad. Se pueden utilizar modelos cinéticos, como los modelos de Arrhenius para reacciones químicas y enzimáticas o modelos de Gompertz modificados para el crecimiento microbiano, para predecir la VU bajo diferentes condiciones.
6. **Interpretación de resultados y determinación de la vida útil:** Dependiendo de los resultados se hará una estimación del tiempo de VU a determinadas condiciones, teniendo en cuenta que la VU se define como el tiempo durante el cual el producto mantiene una calidad aceptable basada en los criterios de calidad establecidos hasta un punto en el que ya no se considera aceptable para el consumo.
7. **Establecimiento de la fecha de caducidad:** Con base en la interpretación de los resultados, se establece la fecha de caducidad o la fecha de mejor consumo, que es la fecha hasta la cual se espera que el producto mantenga la calidad e inocuidad ideales bajo las condiciones de almacenamiento recomendadas.
8. **Validación y verificación:** Es importante validar y verificar los resultados del estudio de VU mediante pruebas adicionales o estudios de seguimiento para asegurarse de que las predicciones sean precisas y confiables.
9. **Documentación y comunicación:** Los resultados del estudio de VU deben documentarse adecuadamente y comunicarse a todas las partes interesadas, incluidos los reguladores, los

distribuidores y los consumidores.

10. **Monitoreo continuo:** Incluso después de establecer la VU, es importante monitorear continuamente la calidad del producto en el mercado para asegurarse de que las predicciones de vida útil sigan siendo válidas y para realizar ajustes si es necesario.

Es importante destacar que la determinación de la VU de un alimento es un proceso iterativo y puede requerir ajustes basados en la retroalimentación del mercado y los avances en la tecnología de procesamiento y conservación de alimentos. Además, las regulaciones y estándares locales también pueden influir en cómo se determina y se comunica la VU de un producto alimenticio.

2.5. Modelado cinético para estimar vida útil en alimentos

El modelado cinético en la ciencia de los alimentos ayuda a comprender y predecir reacciones al proporcionar un marco matemático para describir los cambios en los atributos de calidad de los alimentos, como la degradación de compuestos, la formación de compuestos no deseados, la cinética de agregación en la formación de textura, la inactivación de enzimas y microorganismos, la cristalización y la sedimentación. Estos modelos se basan en ecuaciones diferenciales que pueden resolverse analítica o numéricamente, lo que facilita la predicción cuantitativa del estado futuro de un alimento basándose en el conocimiento del alimento y los pasos de procesamiento aplicados. El modelado cinético también contribuye a la comprensión de los mecanismos de reacción a nivel molecular, lo que resulta en parámetros cinéticos fundamentales como energías de activación, entalpías y entropías. Sin embargo, debido a la complejidad de los alimentos, que están lejos de ser sistemas ideales y diluidos, a menudo se utilizan sistemas modelo simplificados para estudiar las reacciones. Aunque esto puede contribuir significativamente al entendimiento científico, no es sencillo traducir estos resultados a alimentos reales sin adaptar los sistemas modelo a las propiedades específicas de los alimentos. En términos de predicción y control, el modelado cinético sirve un objetivo más ingenieril, donde la predicción implica una proyección cuantitativa del estado futuro de un alimento, y el control implica establecer condiciones de procesamiento y propiedades de los alimentos de tal manera que se logre un resultado deseado, como una calidad específica. A pesar de las dificultades, el modelado cinético puede ser una herramienta poderosa para predecir y controlar la calidad de los alimentos ([Van Boekel, 2008](#)).

2.6. Desafíos de modelar reacciones en sistemas alimentarios

Modelar reacciones en sistemas alimentarios complejos presenta varios desafíos significativos debido a la naturaleza intrínsecamente compleja de los alimentos. Algunos de los principales desafíos incluyen ([Van Boekel, 2008](#)):

1. **Complejidad de los alimentos:** Los alimentos no son sistemas ideales y diluidos; están compuestos por una matriz compleja de componentes que pueden interactuar entre sí de maneras no lineales y a menudo impredecibles. Esto hace que sea difícil conectar los modelos

cinéticos con mecanismos de reacción fundamentales y parámetros cinéticos asociados que son válidos para reacciones elementales en sistemas simples.

2. **Variabilidad biológica:** Los alimentos son productos biológicos y, como tales, presentan una variabilidad inherente. Esta variabilidad biológica puede afectar significativamente los parámetros cinéticos y, por lo tanto, la precisión de las predicciones del modelo. La falta de atención en la literatura científica sobre la calidad estadística de las estimaciones de parámetros y la imprecisión frecuentemente no reportada son problemas que necesitan ser abordados para mejorar la confiabilidad de los modelos.
3. **Reacciones interconectadas:** En la ciencia de los alimentos, las reacciones interconectadas son generalmente más complicadas que las reacciones simples que se pueden describir con una sola ecuación. Por ejemplo, la oxidación de grasas y la reacción de Maillard son redes de pasos de reacción interconectados. Desentrañar tales redes puede hacerse mediante modelado mecanicista de múltiples respuestas, pero estos modelos son más útiles para explicaciones científicas descriptivas que para aplicaciones prácticas.
4. **Procesos físicos:** Además de las reacciones químicas y bioquímicas, los procesos físicos como la cristalización, la migración de humedad, la gelificación de biopolímeros y la sedimentación también pueden llevar a cambios en la calidad de los alimentos. Modelar estos fenómenos es desafiante debido a su complejidad.
5. **Condiciones no isotérmicas:** La mayoría de los procesos de procesamiento de alimentos son no isotérmicos, lo que dificulta la aplicación de modelos cinéticos simples que asumen condiciones isotérmicas. Los alimentos a menudo se procesan y almacenan en condiciones que varían en el tiempo y el espacio, así como en la temperatura. lo que requiere modelos más complejos para describir con precisión la cinética de las reacciones.
6. **Escala de tiempo y condiciones de procesamiento:** Las reacciones en los alimentos pueden ocurrir en escalas de tiempo que van desde segundos hasta años, y bajo una amplia gama de condiciones de procesamiento y almacenamiento. Esto requiere modelos que puedan abarcar una amplia gama de condiciones y escalas de tiempo.
7. **Datos experimentales y validación:** La falta de datos experimentales precisos y representativos puede limitar la capacidad de desarrollar y validar modelos cinéticos. Además, la validación de modelos en sistemas alimentarios reales es a menudo desafiante debido a la dificultad de medir directamente ciertas reacciones o cambios de calidad.
8. **Incorporación de la variabilidad y la incertidumbre:** Los modelos deben ser capaces de incorporar la variabilidad y la incertidumbre inherentes a los sistemas alimentarios, lo que puede ser difícil de cuantificar y modelar adecuadamente.
9. **Interdisciplinariedad:** La ciencia de los alimentos es un campo interdisciplinario que requiere conocimientos de química, biología, física, ingeniería y matemáticas. Integrar estos conocimientos en modelos cinéticos coherentes y aplicables es un desafío significativo.
10. **Aplicabilidad y transferibilidad:** Los modelos desarrollados en condiciones de laboratorio

o con sistemas modelo simplificados pueden no ser directamente aplicables o transferibles a sistemas alimentarios reales y complejos, lo que limita su utilidad práctica.

11. **Modelos no isotérmicos:** Los modelos isotérmicos no son adecuados para describir la mayoría de los procesos de procesamiento de alimentos, que son inherentemente no isotérmicos. Los modelos no isotérmicos son más realistas pero también más complejos y difíciles de validar.
12. **Interacción entre componentes:** Los alimentos son sistemas multicomponentes donde las interacciones entre diferentes ingredientes pueden afectar la cinética de las reacciones. Modelar estas interacciones es esencia pero también muy desafiante.
13. **Cambios de fase y transiciones de estado:** Los alimentos pueden experimentar cambios de fase y transiciones de estado (como la transición vítrea) que afectan la movilidad molecular y, por lo tanto, la cinética de las reacciones. Modelar estos fenómenos requiere un enfoque sofisticado y conocimiento de la termodinámica de alimentos.
14. **Influencia del procesamiento y el empaque:** Los métodos de procesamiento y las condiciones de empaque pueden influir significativamente en la estabilidad y la VU de los alimentos. Los modelos deben ser capaces de incorporar estos factores para ser aplicables en la industria alimentaria.
15. **Escalabilidad:** Los modelos desarrollados a escala de laboratorio pueden no escalar de manera predecible a la producción a gran escala debido a diferencias en la transferencia de masa y calor, entre otros factores.
16. **Modelado predictivo y control de calidad:** Aunque el modelado puede proporcionar una mejor comprensión de los procesos de deterioro de los alimentos, su uso para predecir y controlar la calidad en aplicaciones alimentarias reales sigue siendo un desafío. La especificación clara de las aplicaciones posibles de los modelos puede ayudar a mejorar su utilidad práctica.
17. **Avances computacionales y oportunidades:** A pesar de los desafíos, los avances en las capacidades computacionales han aumentado enormemente, lo que ofrece nuevas oportunidades para el modelado para el desarrollo de modelos más precisos y aplicables en la industria alimentaria. Con la ayuda de herramientas computacionales avanzadas y la integración de datos experimentales, los científicos de alimentos pueden abordar estos desafíos y mejorar la precisión y la relevancia de los modelos cinéticos.
18. **Educación y formación:** Para superar los desafíos en la modelización de reacciones en alimentos, es esencial que los científicos de alimentos reciban una formación adecuada en modelización matemática y estadística, así como en el uso de herramientas computacionales modernas.
19. **Colaboración entre academia e industria:** La colaboración entre investigadores académicos y profesionales de la industria alimentaria puede facilitar el desarrollo de modelos más relevantes y aplicables, asegurando que los modelos reflejen las necesidades y desafíos reales de la industria.
20. **Innovación tecnológica:** La adopción de nuevas tecnologías, como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático, puede ofrecer enfoques innovadores para el modelado de reacciones

en alimentos y ayudar a superar algunas de las limitaciones de los modelos tradicionales.

2.7. Influencia de la temperatura sobre las reacciones químicas y biológicas en los alimentos

La temperatura tiene un impacto significativo en las reacciones químicas, el crecimiento microbiano y la actividad enzimática en los alimentos, afectando tanto la velocidad de las reacciones como la estabilidad y calidad del producto final (Kirit et al., 2013; Roos & Karel, 1991; Van Boekel, 2008).

1. **Reacciones químicas:** La temperatura influye en las reacciones químicas en los alimentos siguiendo la ecuación de Arrhenius, donde un aumento de la temperatura generalmente aumenta la velocidad de la reacción. Esto se debe a que las moléculas tienen más energía térmica, lo que resulta en colisiones más frecuentes y con mayor energía entre ellas, aumentando así la probabilidad de que ocurran reacciones. Las reacciones químicas, como la reacción de Maillard, que puede conducir a cambios en el color, sabor, propiedades funcionales y valor nutricional de los alimentos, tienen una energía de activación “normal” de alrededor de 100 kJ/mol, lo que indica una dependencia moderada de la temperatura. Además de la influencia de la temperatura en las reacciones, esta puede afectar directamente a la estabilidad de los alimentos amorfos, como las soluciones de sacarosa, lo que es crucial para la liofilización de alimentos y materiales farmacéuticos
2. **Crecimiento microbiano:** El crecimiento de microorganismos es altamente dependiente de la temperatura. Existen temperaturas mínimas y máximas para el crecimiento de los microorganismos, y la velocidad de crecimiento aumenta con la temperatura hasta alcanzar un óptimo, después del cual la velocidad disminuye y eventualmente se detiene a temperaturas demasiado altas que inactivan o matan a los microorganismos. Los modelos de crecimiento microbiano, como el modelo modificado de Gompertz, se utilizan para predecir el crecimiento bacteriano en alimentos y son esenciales para el diseño de alimentos y la predicción de la VU.
3. **Actividad enzimática:** Las enzimas, que son catalizadores biológicos, también son sensibles a la temperatura. La actividad enzimática generalmente aumenta con la temperatura hasta un punto óptimo, más allá del cual la actividad disminuye debido a la desnaturalización de la enzima. La temperatura óptima de actividad varía para diferentes enzimas y puede ser explotada en procesos como la fermentación para mejorar la calidad de los alimentos.

Retomando las ideas anteriores, se conoce que la temperatura influye en las transiciones de fase y el comportamiento de los alimentos amorfos, lo que a su vez impacta la estabilidad de los materiales biológicos y su susceptibilidad a reacciones químicas y enzimáticas (Buera et al., 2011). Asimismo, la temperatura puede influir en la estabilidad de los productos alimenticios, como los productos de kiwicha, cuyos ácidos grasos principales están relacionados con la estabilidad de almacenamiento y la rancidez oxidativa (Burgos & Armada, 2021). Además, la temperatura puede afectar la estabilidad de los alimentos a través de fenómenos como la transición vítrea. La transición vítrea puede afectar

la movilidad molecular y, por lo tanto, la cinética de las reacciones, así como la estabilidad de los alimentos durante el almacenamiento.

2.8. Vida útil en productos de panificación

La vida útil del pan suele estar fuertemente relacionada con fenómenos de degradación como el envejecimiento del pan o el enmohecimiento de los productos, ambos fenómenos están ligados al acortamiento de la VU (Galić et al., 2009).

Durante el almacenamiento del pan ocurren varios fenómenos que contribuyen a la prolongación o acortamiento de la VU, usualmente estos fenómenos están ligados a la formulación del pan, por ejemplo, la acidificación asociada con la producción de ácidos orgánicos en masa madre, principalmente ácido láctico y acético, se ha descrito útil para prolongar la vida útil del pan, esto en comparación a la producción de pan que se limita al uso de levaduras fermentadoras (Taglieri et al., 2021). Otro ejemplo de la influencia de la formulación en la VU es el contenido de cenizas de ciertos ingredientes, como la goma guar, la presencia de esta goma puede afectar las propiedades físicas y texturales de los productos de panificación, lo que a su vez influye en su VU (Salehi, 2020). La interacción de los ingredientes dentro de la matriz alimentaria puede generar una variación de los valores de los parámetros fisicoquímicos usualmente utilizados para determinar la calidad de un producto, como lo son la actividad de agua (AW), el pH y el contenido de humedad, la variación o interacción de estos puede afectar en gran medida la VU (De Oliveira Do Nascimento et al., 2018; Skudra et al., 2019; Wanjuu et al., 2018). Además, la adición de ingredientes como harina de avena y enzimas puede influir en la calidad y la VU del pan (Lebesi & Tzia, 2011; Majzoobi et al., 2015).

Además de los factores intrínsecos ya mencionados, existen factores ambientales y biológicos que al interactuar con el producto reducen su VU. La presencia de microorganismos, como bacterias, levaduras y mohos, así como la formación de micotoxinas, puede afectar significativamente la vida útil de los productos de panificación (Opondo et al., 2022; Saeed et al., 2019; Torrijos et al., 2019). Como se ha mencionado, la VU de los productos de panificación puede estar influenciada por una variedad de factores, que van desde la composición de los ingredientes hasta las condiciones de procesamiento y almacenamiento. Puntualmente se pueden rescatar de la literatura los siguientes:

1. **Composición de ingredientes:** La selección y proporción de ingredientes, como harina, agua, levadura, grasas y azúcares, pueden afectar la VU de los productos de panificación. En general, el agua y la harina se consideran los ingredientes principales del pan, siendo que los demás ingredientes se agregaran en proporciones calculadas a estos. Aspectos como la textura y propiedades de la miga serán determinados por estos dos ingredientes base. Por ejemplo, un pan hecho con levaduras que contenga más agua va a producir más CO₂ y en consecuencia una miga más gruesa, reduciendo la evaporación de la humedad del pan. Otros ingredientes como la sal sirven para agregar dureza al gluten y controlar la expansión de la masa por la

- fermentación que se ve beneficiada por las levaduras y el azúcar que se agrega (Caballero et al., 2007; Katina et al., 2006; Mondal & Datta, 2008; Smith et al., 2004).
2. **Actividad de agua y humedad:** El contenido de humedad en los productos de panificación puede influir en su estabilidad y susceptibilidad al deterioro microbiológico (Wanjuu et al., 2018). Los valores de AW en los alimentos suelen relacionarse con el potencial de crecimiento de microorganismos y actividad metabólica en una matriz alimentaria. La AW se ha utilizado para predecir la estabilidad microbiológica de los alimentos (Chirife et al., 1996).
 3. **Uso de enzimas:** La adición de enzimas puede mejorar la calidad del pan y extender su VU al afectar la estructura y la textura del producto. Como se ha mencionado la harina será un factor clave en la calidad reológica del pan, siendo que se relaciona con la cantidad y cualidad de las proteínas que contenga, en especial el gluten al ser hidratado y amasado podrá crear una red que confiera textura al pan, el uso de enzimas de entrecruzamiento de gluten pueden contribuir a la funcionalidad de esta proteína, Además de proteínas como la glucooxidasa que promueve la formación de enlaces disulfuro en el gluten y la gelatinización de agua en pentosas solubles. Enzimas como la alfa amilasa han demostrado ser útiles para la reducción de la retrogradación de la amilopectina y endurecimiento de la miga del pan (Caballero et al., 2007).
 4. **Procesamiento y almacenamiento:** Los parámetros de procesamiento, como la temperatura y el tiempo de cocción, así como las condiciones de almacenamiento, pueden influir en la frescura y durabilidad de los productos de panificación (Rico et al., 2020; Rizzello et al., 2011; Vignali & Volpi, 2013). Por lo general la mayoría de cambios que afectan la calidad de los productos de panificación se darán durante el almacenamiento, referidos usualmente al envejecimiento, mientras que aquellos cambios durante el procesamiento que podrían afectar la VU son relacionado con malas prácticas de manejo e higiene (Stöllman & Lundgren, 1987).
 5. **Aditivos y conservantes:** La incorporación de aditivos y conservantes puede ayudar a prevenir el deterioro microbiológico y prolongar la VU de los productos de panificación. Hoy en día en grandes industrias a la lista de ingredientes de una preparación tradicional, se le han agregado aditivos como emulsificantes o agentes anti envejecimiento para extender la VU, que aunque suelen ser beneficiosos, no siguen las tendencias del mercado que apuntan a la reducción de aditivos en alimentos (Katina et al., 2006; Mondal & Datta, 2008; Rinaldi et al., 2015).
 6. **Oxidación de lípidos:** La presencia de grasas y aceites en los productos de panificación puede influir en su estabilidad oxidativa y, por lo tanto, en su VU (Niu et al., 2021; Torrijos et al., 2019; Wanjiku Kiharason, 2019). Usualmente la estabilidad de los productos de panificación se puede ver afectada por la composición de lípidos y la presencia de diversos antioxidantes. Usualmente el lípido proveniente del harina que se encuentra en mayor proporción en el pan de trigo es el ácido linoleico, además de otros ingredientes grasos como el aceite vegetal, la mantequilla o las margarinas. Durante el envejecimiento del pan existe la posibilidad de que

estos compuestos se oxidan, disminuyendo así las propiedades sensoriales. Por otra parte, los tocoferoles y los ácidos fenólicos presentes en el trigo formarían parte de la actividad antioxidante; sin embargo, la acción de estos se ve sujeta a la calidad del trigo y sus condiciones de cultivo (Jensen et al., 2011).

7. **Contaminación microbiológica:** La presencia de microorganismos, como mohos y levaduras, puede afectar la VU de los productos de panificación y su seguridad alimentaria (Debonne et al., 2023; Opondo et al., 2022). El tipo de deterioro microbiológico más común en productos de panificación es el crecimiento de moho, mientras que el menos común pero más constante sobre todo en condiciones cálidas es el deterioro bacteriano producido por especies de bacilos. El enmohecimiento suele deberse a una contaminación posterior a su procesamiento, la presencia de estos microorganismos además de acorta la VU, representa un riesgo a la salud del consumidor (Pateras, 2007).
8. **Propiedades sensoriales:** Cambios en las propiedades sensoriales, como sabor, aroma y textura, pueden influir en la aceptabilidad y la VU percibida de los productos de panificación (Jensen et al., 2011; Liu et al., 2022). Cuando ocurre el envejecimiento del pan ocurren cambios en el aroma y la textura, estos son consecuencias de los cambios fisicoquímicos que ocurren durante el almacenamiento, lo que se describe usualmente es endurecimiento de la miga y pérdida de la frescura (Fadda et al., 2014).

Los factores anteriores suelen tener interacciones dentro de la matriz alimentaria, provocando otros fenómenos como lo es el envejecimiento del pan, este un fenómeno complejo que afecta su vida útil y calidad. Durante el almacenamiento, el pan experimenta cambios en su textura, sabor y frescura, lo que se conoce como envejecimiento o staling. Este proceso está influenciado por varios factores, como la composición del pan, el tipo de almidón, proteínas y lípidos utilizados, así como la presencia de aditivos e ingredientes (Rayas-Duarte & Murtini, 2020).

2.8.1. Envejecimiento del pan

Uno de los mecanismos clave involucrados en el envejecimiento del pan es la retrogradación del almidón, que se refiere a la reasociación de las moléculas de almidón, especialmente la amilopectina, lo que conduce a la recristalización de los gránulos de almidón. Este proceso resulta en la pérdida de humedad y el desarrollo de una textura más firme en la miga del pan. Además, la migración de humedad de la miga a la corteza, así como los cambios en la estructura y propiedades del gluten, también contribuyen al envejecimiento del pan (Rayas-Duarte & Murtini, 2020).

Se han explorado diversas estrategias para mitigar los efectos del envejecimiento del pan, incluyendo el uso de enzimas, emulsionantes, hidrocoloides y otros aditivos para modificar las propiedades del almidón y la red de gluten, así como para mejorar la retención de humedad y retrasar la retrogradación. Además, la selección de ingredientes y técnicas de procesamiento, como el uso de masa madre, prebióticos y condiciones de horneado específicas, también pueden impactar el proceso de envejecimiento y la vida útil del pan (Ai et al., 2018; Dong & Karboune, 2021; Ferrero, 2017;

[Purhagen et al., 2011](#)).

El envejecimiento del pan representa pérdidas considerables en la cadena de distribución del pan, afectando desde los productores hasta los consumidores, debido a que es un fenómeno ligado a diversos factores fisicoquímicos y sus condiciones de almacenamiento, no se ha logrado obtener una solución que generalice el problema, en cambio, se han hecho estudios específicos para algunos productos. Sin embargo, se han ofrecido teorías para la prevención de los fenómenos de envejecimiento que usualmente guardan una estrecha relación entre sí, por ejemplo, para el fenómeno de migración de agua y redistribución de la misma se ha probado que es mejor retrasar el fenómeno de deshidratación en vez de incrementar el contenido de humedad inicial, retrasar esa pérdida de humedad también podría contribuir a la disminución de otros problemas como el endurecimiento de la miga o la retrogradación del almidón, esto último debido a que la retrogradación de la amilopectina incluye la incorporación de moléculas de agua a los cristales, por lo que usualmente la humedad en los geles de almidón formados también pueden determinar el grado en que el almidón sufre retrogradación ([Desk, 2023](#)).

Varios estudios han abordado estrategias para extender la VU del pan, como el uso de envases activos, la fermentación con suero de leche y el uso de agentes antimicrobianos. Estas estrategias buscan prevenir la aparición de mohos, la rancidez y otros procesos de deterioro que reducen la VU del pan y contribuyen al desperdicio de alimentos ([Alpers et al., 2021](#); [Izzo et al., 2020](#); [Melini & Melini, 2018](#)). Además, la incorporación de ingredientes como la fibra dietética y la reducción de sal también se ha explorado como estrategias para mejorar la VU del pan ([Jarosław Wyrwisz, 2015](#); [Nahar et al., 2019](#)).

2.9. Conclusiones y perspectivas

En este capítulo se resumió la influencia de diversos factores sobre la VU de los alimentos, especialmente en productos de panificación, y se proporcionó un panorama general prácticas para prolongar su durabilidad, reducir el desperdicio y contribuir a la sostenibilidad, se desprenden en varios aspectos clave.

La inclusión de ingredientes como la fibra dietética y la reducción de sal emergieron como estrategias eficaces para mejorar la VU del pan, destacando la importancia de la innovación en la formulación de productos para extender su vida útil y reducir el desperdicio de alimentos.

La colaboración estrecha entre la academia y la industria fue propuesta como algo fundamental para desarrollar modelos de predicción de la VU aplicables y relevantes, garantizando que los avances científicos se traduzcan en prácticas sostenibles y eficientes en la industria alimentaria.

Asimismo, la valorización del pan desperdiciado, ya sea como ingrediente en nuevos productos alimenticios o para la producción de materiales sostenibles, se posicionó como una estrategia clave para mitigar los impactos negativos del desperdicio de alimentos en la seguridad alimentaria y la sostenibilidad ambiental. En este contexto, una comprensión más profunda de los procesos de

deterioro alimentario y la influencia de factores como la temperatura y el empaque se reveló como necesaria para desarrollar estrategias efectivas que prolonguen la VU de los alimentos y mejoren la seguridad alimentaria.

En cuanto a las perspectivas de esta investigación, se apunta hacia el desarrollo de enfoques más integrados y multidisciplinarios para abordar la complejidad de la VU de los alimentos, especialmente en productos de panificación. Se espera que la innovación en técnicas de modelado cinético, junto con avances en biotecnología y nanotecnología, permita superar los desafíos actuales relacionados con la variabilidad biológica y las reacciones interconectadas en los alimentos. Además, la adopción de estrategias sostenibles y prácticas de reducción de desperdicios, en consonancia con una mejor comprensión de los factores que afectan la VU, podría conducir a mejoras significativas en la seguridad alimentaria y la eficiencia de recursos. La colaboración entre científicos de alimentos, tecnólogos, la industria alimentaria y reguladores será clave para implementar soluciones innovadoras que prolonguen la vida útil de los alimentos, manteniendo su calidad y seguridad para el consumidor.

2.10. Referencias

- Abu, F., Fahmi, A., Abu Al-Rub, F., Shibhab, P., Pittia, P., & Paparella, A. (2020). *Food Safety Hazards*. <https://doi.org/10.29011/978-1-951814-03-8-005>
- Aguilar-Estrada, A. E., Caamal-Cauich, I., Barrios-Puente, G., & Ortiz-Rosales, M. A. (2019). ¿Hambre en México? Una alternativa metodológica para medir seguridad alimentaria. *Estudios Sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 29(53). <https://doi.org/10.24836/es.v29i53.625>
- Ai, J., Witt, T., Cowin, G., Dhital, S., Turner, M. S., Stokes, J. R., & Gidley, M. J. (2018). Anti-staling of high-moisture starchy food: Effect of hydrocolloids, emulsifiers and enzymes on mechanics of steamed-rice cakes. *Food Hydrocolloids*, 83, 454–464. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.05.028>
- Alamri, M. S., Qasem, A. A. A., Mohamed, A. A., Hussain, S., Ibraheem, M. A., Shamlan, G., Alqah, H. A., & Qasha, A. S. (2021). Food packaging's materials: A food safety perspective. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(8), 4490–4499. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.04.047>
- Alpers, T., Kerpes, R., Frioli, M., Nobis, A., Hoi, K. I., Bach, A., Jekle, M., & Becker, T. (2021). Impact of Storing Condition on Staling and Microbial Spoilage Behavior of Bread and Their Contribution to Prevent Food Waste. *Foods*, 10(1), 76. <https://doi.org/10.3390/foods10010076>
- Bekelman, T. A., Santamaría-Ulloa, C., Dufour, D. L., & Dengo, A. L. (2016). Percepciones sobre disponibilidad de alimentos y autorreporte de ingesta alimentaria en mujeres urbanas costarricenses: Un estudio piloto. *Población y Salud En Mesoamérica*, 13(2). <https://doi.org/10.15517/psm.v13i2.22165>
- Buera, M. P., Roos, Y., Levine, H., Slade, L., Corti, H. R., Reid, D. S., Auffret, T., & Angell, C. A. (2011). State diagrams for improving processing and storage of foods, biological materials,

- and pharmaceuticals (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 83(8), 1567–1617. <https://doi.org/10.1351/PAC-REP-10-07-02>
- Bulgach, G., Vázquez Peña, F., Carrara, C., & Kopitowski, K. (2021). Inseguridad alimentaria en el Área de influencia del Centro de Medicina Familiar y Comunitaria “San Pantaleón” (Provincia de Buenos Aires). *Revista de La Facultad de Ciencias Médicas de Córdoba*, 78(4), 340–346. <https://doi.org/10.31053/1853.0605.v78.n4.30252>
- Burgos, V. E., & Armada, M. (2021). Microstructure and storage stability of precooked kiwicha products. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(11). <https://doi.org/10.1111/jfpp.15911>
- Caballero, P. A., Gómez, M., & Rosell, C. M. (2007). Improvement of dough rheology, bread quality and bread shelf-life by enzymes combination. *Journal of Food Engineering*, 81(1), 42–53. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.10.007>
- Cabeza Herrera, R. A., Cabeza Herrera Enrique Alfonso, C. H. E. A., & Pisciotti Ortega, D. A. (2015). Actividad inhibitoria de extractos de *Plutarchia coronaria* sobre *Salmonella*. *BISTUA REVISTA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS BASICAS*, 13(1), 46. <https://doi.org/10.24054/01204211.v1.n1.2015.1667>
- Carvajal-Larenas, F. E., Sánchez-Montoya, A., Criollo-Criollo, G., Garcés-López, C., Martínez-Ochoa, N., Terán-Maldonado, P., Reyes-Jácome, C., & Andrade-Cruz, J. (2021). Biopolímeros de cáscaras de mango y su importancia en la soberanía alimentaria. *ACI Avances En Ciencias e Ingenierías*, 13(1), 7. <https://doi.org/10.18272/aci.v13i1.1775>
- Chirife, J., Del Pilar Buera, M., & Labuza, T. P. (1996). Water activity, water glass dynamics, and the control of microbiological growth in foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 36(5), 465–513. <https://doi.org/10.1080/10408399609527736>
- De Oliveira Do Nascimento, K., Do Nascimento Dias Paes, S., & Maria Augusta, I. (2018). A Review ‘Clean Labeling’: Applications of Natural Ingredients in Bakery Products. *Journal of Food and Nutrition Research*, 6(5), 285–294. <https://doi.org/10.12691/jfnr-6-5-2>
- Debonne, E., Thys, M., Eeckhout, M., & Devlieghere, F. (2023). The potential of UVC decontamination to prolong shelf-life of par-baked bread. *Food Science and Technology International*, 108201322311621. <https://doi.org/10.1177/10820132231162170>
- Desk, A. F. S. (2023). The Science behind Bread Staling: Causes and Consequences. In *Ask The Food Scientists*.
- Dong, Y., & Karboune, S. (2021). A review of bread qualities and current strategies for bread bioprotection: Flavor, sensory, rheological, and textural attributes. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(2), 1937–1981. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12717>
- El Bilali, H., & Ben Hassen, T. (2020). Food Waste in the Countries of the Gulf Cooperation Council: A Systematic Review. *Foods*, 9(4), 463. <https://doi.org/10.3390/foods9040463>
- Espeche, R. R., & Rojo, M. D. (2021). Percepción sobre alimentación y modo de consumo de estudiantes de la asignatura Enseñanza en Enfermería. *Enfermería: Cuidados Humanizados*,

- 10(2), 145–159. <https://doi.org/10.22235/ech.v10i2.2417>
- Estudillo-Díaz, E. B., Gutiérrez-Miceli, F. A., González-Mendoza, D., Valdez-Salas, B., & Abud-Archila, M. (2022). Desarrollo y caracterización de películas activas con nanopartículas de plata obtenidas mediante síntesis verde. *Biocetnia*, 25(1), 109–115. <https://doi.org/10.18633/biotech.v25i1.1683>
- Fadda, C., Sanguinetti, A. M., Del Caro, A., Collar, C., & Piga, A. (2014). Bread Staling: Updating the View. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 13(4), 473–492. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12064>
- Ferrero, C. (2017). Hydrocolloids in wheat breadmaking: A concise review. *Food Hydrocolloids*, 68, 15–22. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.11.044>
- Galić, K., Čurić, D., & Gabrić, D. (2009). Shelf Life of Packaged Bakery Goods—A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 49(5), 405–426. <https://doi.org/10.1080/10408390802067878>
- Izzo, L., Luz, C., Ritieni, A., Mañes, J., & Meca, G. (2020). Whey fermented by using *Lactobacillus plantarum* strains: A promising approach to increase the shelf life of pita bread. *Journal of Dairy Science*, 103(7), 5906–5915. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17547>
- Jarosław Wyrwisz, M. K. (2015). The Application of Dietary Fiber in Bread Products. *Journal of Food Processing & Technology*, 06(05). <https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000447>
- Jensen, S., Oestdal, H., Clausen, M. R., Andersen, M. L., & Skibsted, L. H. (2011). Oxidative stability of whole wheat bread during storage. *LWT - Food Science and Technology*, 44(3), 637–642. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.10.011>
- Katina, K., Salmenkallio-Marttila, M., Partanen, R., Forssell, P., & Autio, K. (2006). Effects of sourdough and enzymes on staling of high-fibre wheat bread. *LWT - Food Science and Technology*, 39(5), 479–491. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.03.013>
- Kirit, A. B., Erdogdu, F., & Ozdemir, Y. (2013). Accumulation of 5-Hydroxymethyl-2-Furfural During Toasting of White Bread Slices. *Journal of Food Process Engineering*, 36(2), 241–246. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2012.00677.x>
- Lai, D.-J., & Heldman, D. R. (1982). Analysis of Kinetics of Quality Change in Frozen Foods. *Journal of Food Process Engineering*, 6(4), 179–200. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.1982.tb00291.x>
- Lebesi, D. M., & Tzia, C. (2011). Staling of Cereal Bran Enriched Cakes and the Effect of an Endoxylanase Enzyme on the Physicochemical and Sensorial Characteristics. *Journal of Food Science*, 76(6). <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2011.02220.x>
- Liu, A., Xu, R., Zhang, S., Wang, Y., Hu, B., Ao, X., Li, Q., Li, J., Hu, K., Yang, Y., & Liu, S. (2022). Antifungal Mechanisms and Application of Lactic Acid Bacteria in Bakery Products: A Review. *Frontiers in Microbiology*, 13, 924398. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.924398>
- Lúcia F. Pereira, A., & Kelly G. Abreu, V. (2020). Lipid Peroxidation in Meat and Meat Products. In M. Ahmed Mansour (Ed.), *Lipid Peroxidation Research*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.81533>

- Majzoobi, M., Raissjalali, A., Jamalain, J., & Farahnaky, A. (2015). Effect of White Wheat Flour Substitution with Whole Oat Flour on Physical Properties of Part-Baked Frozen Bread. *Journal of Texture Studies*, 46(6), 411–419. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12139>
- Martinez Giron, J., Figueroa Sepúlveda, K., & Castillo Robles, N. Z. (2021). Aplicación de altas presiones y otras tecnologías en frutas como alternativa de tratamientos térmicos convencionales. *Bioteología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 19(2), 271–285. <https://doi.org/10.18684/bsaa.v19.n2.2021.1772>
- 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>
- Mondal, A., & Datta, A. K. (2008). Bread baking – A review. *Journal of Food Engineering*, 86(4), 465–474. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.11.014>
- Mundo-Rosas, V., Unar-Munguía, M., Hernández-F, M., Pérez-Escamilla, R., & Shamah-Levy, T. (2019). La seguridad alimentaria en los hogares en pobreza de México: Una mirada desde el acceso, la disponibilidad y el consumo. *Salud Pública de México*, 61(6, nov-dic), 866. <https://doi.org/10.21149/10579>
- Nahar, N., Madzuki, I. N., Ab Karim, M. S., Ghazali, H. M., & Karim, R. (2019). Bakery Science of Bread and the Effect of Salt Reduction on Quality: A Review. *Borneo Journal of Sciences and Technology*, 9–14. <https://doi.org/10.35370/bjost.2019.1.1-03>
- Nguyen, T.-L., Toh, M., Lu, Y., Ku, S., & Liu, S.-Q. (2022). Biovalorization of Market Surplus Bread for Development of Probiotic-Fermented Potential Functional Beverages. *Foods*, 11(3), 250. <https://doi.org/10.3390/foods11030250>
- Niu, B. K., Olajide, T. M., Liu, H. A., Pasdar, H., & Weng, X. C. (2021). Effects of different baking techniques on the quality of walnut and its oil. *Grasas y Aceites*, 72(2), e406. <https://doi.org/10.3989/gya.1142192>
- Opondo, F., Nakhumicha, A., & Anyango, J. (2022). Microbiological Assessment and Shelf-Life Determination of Wheat Muffins Enriched with Domesticated African Emperor Moth (*Gonimbrasia zambesina* Walker) Caterpillar Flour. *Food and Nutrition Sciences*, 13(08), 734–749. <https://doi.org/10.4236/fns.2022.138053>
- Ortega Ibarra, E., Ortega Ibarra, I. H., Rodríguez-López, E., & Luis Pineda, C. (2021). Breve análisis crítico de la sobreoferta y consumo de alimentos industrializados en México, antes y durante el COVID-19. *Educación y Salud Boletín Científico Instituto de Ciencias de La Salud Universidad Autónoma Del Estado de Hidalgo*, 10(19), 54–59. <https://doi.org/10.29057/icsa.v10i19.7274>
- Palau, A., & Russolillo, G. (2017). Una mayor presencia de dietistas-nutricionistas en el sector público podría mejorar la eficiencia del sistema sanitario público español. *Revista Española de Nutrición Humana y Dietética*, 21(2), 98–100. <https://doi.org/10.14306/renhyd.21.2.432>
- Pateras, I. M. C. (2007). Bread Spoilage and Staling. In *Technology of Breadmaking* (pp. 275–298). Springer US. https://doi.org/10.1007/0-387-38565-7_10

- Purhagen, J. K., Sjöö, M. E., & Eliasson, A.-C. (2011). Starch affecting anti-staling agents and their function in freestanding and pan-baked bread. *Food Hydrocolloids*, 25(7), 1656–1666. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.03.004>
- Rayas-Duarte, P., & Murtini, E. S. (2020). Bread staling. In *Breadmaking* (pp. 561–585). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102519-2.00019-0>
- Rezende, C. L. E., Castania, V. D. P., Rezende-Lago, N. C. M. D., Marchi, P. G. F. D., Silva, L. A., Amorim, G. C. D., Vital, J., Justo, K. N., Souza, M. L. D., Brandão, L. D. S., Torres, O. D. S., Maia, G., & Messias, C. T. (2021). Qualidade microbiológica de alimentos. *Research, Society and Development*, 10(14), e572101422344. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i14.22344>
- Rico, D., González-Paramás, A. M., Brezmes, C., & Martín-Diana, A. B. (2020). Baking Optimization as a Strategy to Extend Shelf-Life through the Enhanced Quality and Bioactive Properties of Pulse-Based Snacks. *Molecules*, 25(16), 3716. <https://doi.org/10.3390/molecules25163716>
- Rinaldi, M., Paciulli, M., Caligiani, A., Sgarbi, E., Cirlini, M., Dall'Asta, C., & Chiavaro, E. (2015). Durum and soft wheat flours in sourdough and straight-dough bread-making. *Journal of Food Science and Technology*, 52(10), 6254–6265. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-1787-2>
- Rizzello, C. G., Cassone, A., Coda, R., & Gobetti, M. (2011). Antifungal activity of sourdough fermented wheat germ used as an ingredient for bread making. *Food Chemistry*, 127(3), 952–959. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.01.063>
- Roos, Y., & Karel, M. (1991). Amorphous state and delayed ice formation in sucrose solutions. *International Journal of Food Science & Technology*, 26(6), 553–566. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1991.tb02001.x>
- Saeed, I., Shaheen, S., Hussain, K., Khan, M. A., Jaffer, M., Mahmood, T., Khalid, S., Sarwar, S., Tahir, A., & Khan, F. (2019). Assessment of mold and yeast in some bakery products of Lahore, Pakistan based on LM and SEM. *Microscopy Research and Technique*, 82(2), 85–91. <https://doi.org/10.1002/jemt.23103>
- Salehi, F. (2020). Effect of common and new gums on the quality, physical, and textural properties of bakery products: A review. *Journal of Texture Studies*, 51(2), 361–370. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12482>
- Sánchez-González, J. A., & Pérez, J. A. (2016). Sensory shelf life of mantecoso cheese using accelerated testing. *Scientia Agropecuaria*, 7, 215–222. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2016.03.08>
- Skudra, L., Loba, K., & Kunkulberga, D. (2019). Shelf life assessment of meat pies. *13th Baltic Conference on Food Science and Technology “FOOD. NUTRITION. WELL-BEING”*, 269–272. <https://doi.org/10.22616/FoodBalt.2019.046>
- Smith, J. P., Daifas, D. P., El-Khoury, W., Koukoutsis, J., & El-Khoury, A. (2004). Shelf Life and Safety Concerns of Bakery Products—A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 44(1), 19–55. <https://doi.org/10.1080/10408690490263774>
- Solórzano, J. L., & Solís, V. A. (2014). Estado de la seguridad alimentaria nutricional a partir de la medición del nivel de adecuación energética y diversidad de la dieta en seis municipios de Nicaragua

- en los años 2012 y 2013. *Encuentro*, 97, 51–69. <https://doi.org/10.5377/encuentro.v0i97.1436>
- Stöllman, U., & Lundgren, B. (1987). Texture changes in white bread: Effects of processing and storage. *Cereal Chemistry*, 64(4), 230–236.
- Taglieri, I., Macaluso, M., Bianchi, A., Sanmartin, C., Quartacci, M. F., Zinnai, A., & Venturi, F. (2021). Overcoming bread quality decay concerns: Main issues for bread shelf life as a function of biological leavening agents and different extra ingredients used in formulation. A review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(5), 1732–1743. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10816>
- Tavill, G. (2020). Industry challenges and approaches to food waste. *Physiology & Behavior*, 223, 112993. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2020.112993>
- Toma, L., Revoredo-Giha, C., Costa-Font, M., & Thompson, B. (2020). Food Waste and Food Safety Linkages along the Supply Chain. *EuroChoices*, 19(1), 24–29. <https://doi.org/10.1111/1746-692X.12254>
- Torrijos, R., Nazareth, T., Pérez, J., Mañes, J., & Meca, G. (2019). Development of a Bioactive Sauce Based on Oriental Mustard Flour with Antifungal Properties for Pita Bread Shelf Life Improvement. *Molecules*, 24(6), 1019. <https://doi.org/10.3390/molecules24061019>
- Urquía-Fernández Robles, N. (2013). La seguridad alimentaria en México. *Salud Pública de México*, 56, 92. <https://doi.org/10.21149/spm.v56s1.5171>
- 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>
- Vega-Macedo, M., Shamah-Levy, T., Peinador-Roldán, R., Méndez-Gómez Humarán, I., & Melgar-Quiñónez, H. (2013). Inseguridad alimentaria y variedad de la alimentación en hogares mexicanos con niños menores de cinco años. *Salud Pública de México*, 56, 21. <https://doi.org/10.21149/spm.v56s1.5162>
- Vignali, G., & Volpi, A. (2013). Analysis and Evaluation of Cooking Parameters for Sweet Bakery Products. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 5(7), 843–854. <https://doi.org/10.19026/ajfst.5.3171>
- Wanjiku Kiharason, J. (2019). Shelf-Life of Pumpkin Fruit Slices, Flour and Blended Products. *International Journal of Food Science and Biotechnology*, 4(1), 14. <https://doi.org/10.11648/j.ijf.sb.20190401.13>
- Wanjuu, C., Abong, G., Mbogo, D., Heck, S., Low, J., & Muzhingi, T. (2018). The physiochemical properties and shelf-life of orange-fleshed sweet potato puree composite bread. *Food Science & Nutrition*, 6(6), 1555–1563. <https://doi.org/10.1002/fsn3.710>
- Wells, J. H., & Singh, R. P. (1988). A Kinetic Approach to Food Quality Prediction Using Full-History Time-Temperature Indicators. *Journal of Food Science*, 53(6), 1866–1871. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1988.tb07863.x>
- Wood, A. R., Garg, R., Cohen-Karni, T., Russell, A. J., & LeDuc, P. (2021). Toward sustainable desalination using food waste: Capacitive desalination with bread-derived electrodes. *RSC*

-
- Advances*, 11(16), 9628–9637. <https://doi.org/10.1039/D0RA10763H>
- Wu, W., Cronjé, P., Verboven, P., & Defraeye, T. (2019). Unveiling how ventilated packaging design and cold chain scenarios affect the cooling kinetics and fruit quality for each single citrus fruit in an entire pallet. *Food Packaging and Shelf Life*, 21, 100369. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100369>

CAPÍTULO 3

Estudio de vida útil de conchas de vainilla

Resumen

EN el presente capítulo, se abordó la problemática del desperdicio de alimentos y su impacto en la inocuidad alimentaria, con un enfoque particular en la vida útil (VU) de las concha(s) de vainilla (CV), un subproducto en la industria mexicana panadera con gran relevancia económica, cultural y ambiental. Tomando en cuenta lo anterior, el objetivo principal fue analizar cómo el tipo de empaque, la temperatura y el tiempo de almacenamiento afectan los atributos fisicoquímicos de calidad de las CV, tales como el peso, el contenido de humedad y la actividad de agua (AW); para así determinar el modelo cinético que mejor se ajusta a la evolución de estos atributos durante el almacenamiento. Para ello, se utilizaron muestras de CV proporcionadas por una empresa productora hidalguense de pan, y se llevaron a cabo pruebas de aw, cambios en el peso y contenido de humedad. Posteriormente se aplicó un análisis estadístico y se modelaron los datos utilizando modelos cinéticos, encontrando que el modelo de segundo orden se ajustaba mejor a las condiciones y resultados del estudio, con altos valores de R^2 para todos los atributos y temperaturas estudiadas. Los resultados indicaron que tanto la temperatura como el tiempo de almacenamiento tienen un impacto significativo en la calidad de las CV, y que la interacción entre las condiciones de almacenamiento y la temperatura es crucial para comprender su estabilidad y calidad. Además, se calcularon la constante de velocidad y se realizaron análisis termodinámicos para obtener una comprensión más profunda de los procesos que afectan la calidad de las CV durante su almacenamiento. En conclusión, este trabajo ayudó a resaltar la importancia de comprender e implementar el modelado cinético de los atributos de calidad de los alimentos para la toma de decisiones estadísticamente sustentadas en cuanto a la formulación, el procesamiento y el almacenamiento de productos de panificación, con el fin de preservar la calidad y seguridad de estos productos alimenticios, además de aportar herramientas a la industria alimentaria para la mejora de condiciones de almacenamiento y manejo de inventarios.

Las perspectivas futuras sugieren que habría una ventaja considerable en la integración de la ciencia de datos y la inteligencia artificial para desarrollar sistemas de monitoreo en tiempo real que puedan predecir la VU de los alimentos y como resultado, reducir el desperdicio de alimentos en la industria y mejorar la seguridad alimentaria (SA).

3.1. Introducción

La vida útil (VU) del pan es un factor clave para evitar su desperdicio, debido a que están directamente ligados con la calidad e inocuidad alimentaria. Como una matriz alimentaria el pan sufre diversos cambios durante su almacenamiento, estos se pueden clasificar según su naturaleza: primero los cambios físicos, que incluyen el envejecimiento del pan y la redistribución de la humedad, los cambios químicos incluyen la rancidez y cambios en los valores nutricionales, y segundo los cambios microbiológicos incluyen presencia de levaduras, moho y deterioro microbiológico; un mal manejo del producto durante su almacenamiento promueve estos cambios no deseados, así mismo afecta la seguridad alimentaria (SA) (Taglieri et al., 2021).

Establecer la relación entre la VU y el desperdicio del pan es necesario para comprender el impacto del desperdicio de pan en la SA. La VU del pan se refiere al período durante el cual el pan mantiene su calidad, frescura e inocuidad alimentaria para el consumo humano. El desperdicio de pan ocurre cuando el pan alcanza el final de su VU y ya no es apto para el consumo, lo que conduce a su descarte. La relación entre la VU y el desperdicio del pan se evidencia en el impacto económico y ambiental del desperdicio de alimentos. El desperdicio de pan debido a la pérdida de VU representa una pérdida de recursos económicos y contribuye a la generación de residuos, lo que afecta la sostenibilidad del sistema alimentario (Kazakos et al., 2022). Además, el desperdicio de pan debido al deterioro y la pérdida de vida útil puede influir en la disponibilidad y el acceso a alimentos, lo que a su vez afecta la SA (Alpers et al., 2021).

Por lo tanto para comprender cómo la pérdida de humedad y los cambios de textura afectan la VU del pan, es esencial considerar el impacto de estos factores en las propiedades físicas y químicas del pan. La pérdida de humedad y la a_w , influye en la tasa de envejecimiento del pan, de manera que un menor contenido de humedad acelera el proceso de envejecimiento. Esto está respaldado por investigaciones que indican que existe una relación exponencial entre la humedad relativa y la degradación de los componentes, lo que demuestra el impacto de la humedad en la estabilidad química (Esperanza-Naranjo et al., 2018). Además, los cambios en la textura, como el aumento de la dureza y la pérdida de elasticidad, son característicos del envejecimiento del pan, lo que afecta su calidad general y la aceptación del consumidor. Estos cambios en la textura son cruciales para determinar la aceptabilidad y la vida útil de productos tales como el pan (Calvo Carrillo et al., 2020).

Como se ha mencionado resulta difícil generalizar la solución al problema de envejecimiento debido a que en cada producto el desarrollo de este fenómeno es diferente dependiendo de sus características

de formulación, procesamiento y almacenamiento. En México existe gran variedad de productos de panificación, cada uno con diferentes características que le confieren sus texturas y sabores únicos, entre esta variedad se encuentra quizá uno de los panes más tradicionales en México, la concha, este pan incluye en su formulación ingredientes como azúcar, mantequilla y huevos que le otorgan una textura suave y esponjosa característica de este pan, además de que es decorada con una pasta dulce moldeada para imitar una concha de mar y que puede variar en sabores y colores. Dicho pan en su variedad de CV, ilustradas en la Figura 3.1 fue el objeto de estudio del presente trabajo (Osorio-Díaz et al., 2014).

Para conocer las posibles características y factores de deterioro que influyen en las CV, en el presente estudio se consideró el siguiente proceso tradicional para la elaboración de conchas:

1. Para poder elaborar una concha de vainilla el primer paso es hacer la recepción de la materia prima, así como de los materiales para embalaje (empaquetado), es importante verificar la orden de compra, inspeccionar los materiales, en caso de que no cumplan con las características especificadas, recibirlos y estibar la materia prima. Una vez que sean aprobadas, éstas deben llevarse directamente al área de almacenamiento y tienen que ser ubicadas en su lugar correspondiente.
2. Inmediatamente que se vayan a elaborar piezas de pan, es necesario dosificar las materias primas según la formulación indicada por la marca, seguidamente se verifica que la cantidad de cada una sea la correcta con base en el manual, si no es el caso es necesario regresarlas al almacén.
3. Posteriormente se tienen que mezclar todos los ingredientes en un recipiente adecuado que permita batir y/o amasarlos, primero durante 3 min a una velocidad para después 17 min., a una velocidad menor. Cuando ya esta lista la masa hay que esparcir aceite sobre una mesa limpia o charola y vaciarla sobre ella para poder racionar en porciones de 2.26 kg y apretar un poco haciendo un movimiento de traer las esquinas al centro de la masa.
4. Colocar la masa en una charola y con la ayuda de una máquina o cortadores realizar la división de la masa en 36 piezas, colocarlas sobre una charola untada con manteca (las que quepan), bolearlas hasta formar una esfera uniforme y untarles manteca vegetal en la superficie para finalmente colocar las charolas en los carros espigueros.
5. Ya cuando estén en los carros será necesario cubrirlas con la pasta de vainilla, aproximadamente 15 g en cada una, y marcarlas con la forma característica de una concha de mar.
6. Antes de hornearlas es necesario dejar que la masa fermente a una temperatura ambiente o en cámara de fermentación, ya que doble su tamaño se hornean de 160 a 175°C de 25 a 30 min., pasado ese tiempo sacar las conchas del horno e inmediatamente asperjar el conservador en toda la superficie del pan dejando que se enfríen a 20°C.
7. Concluyendo con el proceso, las piezas serán empacadas en una película transparente de 30 cm y se colocará la etiqueta al reverso del producto, en donde se menciona la fecha de caducidad y el lote.



Figura 3.1: Conchas de vainilla.

El proceso anterior se puede ver ilustrado en la Figura 3.2.

En base a todo lo anterior, el objetivo de este capítulo fue investigar y comprender el impacto del empaque, la temperatura y el tiempo de almacenamiento sobre los atributos fisicoquímicos de calidad de las CV relacionados con el fenómeno del envejecimiento del pan, abordando las preguntas de investigación: ¿Qué factores específicos inciden en la calidad de estos producto?, ¿Cómo dichos factores interactúan entre sí? y ¿Cuál es la relevancia práctica y teórica de este conocimiento?, esto con la finalidad de contribuir a optimizar las condiciones de almacenamiento y eventualmente, contribuir a la reducción del desperdicio en la industria panadera. Adicionalmente, este estudio pretende ofrecer una comprensión más profunda de los procesos que influyen en la calidad de las CV, con implicaciones tanto prácticas como teóricas en el ámbito de la ciencia de alimentos.

3.2. Materiales y métodos

3.2.1. Metodología general

En la Figura 3.3 se presenta la metodología seguida para estudiar la influencia del empaque en un pan comercial, la primera serie de muestras se analizaron con el empaque de polietileno que originalmente tienen los productos y posteriormente la segunda serie se analizó sin este empaque.

3.2.2. Muestras

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

3.2.3. Estudio de la vida útil de concha de vainilla

La Tabla 3.1 resume de manera concisa y organizada las distintas combinaciones de estudio condiciones de estudio (CE) utilizadas en el experimento. Clasifica las observaciones por condiciones de empaque, temperatura y tiempo, proporcionando una visión general de las configuraciones experimentales empleadas. Esta tabla facilita la identificación rápida de los escenarios de estudio, permitiendo una comprensión eficiente de las variaciones en las condiciones que impactan en las CV durante el período de almacenamiento.

Tabla 3.1: Resumen de las condiciones de estudio (CE).

Condiciones	Empaque	Temperatura (°C)	Tiempo (días)
CE1	ConEmpaque	20	0-36
CE2	ConEmpaque	30	0-36
CE3	ConEmpaque	40	0-20
CE4	SinEmpaque	20	0-20

Condiciones	Empaque	Temperatura (°C)	Tiempo (días)
CE5	SinEmpaque	30	0-20
CE6	SinEmpaque	40	0-20

3.2.4. Determinación de los atributos fisicoquímicos de calidad

La determinación de los atributos fisicoquímicos de calidad de las CV fue realizada de acuerdo a un estudio previo en donde se trabajó con *muffins* de vainilla (Gálvez-Toledo et al., 2023).

Actividad de agua

Antes de medir el aw en las muestras, se llevó a cabo una calibración en el Aqualab (DECAGON, Modelo: Serie 3TE, Washington) utilizando agua desionizada. Una vez obtenido un valor dentro del rango de 0.997-1.003 a temperatura ambiente, se colocó la muestra en una de las celdas y se registraron los resultados proporcionados por el equipo. Fueron utilizadas muestras de cada una de las condiciones de estudio. Las determinaciones fueron realizadas por triplicado.

Cambio en el peso

Para evaluar la variación de peso en las muestras de CV durante el almacenamiento en las diversas condiciones de estudio, se pesaron las piezas (inicialmente de aproximadamente 79 g) utilizando una balanza analítica (Ohaus) a temperatura ambiente. Se llevaron a cabo triplicados en cada determinación.

Contenido de humedad

Se siguió el procedimiento según la NOM-116-SSA1-1994. Se mantuvieron charolas de aluminio, previamente etiquetadas y sin contacto directo, a peso constante. Estas charolas fueron colocadas en una estufa (Lab-Line) a una temperatura de 65-70°C durante al menos 1 hora. Luego de reposar en un desecador, se pesaron. Si no se alcanzaba un peso constante de al menos 0.0010 unidades en el primer intento, se repetía el proceso. Se evitó el contacto directo durante todo el procedimiento. Para el análisis, se seleccionó una muestra de CV de cada una de las condiciones de estudio. Después de pulverizar las muestras, se añadieron uniformemente 5 g en cada charola. Estas charolas fueron colocadas en la estufa (Lab-Line) a 65°C y se mantuvieron ahí durante al menos 4 horas hasta obtener un peso constante. Luego de 10 minutos en un desecador, se procedió a pesarlas. Los análisis fueron realizados por triplicado.

3.2.5. Análisis estadístico

El conjunto de datos utilizado se organizó de acuerdo con las indicaciones de la Sección A.1, simplificando así la realización de pruebas estadísticas y la creación de gráficos a través de R. Todas las pruebas estadísticas se llevaron a cabo utilizando el lenguaje de programación R (v4.1.2) y su entorno de desarrollo integrado RStudio (v2023.12.0) (Contreras-López et al., 2022).

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) factorial y una prueba de Tukey post-hoc ($p < 0.05$) para evaluar el impacto del tiempo, el tipo de empaque y la temperatura de almacenamiento en

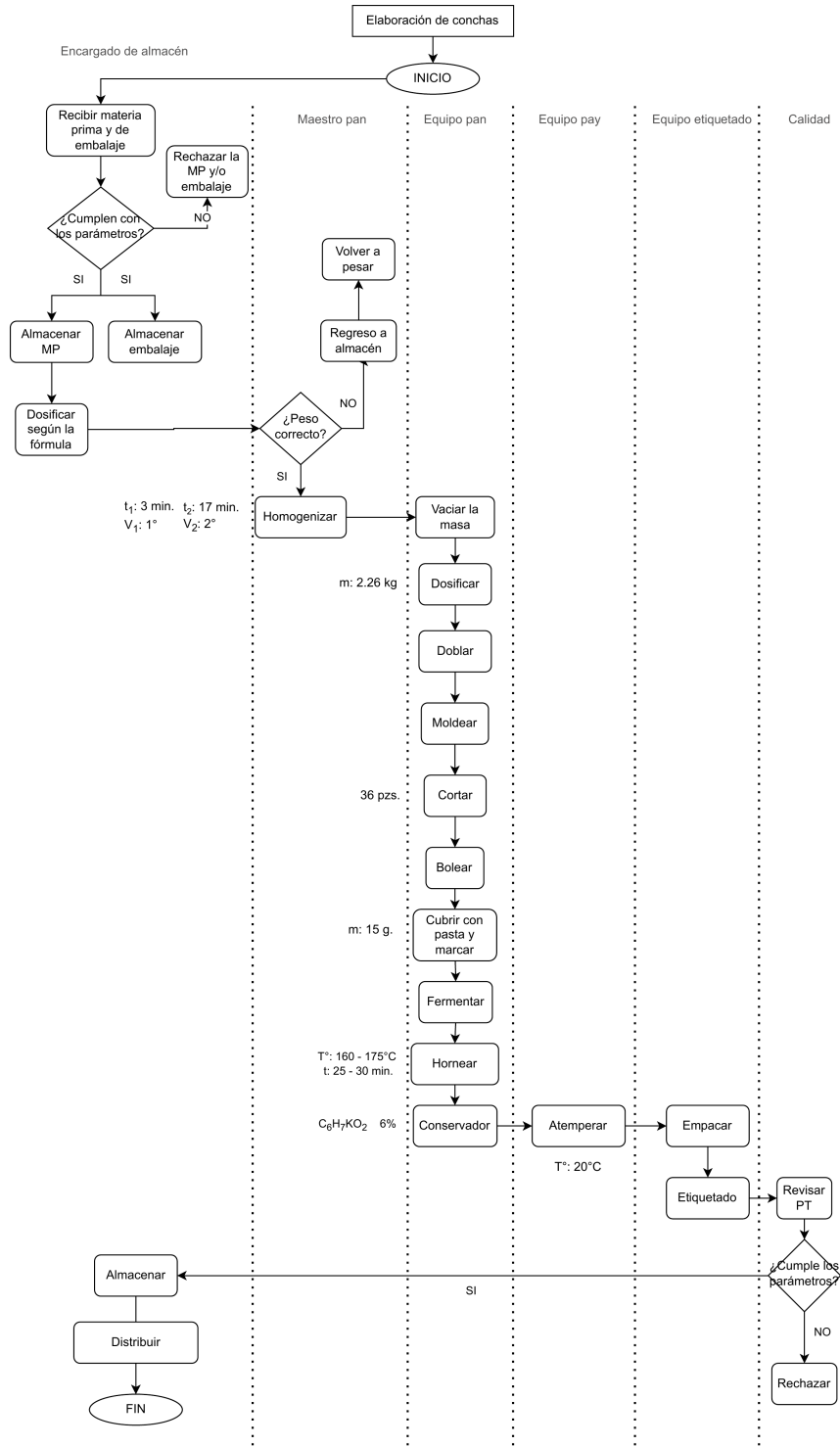


Figura 3.2: Diagrama de elaboración de conchas de vainilla.

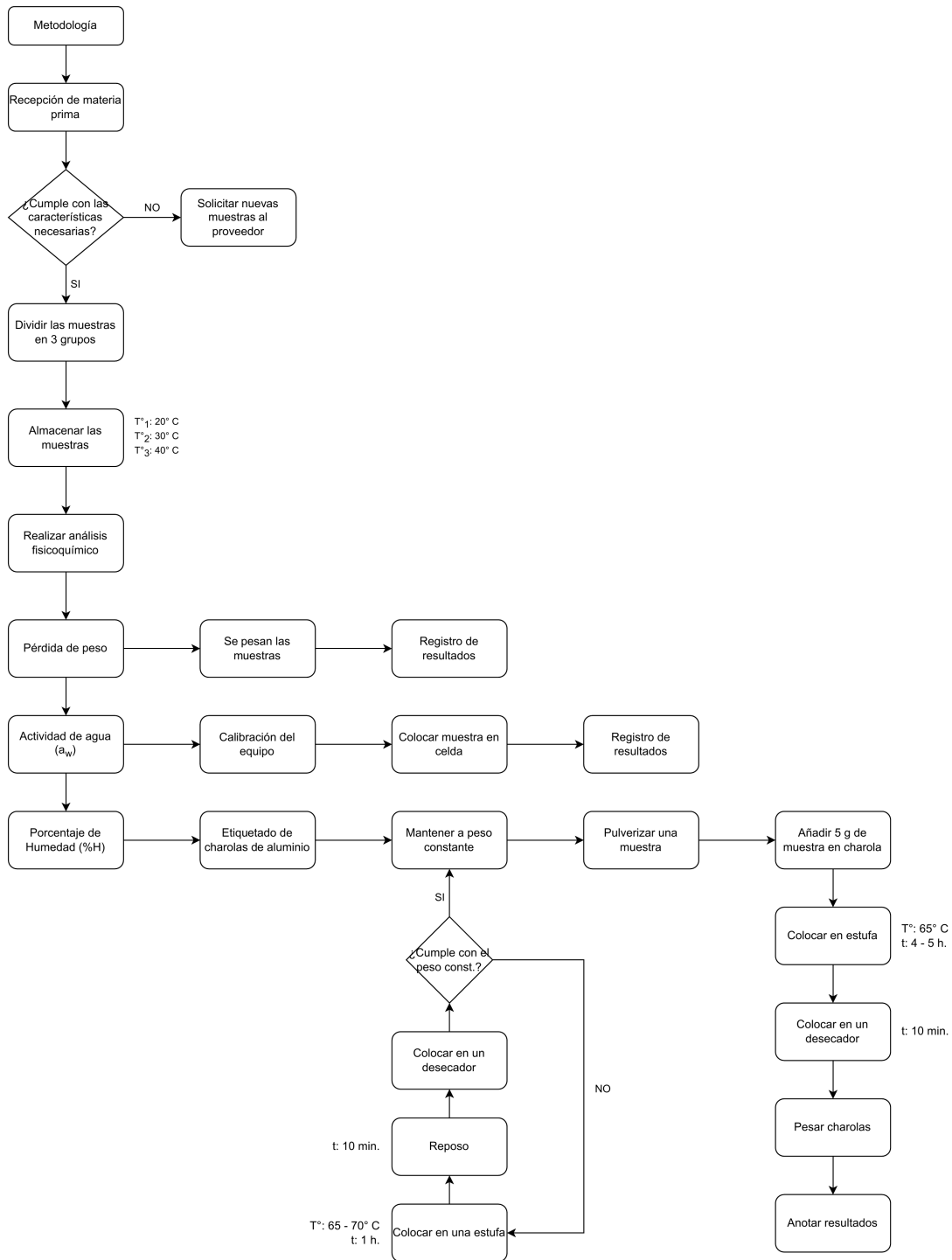


Figura 3.3: Metodología para el estudio de la influencia del empaque en pan comercial.

los cambios de los atributos fisicoquímicos de calidad de las CV de vainilla. El análisis factorial se implementó utilizando el código en R presentado en la Subsección A.2.1. La evaluación de la influencia de la temperatura y el tipo de empaque en los atributos fisicoquímicos de calidad se llevó a cabo según el procedimiento detallado en la Subsección A.2.2.

Posteriormente, se realizó un ANOVA de una vía y una prueba de Tukey post-hoc ($p < 0.05$) para identificar diferencias significativas en el tiempo de almacenamiento durante la prueba. La influencia del tiempo de almacenamiento en los atributos fisicoquímicos de calidad se examinó en R, como se presenta en la Subsección A.2.3.

3.2.6. Análisis cinético de los atributos fisicoquímicos de calidad en conchas de vainilla

Con el propósito de comprender las transformaciones en los atributos fisicoquímicos de calidad en CV en su empaque, durante el almacenamiento en diversas CE, se implementaron distintos modelos cinéticos mostrados en las Ecuaciones 3.1, 3.2 y 3.3. Estos modelos fueron aplicados para ajustar los datos experimentales, permitiendo así evaluar y determinar cuál de ellos ofrece la descripción más precisa del comportamiento de estos atributos en relación con el tiempo. Este enfoque cinético proporciona información esencial sobre la dinámica de los cambios en los atributos, facilitando una comprensión más profunda de la evolución de la calidad de las CV en el transcurso del tiempo y bajo distintas condiciones de almacenamiento (Contreras-López et al., 2022; Gálvez-Toledo et al., 2023; García-Curiel et al., 2023; Jaimez-Ordaz et al., 2019).

$$Q = Q_0 \pm kt \quad (3.1)$$

$$\ln Q = \ln Q_0 \pm kt \quad (3.2)$$

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_0} \pm kt \quad (3.3)$$

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.

3.2.7. Influencia de la temperatura sobre la constante de velocidad

La ecuación de Arrhenius, Ecuación 3.4, fue utilizada para comprobar la dependencia de las k con respecto a la temperatura de almacenamiento (Contreras-López et al., 2022; Jaimez-Ordaz et al., 2019).

$$\ln k = -\frac{E_A}{RT} + \ln A \quad (3.4)$$

Donde:

- k es la constante de velocidad de la reacción.
- A es el factor preexponencial o factor de frecuencia.
- E_A es la energía de activación ($J/molK$).
- R es la constante de los gases ideales ($8.3145 J/molK$).
- T es la temperatura absoluta (K).

Posteriormente, fue calculado el factor Q_{10} con la Ecuación 3.5 (Contreras-López et al., 2022; Jaimez-Ordaz et al., 2019).

$$\ln Q_{10} = \frac{E_A}{R} \frac{10}{T(T+10)} \quad (3.5)$$

3.2.8. Análisis termodinámico

El análisis termodinámico fue realizado como se describió en investigaciones previas (Contreras-López et al., 2022; Jaimez-Ordaz et al., 2019). Se determinaron la entalpía de activación (ΔH^\ddagger), la energía libre de activación (ΔG^\ddagger) y la entropía de activación (ΔS^\ddagger). En primer lugar, los valores de ΔH^\ddagger y ΔS^\ddagger se determinaron mediante la regresión de $\ln k/T$ como función de la inversa de la temperatura (T, K) a través de la ecuación derivada de la teoría del complejo activado. Los valores de ΔH^\ddagger y ΔS^\ddagger se calcularon a partir de la pendiente y la ordenada al origen. Finalmente, para una reacción a una temperatura dada (T), el valor de ΔG^\ddagger puede calcularse en función de ΔH^\ddagger y ΔS^\ddagger .

3.3. Resultados y discusión

3.3.1. Influencia del empaque, de la temperatura y del tiempo de almacenamiento

Los resultados del ANOVA factorial se muestran en el material suplementario en la Subsección A.3. La Tabla A.2 muestra los resultados del ANOVA para la variación del peso (masa) de las CV lo que revela que son estadísticamente significativos en varios niveles de los factores evaluados. Específicamente, el tipo de empaque (A) muestra una tendencia a ser significativo ($p = 0.0656$), mientras que la temperatura (B) y el tiempo de almacenamiento (C) exhiben una alta significancia estadística ($p < 0.001$). Además, las interacciones entre estos factores también son altamente significativas ($p < 0.001$), destacando la complejidad de las relaciones entre ellos.

En relación con el contenido de humedad de las CV, todos los factores principales (A, B, y C) y sus interacciones presentan altamente significativos valores de p ($p < 0.001$). Esto sugiere que tanto el tipo de empaque como la temperatura y el tiempo de almacenamiento tienen un impacto

significativo en el contenido de humedad de las CV, y sus interacciones también son relevantes en la comprensión de este atributo. Los resultados pueden ser observados en la Tabla A.3.

En cuanto a la a_w de las CV, todos los factores principales y sus interacciones son altamente significativos ($p < 0.001$). Esto indica que el tipo de empaque, la temperatura y el tiempo de almacenamiento influyen significativamente en la a_w de las CV. Las interacciones entre estos factores también resaltan la complejidad de los efectos combinados sobre este atributo. Los resultados pueden ser observados en la Tabla A.4.

En esta investigación, se exploró la influencia del empaque y de la temperatura de almacenamiento en la variación de peso, contenido de humedad y a_w , como se muestra en los diagramas de cajas y bigotes (*boxplots*) presentados en las Figuras 3.4, 3.5 y 3.6, respectivamente. Este estudio abarcó análisis exploratorios de estos tres atributos fisicoquímicos de calidad en diversas CE.

La Figura 3.4 muestra la variación del peso (masa) de las CV bajo diferentes condiciones de estudio. Se observa una clara tendencia a medida que la temperatura aumenta. Las muestras con presencia del empaque (C1, C2 y C3) muestran una menor pérdida de peso, como se indica por la mediana y el tercer cuartil. Además, la dispersión de los datos, representada por la longitud de los bigotes, también tiende a aumentar con la temperatura. La presencia de valores atípicos (*outliers*), especialmente a temperaturas más altas, sugiere la posible influencia de condiciones extremas en la variabilidad de la masa durante el almacenamiento.

En el segundo análisis, Figura 3.5, se examinó la variación del contenido de humedad de las muestras bajo distintas CE. Similar al análisis de masa, se observa una relación con la temperatura. Las muestras expuestas a temperaturas más altas tienden a tener niveles de humedad más bajos, como se refleja en la posición de la mediana y el tercer cuartil en los diagramas de cajas y bigotes. La presencia de valores atípicos (*outliers*) en el extremo superior indica que algunas muestras presentan niveles de humedad excepcionalmente bajos, lo que podría deberse a condiciones específicas de estudio, como la ausencia del empaque.

En la Figura 3.6 se centra en la a_w de las muestras bajo diferentes condiciones de estudio. Nuevamente, se observó una relación con la temperatura, donde las muestras a temperaturas más altas tienden a tener menores valores de a_w , de acuerdo con la mediana y el tercer cuartil. La variabilidad de los datos, como se representa en la longitud de los bigotes, aumenta con la temperatura. La presencia de datos atípicos (*outliers*) indica que algunas muestras presentan valores de a_w que se desvían significativamente de la tendencia general.

En conjunto, estos diagramas de cajas y bigotes (*boxplots*) revelan patrones consistentes en los tres parámetros analizados bajo diferentes CE. La temperatura parece ser un factor influyente en las propiedades fisicoquímicas de las muestras de CV. La presencia de valores atípicos (*outliers*) en todos los parámetros sugiere la existencia de condiciones excepcionales que podrían afectar significativamente a ciertas muestras.

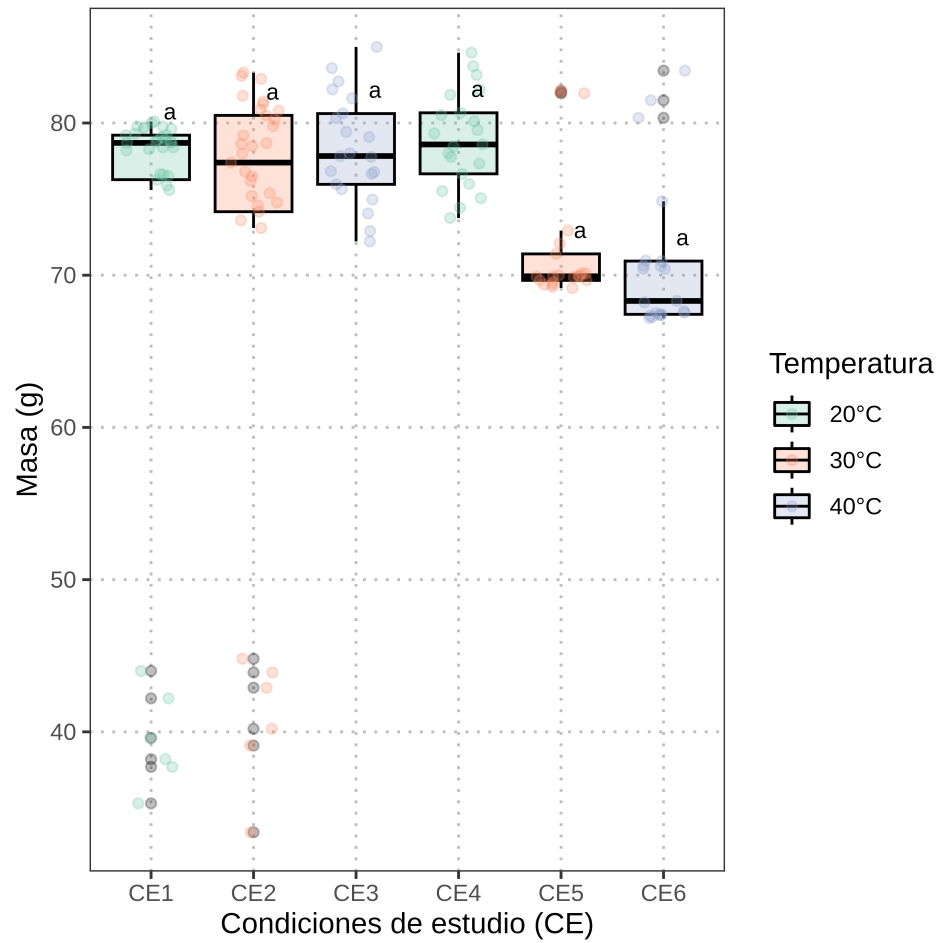


Figura 3.4: Valores de cambio en el peso (g) de conchas de vainilla obtenidos en diversas condiciones de estudio. Los diagramas de caja y bigotes, diferenciados por letras minúsculas, evidencian discrepancias significativas entre los conjuntos de datos en distintas temperaturas de almacenamiento ($p < 0.05$).

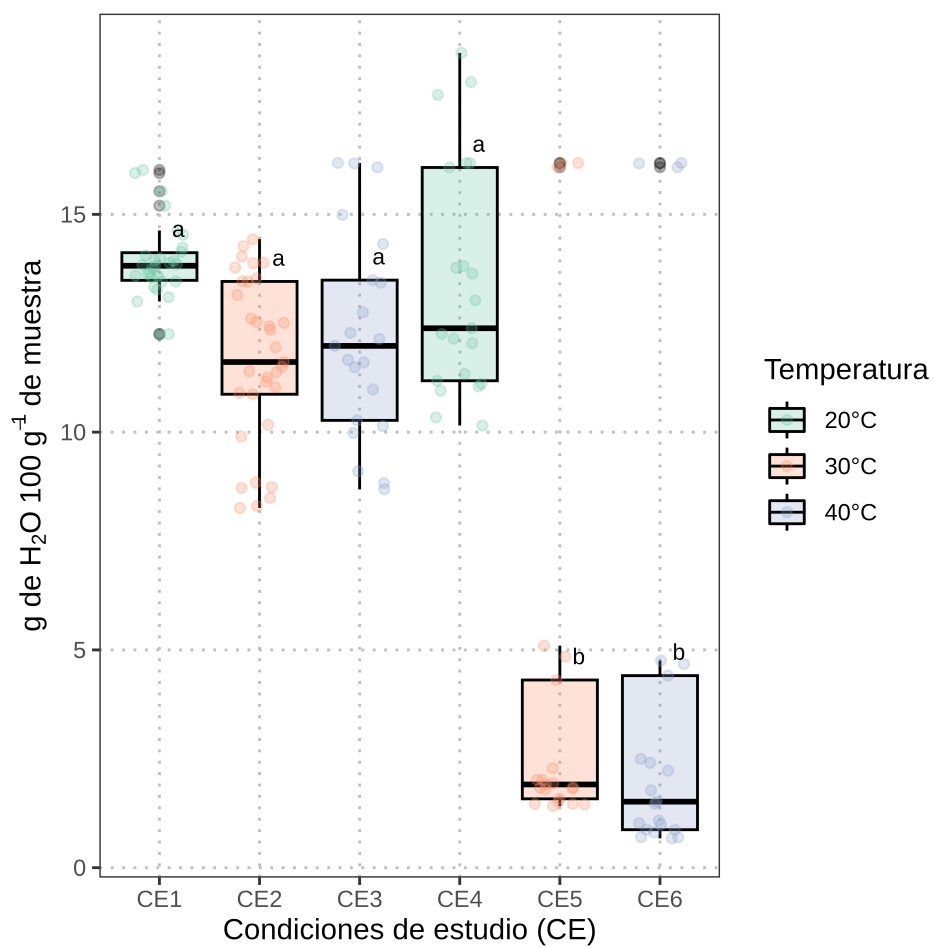


Figura 3.5: Valores de cambio en el contenido de humedad ($\text{g de H}_2\text{O } 100 \text{ g}^{-1}$ de muestra) de conchas de vainilla obtenidos en diversas condiciones de estudio. Los diagramas de caja y bigotes, diferenciados por letras minúsculas, evidencian discrepancias significativas entre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

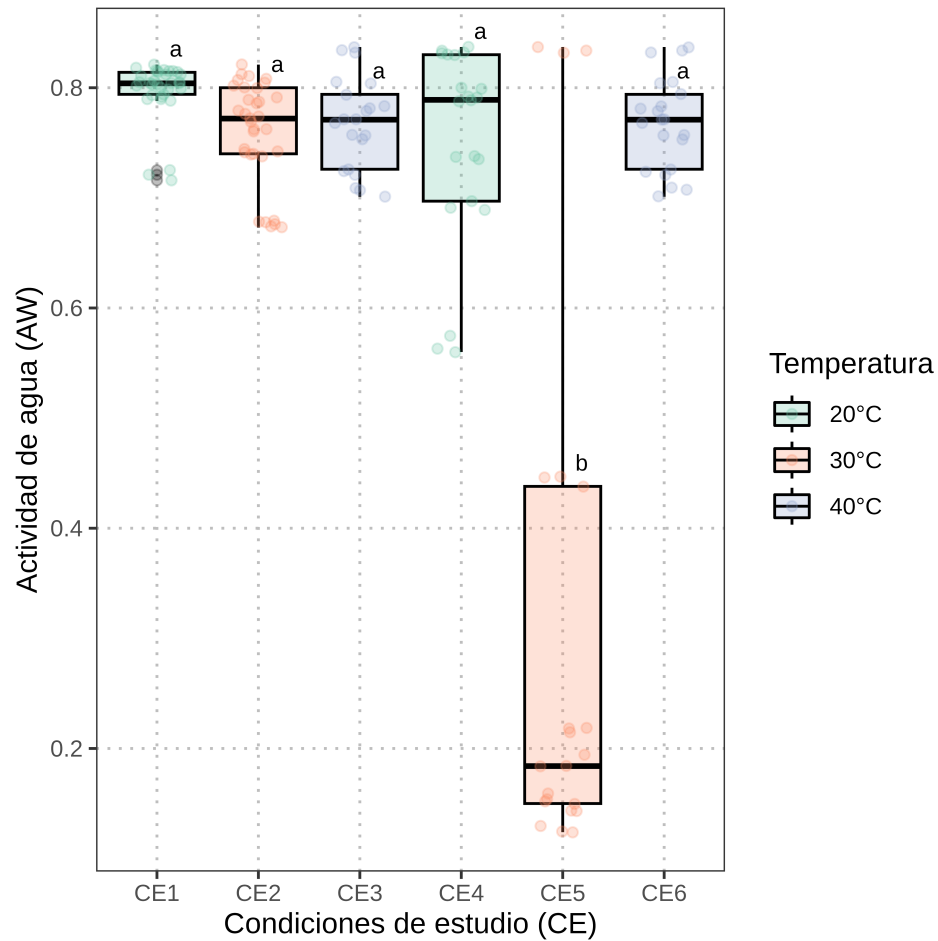


Figura 3.6: Valores de actividad de agua (AW) obtenidos en diversas condiciones de estudio. Los diagramas de caja y bigotes, marcados con distintas letras minúsculas, señalan diferencias significativas entre los conjuntos de datos a diversas temperaturas de almacenamiento ($p < 0.05$).

3.3.2. Influencia del tiempo de almacenamiento

Los gráficos de dispersión de las Figuras 3.7, 3.8 y 3.9 revelaron información valiosa sobre la evolución temporal de los atributos fisicoquímicos de calidad (variación del peso, contenido de humedad y AW) en diferentes CE.

Los gráficos de dispersión de la Figura 3.7 proporcionan una representación visual de la relación entre el peso de las CV y el tiempo de almacenamiento en distintas CE. Se observó que, en general, la masa exhibe variaciones significativas a lo largo del tiempo para cada CE. Los puntos de dispersión y las barras de error indican la tendencia central y la variabilidad asociada. La inclusión de letras compactas en las gráficas destaca las diferencias significativas entre los diferentes períodos de tiempo. El ANOVA realizado para cada conjunto de datos respalda la evidencia visual, demostrando la existencia de variabilidad estadísticamente significativa en el peso en relación con el tiempo para todas las condiciones. Las pruebas de Tukey complementan estos hallazgos al identificar períodos de tiempo específicos con diferencias significativas en las medias de peso.

La tendencia general revelada por los *boxplots* y los gráficos de dispersión sugiere que el tiempo de almacenamiento impacta de manera significativa en el peso de las muestras, lo que puede atribuirse a diversos factores, como la interacción entre la temperatura y las condiciones de almacenamiento. Los gráficos de dispersión de la Figura 3.8 proporcionan una representación visual similar para la relación entre la humedad y el tiempo en diferentes condiciones. La dispersión de puntos y las barras de error denotan las fluctuaciones en la humedad a lo largo de los períodos de tiempo definidos para cada CE.

El análisis estadístico revela patrones similares a los observados en el peso, con ANOVA y pruebas de Tukey confirmando la existencia de diferencias significativas en la humedad en función del tiempo en todas las condiciones. Las letras compactas resaltan las diferencias específicas entre los niveles de tiempo.

La variabilidad en la humedad a lo largo del tiempo podría estar asociada a la interacción entre las condiciones de estudio y la temperatura de almacenamiento, lo que influye en la capacidad de retención de agua de las muestras.

Los gráficos de dispersión de la Figura 3.9 muestran la relación entre la aw y el tiempo en distintas CE. Al igual que en los casos anteriores, se aprecia una variación temporal significativa en la aw para cada CE, representada mediante puntos de dispersión y barras de error.

El análisis estadístico corrobora estos hallazgos, evidenciando diferencias estadísticamente significativas en la aw a lo largo del tiempo para todas las CE. Las pruebas de Tukey y las letras compactas proporcionan información adicional sobre las diferencias específicas entre los niveles de tiempo.

La relación entre la AW y el tiempo podría ser fundamental para comprender la estabilidad y la calidad de las muestras de CV bajo diversas condiciones de almacenamiento.

Estudios previos para demostrar la influencia de diferentes temperaturas de almacenamiento (25°C, 4°C y -18°C) sobre la VU de pan blanco, los hallazgos demostraron que a pesar de que a temperaturas de -18°C existía una cristalización constante del almidón, esta era significativamente lenta en

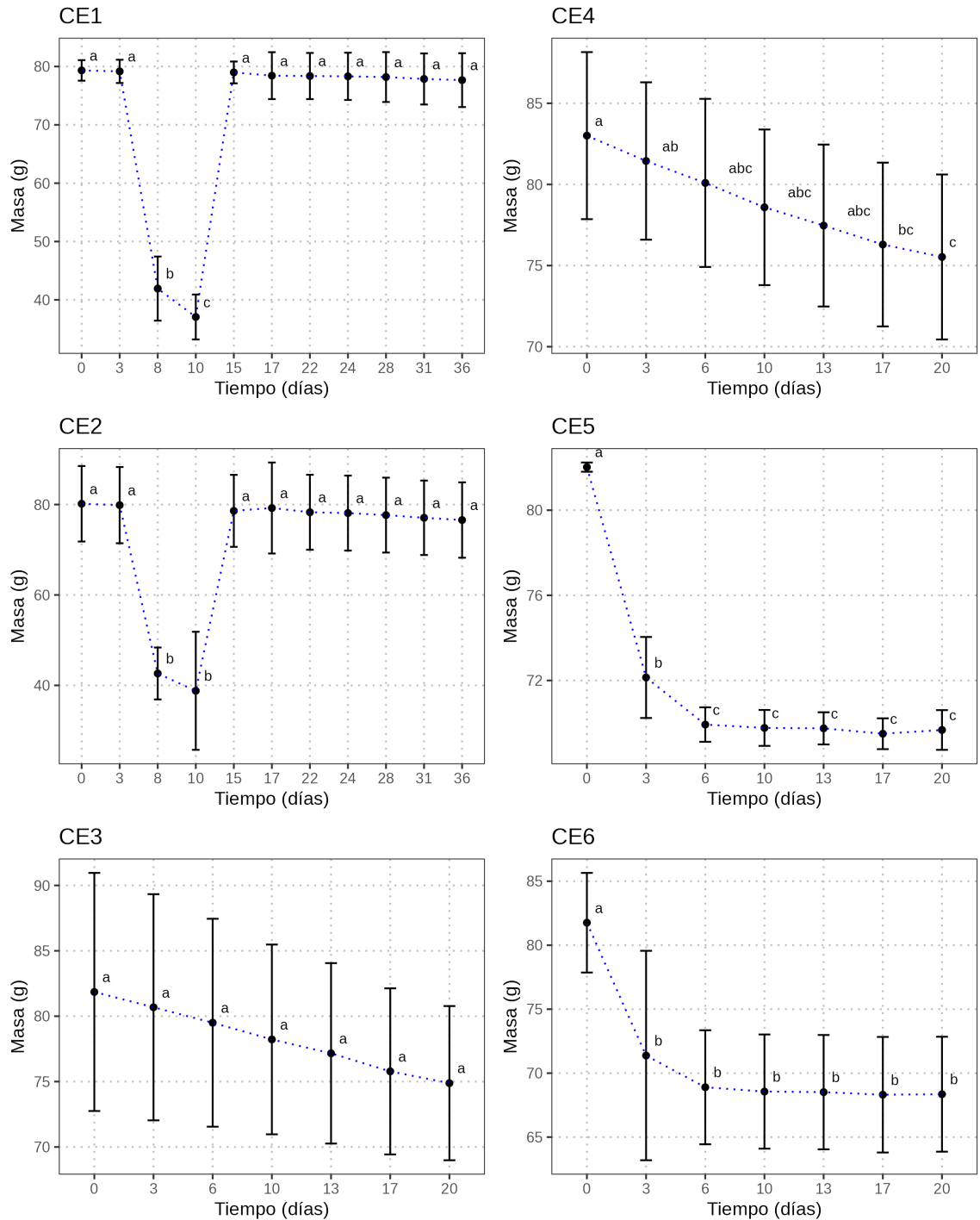


Figura 3.7: Gráficos de dispersión de la evolución en el tiempo del peso de las conchas de vainilla en las diferentes condiciones de estudio (CE). Las letras minúsculas diferentes indican diferencias en los tiempos de almacenamiento ($p < 0.05$).

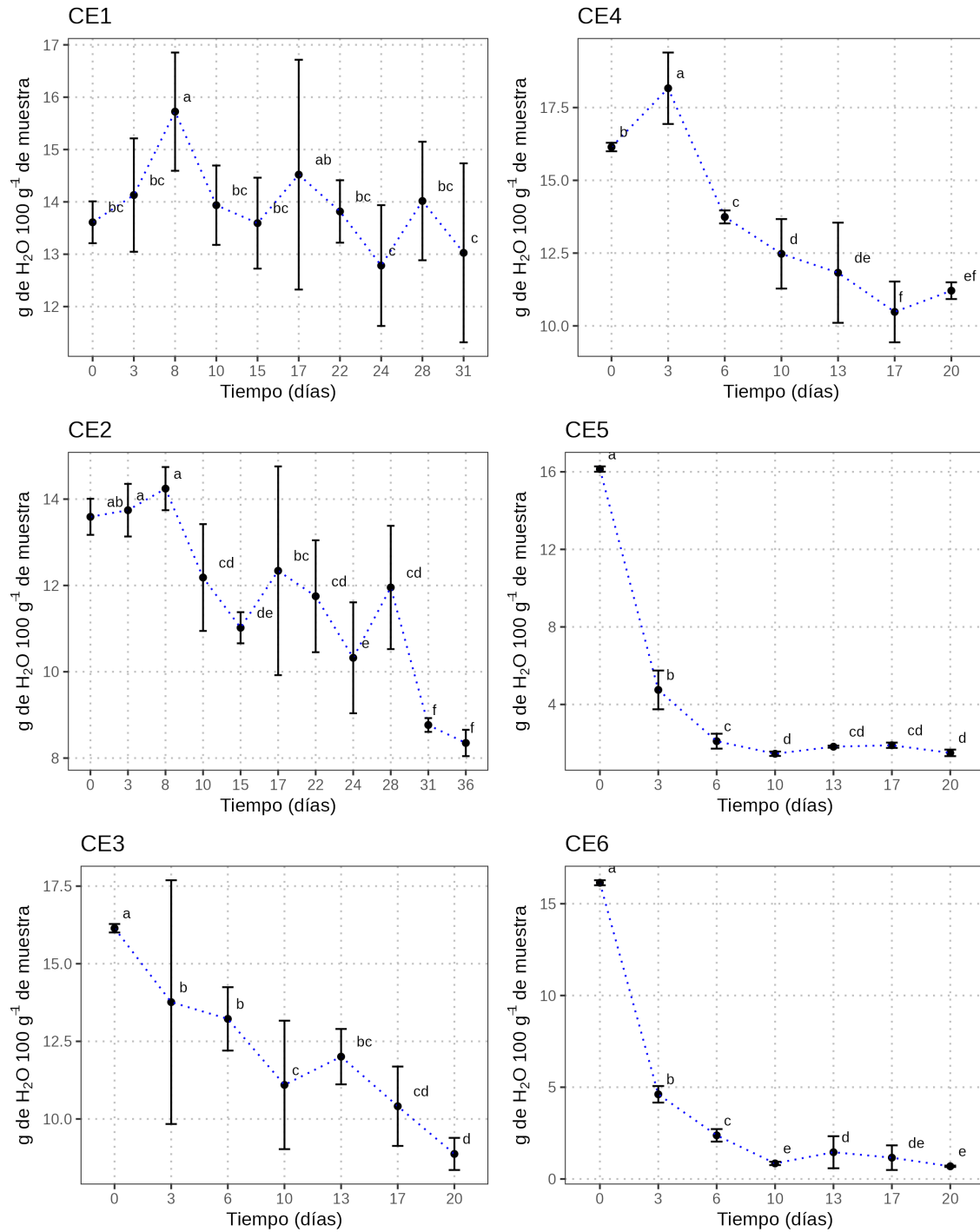


Figura 3.8: Gráficos de dispersión de la evolución en el tiempo del contenido de humedad de las conchas de vainilla en las diferentes condiciones de estudio (CE). Las letras minúsculas diferentes indican diferencias en los tiempos de almacenamiento ($p < 0.05$).

comparación a las otras temperaturas, siendo que a esa temperatura los cristales previamente formados podrían crecer, en contra parte a las otras temperaturas que además de crecer se podría dar la formación de nuevos cristales, aumentando la velocidad de retrogradación, sucede algo similar con las AW, mientras que a 25°C y 4°C existe una disminución de la AW, a -18°C estas se mantienen. La comparación de datos entre estudios podría beneficiar al entendimiento de los resultados y en general a la comprensión de las dinámicas entre las temperaturas y las variables de estudio, siempre considerando que aunque sean productos de panificación, los resultados pueden verse sujetos a factores como su formulación, siendo que en el caso de el estudio mencionado se trabajó con pan blanco o pan de caja, a diferencia del presente estudio donde se analizaron CV (Aguirre et al., 2011). Los gráficos y análisis estadísticos revelaron patrones temporales significativos en el peso, la humedad y la aw, subrayando la importancia de considerar la interacción entre las CE y la temperatura de almacenamiento al evaluar la calidad de las muestras. Estos hallazgos proporcionaron información valiosa para la toma de decisiones en términos de almacenamiento y manejo de productos, contribuyendo así al conocimiento y la optimización de procesos en el ámbito de la vida útil de este tipo de productos.

3.3.3. Análisis cinético

Los hallazgos derivados del análisis cinético, empleando los modelos de orden 0, 1 y 2 para caracterizar la evolución temporal de la AW, las variaciones en el peso y el contenido de humedad de las CV de vainilla a distintas temperaturas, se presentan en las Tablas 3.2, 3.3 y 3.4, respectivamente. Este análisis proporcionó información significativa acerca del comportamiento de estos atributos fisicoquímicos de calidad durante el periodo de almacenamiento en diversas CE.

De acuerdo con la Tabla 3.2, para el modelo de orden cero, los parámetros Q_0 y k describen el valor inicial del atributo y la velocidad de cambio constante (constante de velocidad), respectivamente. Sin embargo, los valores de R^2 son relativamente bajos para todos los atributos de calidad a todas las temperaturas ensayadas, indicando que este modelo no se ajusta bien a los datos experimentales. La relación lineal entre la variable dependiente y el tiempo no es bien representada por el modelo de orden cero.

Tabla 3.2: Ajuste de los datos experimentales al modelo de reacción de orden cero para conchas de vainilla.

Temperatura (°C)	Atributo (Q)	Q_0	k	R^2
20	Humedad	14.4446 ± 0.187	-0.0335 ± 0.0119	0.1551 ± 0.0898
20	AW	0.8267 ± 0.0027	-0.0017 ± 0.0001	0.51 ± 0.0551
20	Peso	63.0272 ± 0.4352	0.4898 ± 0.0706	0.0968 ± 0.0165
30	Humedad	14.1987 ± 0.2794	-0.1439 ± 0.0124	0.7352 ± 0.0336
30	AW	0.8241 ± 0.0009	-0.0036 ± 0.0001	0.7884 ± 0.0063

Temperatura (°C)	Atributo (Q)	Q_0	k	R^2
30	Peso	64.2115 ± 2.0091	0.4323 ± 0.0542	0.0798 ± 0.0057
40	Humedad	15.2951 ± 0.4243	-0.3123 ± 0.0403	0.8596 ± 0.0762
40	AW	0.8259 ± 0.0031	-0.0059 ± 0.0001	0.9748 ± 0.0106
40	Peso	81.7251 ± 3.6336	-0.3478 ± 0.0658	0.9985 ± 0.0002

En la Tabla 3.3, el modelo de primer orden muestra resultados mixtos. Aunque el ajuste lineal es mejor que el modelo de orden cero, los valores de R^2 varían significativamente. Para la humedad y el peso, el modelo de primer orden tiene valores de R^2 más altos, indicando un mejor ajuste lineal en comparación con el modelo de orden cero. Sin embargo, para la AW, los valores de R^2 son moderados, sugiriendo que el modelo de primer orden no es tan efectivo para describir los cambios en AW durante el almacenamiento.

Tabla 3.3: Ajuste de los datos experimentales al modelo de reacción de primer orden para conchas de vainilla.

Temperatura (°C)	Atributo (Q)	$\ln Q_0$	k	R^2
20	Humedad	2.0587 ± 0.5242	0.0252 ± 0.0232	0.1887 ± 0.0837
20	AW	-0.1891 ± 0.0033	-0.0021 ± 0.0001	0.4994 ± 0.0530
20	Peso	4.0868 ± 0.0113	0.0088 ± 0.0011	0.0996 ± 0.0133
30	Humedad	2.6707 ± 0.0222	-0.0129 ± 0.0011	0.7269 ± 0.0335
30	AW	-0.1904 ± 0.0013	-0.0049 ± 0.0001	0.7761 ± 0.0060
30	Peso	4.1066 ± 0.0300	0.0079 ± 0.0010	0.0869 ± 0.0067
40	Humedad	2.7385 ± 0.0320	-0.0257 ± 0.0034	0.8675 ± 0.0582
40	AW	-0.1898 ± 0.0037	-0.0078 ± 0.0002	0.9763 ± 0.0114
40	Peso	4.4032 ± 0.0450	-0.0044 ± 0.0007	0.9991 ± 0.0001

En la Tabla 3.4, el modelo de segundo orden muestra los mejores resultados en términos de ajuste lineal. Los valores de R^2 son consistentemente altos para todos los atributos y temperaturas, indicando una mejor representación de los datos experimentales. Este modelo, que incluye la inversa de Q_0 como parámetro, demuestra ser más efectivo para describir los cambios en el contenido de humedad, la AW de agua y el peso de las CV a lo largo del tiempo.

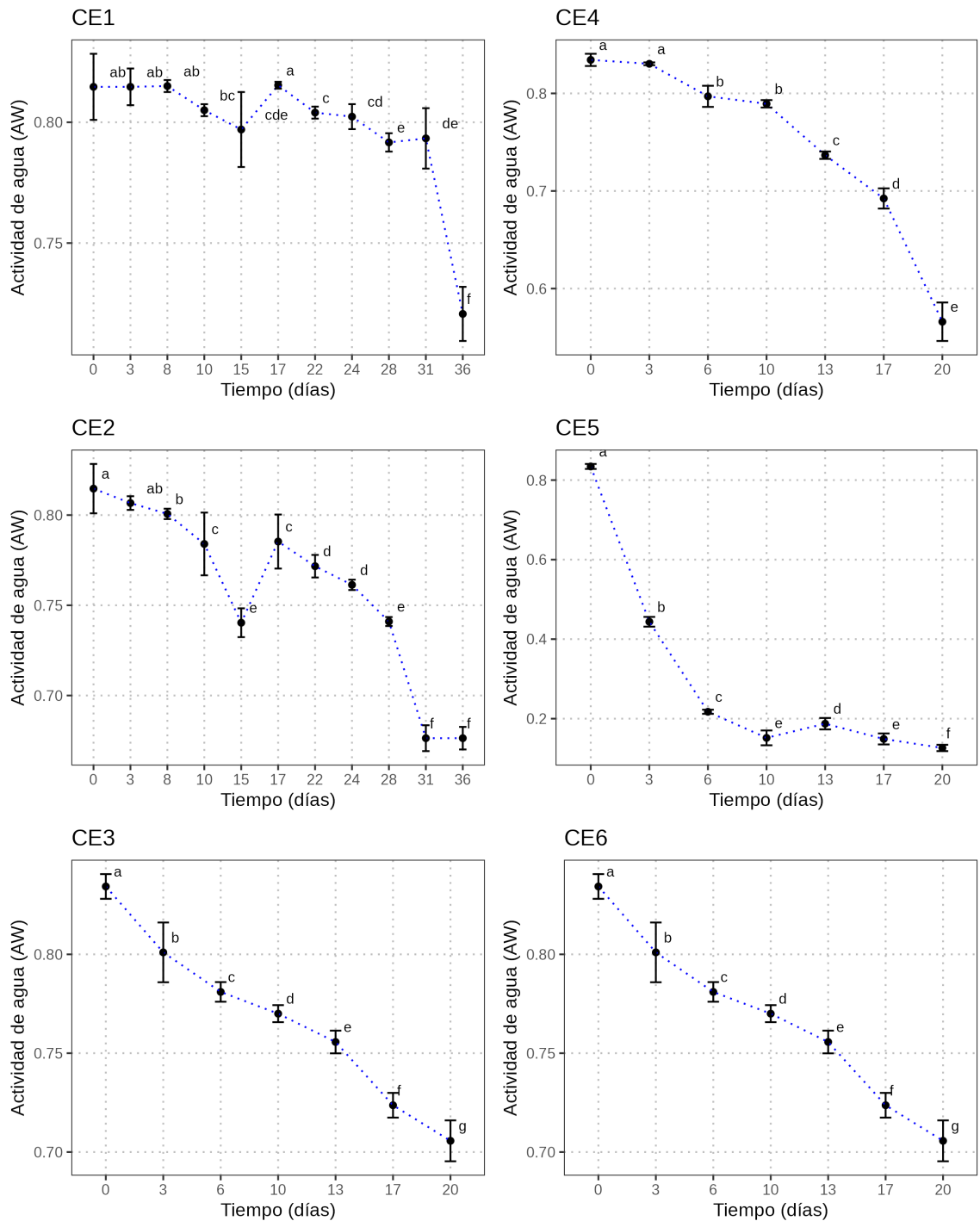


Figura 3.9: Gráficos de dispersión de la evolución en el tiempo de la actividad de agua (AW) de las conchas de vainilla en las diferentes condiciones de estudio (CE). Las letras minúsculas diferentes indican diferencias en los tiempos de almacenamiento ($p < 0.05$).

Tabla 3.4: Ajuste de los datos experimentales al modelo de reacción de segundo orden para conchas de vainilla.

Temperatura (°C)	Atributo (Q)	$\frac{1}{Q_0}$	k	R^2
20	Humedad	0.0522 ± 0.0152	0.0010 ± 0.0007	0.2862 ± 0.1642
20	AW	1.2066 ± 0.0040	0.0028 ± 0.0001	0.6594 ± 0.0510
20	Peso	0.0179 ± 0.0003	-0.0002 ± 0.0000	0.1010 ± 0.0111
30	Humedad	0.0673 ± 0.0018	0.0012 ± 0.0001	0.7110 ± 0.0328
30	AW	1.2053 ± 0.0018	0.0066 ± 0.0001	0.7632 ± 0.0055
30	Peso	0.0175 ± 0.0006	-0.0001 ± 0.0000	0.0918 ± 0.0086
40	Humedad	0.0634 ± 0.0025	0.0022 ± 0.0003	0.8591 ± 0.0424
40	AW	1.2070 ± 0.0044	0.0101 ± 0.0002	0.9763 ± 0.0124
40	Peso	0.0122 ± 0.0006	0.0001 ± 0.0000	0.9994 ± 0.0003

Hay una gran variedad de razones por las cuales determinar el orden de reacción más adecuado para ajustarse a los datos experimentales sobre los atributos de calidad de los alimentos en un estudio de VU. En primer lugar, comprender la cinética a la que se ajustan los cambios de los atributos de calidad del alimento permitirá anticipar su duración y asegurar la inocuidad alimentaria (Van Boekel, 2008). Esto adquiere relevancia en el ámbito de los riesgos alimentarios, ya que el orden de reacción puede ofrecer información sobre la velocidad de deterioro de los atributos del producto alimenticio. Asimismo, la investigación de las funciones cinéticas para los cambios en la calidad durante los procesos de calentamiento de alimentos ha sido objeto de atención durante muchos años, resaltando la relevancia de este aspecto en la investigación alimentaria (Liu et al., 2022). Además, la cinética de los parámetros fisicoquímicos y los compuestos bioactivos en los productos alimenticios son indicadores significativos de la pérdida nutricional durante el almacenamiento, enfatizando así la importancia del orden de las reacciones en la evaluación de la calidad de los alimentos a lo largo del tiempo (Touati et al., 2016).

Adicionalmente, el orden de reacción proporciona información para comprender el impacto de las condiciones de procesamiento y almacenamiento en la calidad de los productos alimenticios. Por ejemplo, la cinética de degradación térmica de los compuestos bioactivos en la pulpa de frambuesa demuestra la importancia del orden de reacción en la evaluación de los efectos de la temperatura en la calidad de los alimentos (Summen & Erge, 2014). De manera similar, el efecto del almacenamiento congelado sobre la calidad de los alimentos congelados subraya la necesidad de comprender la cinética de los cambios de calidad en diferentes condiciones de almacenamiento (Alsailawi et al., 2020). Además, la química de los aceites para freír enfatiza el papel de la cinética de reacción en la comprensión del comportamiento de los antioxidantes en el procesamiento de alimentos, lo cual

es crucial para mantener la calidad de los alimentos durante los procesos de fritura (Choe & Min, 2007).

En ese sentido, al analizar los resultados derivados de la adaptación de los datos experimentales a la Ecuación 3.3, de segundo orden, donde la ecuación cinética fue empleada para describir los cambios en el contenido de humedad, AW y en el peso de las CV de vainilla a diferentes temperaturas, se observó que la constante de velocidad (k) experimentó variaciones para cada atributo. Las velocidades de cambio de cada atributo durante el almacenamiento fueron indicadas por los valores de k . Se resalta que la AW exhibió las mayores k en todas las temperaturas evaluadas (0.0028, 0.0066 y 0.0101 días⁻¹ a 20°C, 30°C y 40°C, respectivamente) (Contreras-López et al., 2022; Jaimez-Ordaz et al., 2019). Este descubrimiento sugiere que la AW experimentó cambios más rápidos en comparación con la humedad y el peso de las CV durante el proceso de almacenamiento. La magnitud de las k proporcionó información valiosa sobre la cinética de los cambios en cada atributo de calidad (Q), siendo la AW el parámetro que presentó una mayor sensibilidad a las condiciones de almacenamiento. Por ende, la AW podría considerarse el atributo de calidad crítico, y por lo tanto, el más apropiado para estimar la VU del producto si se dispusiera de valores del punto crítico de calidad. Sin embargo, esta conclusión serviría como antecedente para futuros estudios que posibilitarían un análisis más profundo de la VU del producto.

3.3.4. Análisis termodinámico

En la Tabla 3.5 se mostró información sobre los parámetros termodinámicos y cinéticos del modelo de segundo orden que describe la variación de la aw. El valor de E_A (energía de activación) de aproximadamente 46.14 kJ/mol indica la energía mínima requerida para que el proceso ocurra, lo que sugiere una cierta sensibilidad a las variaciones de temperatura. La constante cinética A de aproximadamente 5.36×10^5 día⁻¹ revela la frecuencia de colisión y la orientación adecuada de las moléculas en la reacción.

En cuanto a los parámetros termodinámicos, la Entalpía de Activación (ΔH^\ddagger) de alrededor de 43.62 kJ/mol sugiere si la reacción es endotérmica o exotérmica. En ese caso, el valor de ΔH^\ddagger es positivo, por lo que el cambio en la AW es un proceso endotérmico, lo que significa que absorbe energía del entorno para llevarse a cabo. Por otro lado, la Entropía de Activación (ΔS^\ddagger) de -143.69 J/Kmol proporcionó información sobre el grado de desorden asociado con el proceso.

El valor de Q_{10} de aproximadamente 1.80 indica la sensibilidad de la velocidad de la reacción a cambios de temperatura, lo que puede ser fundamental para comprender cómo la AW varía en diferentes condiciones térmicas. Este valor indicó que la k se incrementaría 1.80 veces por cada 10°C que se incrementa la temperatura.

En conjunto, estos parámetros ofrecen una comprensión integral de la dinámica termodinámica y cinética de la reacción modelada de segundo orden, permitiendo interpretar su comportamiento en función de las variaciones de temperatura y proporcionando información relevante para aplicaciones prácticas y predictivas en el contexto de la aw.

Tabla 3.5: Parámetros termodinámicos y cinéticos del modelo de segundo orden que describe la variación de la actividad de agua (AW).

E_A (kJ/mol)	A día ⁻¹	ΔH^\ddagger (kJ/mol)	ΔS^\ddagger (J/Kmol)	Q_{10}
46.14	536225.04	43.62	-143.69	1.79

3.4. Conclusión y perspectivas

Este capítulo ha proporcionado una comprensión profunda de los factores que influyen en la vida útil de las CV, destacando la importancia de la temperatura de almacenamiento, el tipo de empaque y el tiempo de almacenamiento en la preservación de sus atributos fisicoquímicos de calidad. Los resultados del estudio apoyan la hipótesis de que la interacción entre estos factores es crítica para mantener la calidad y estabilidad de las CV durante el almacenamiento.

Los análisis estadísticos, incluyendo ANOVA y pruebas de Tukey, han demostrado que tanto el peso como el contenido de humedad y la AW de las CV varían significativamente con el tiempo y las condiciones de almacenamiento, lo que subraya la relevancia de un manejo adecuado para prolongar su VU. Además, el análisis cinético ha revelado que los modelos de orden superior son más adecuados para describir la evolución temporal de estos atributos, proporcionando un ajuste lineal más preciso y una mejor comprensión de la dinámica de las reacciones involucradas.

Estos hallazgos son fundamentales para la industria de servicios alimentarios, donde la satisfacción del cliente y la sostenibilidad de las empresas dependen en gran medida de la calidad y la seguridad de los alimentos. Por lo tanto, este estudio contribuye significativamente al conocimiento necesario para optimizar los procesos de almacenamiento y manejo de las CV, lo que a su vez puede ayudar a reducir el desperdicio de alimentos y mejorar la seguridad alimentaria.

Las perspectivas de este capítulo se orientan hacia la necesidad de determinar el punto crítico de calidad para predecir con mayor precisión la VU de las CV. A partir de los hallazgos presentados, se sugiere que futuras investigaciones se centren en identificar el valor exacto del punto crítico de calidad, especialmente en lo que respecta a la AW, que se ha demostrado ser un parámetro sensible a las condiciones de almacenamiento y un indicador potencial de la vida útil del producto.

Además, estos resultados podrían ser vinculados con la ciencia de datos para desarrollar modelos predictivos más robustos y precisos. La implementación de biosensores y técnicas de aprendizaje profundo podría permitir un monitoreo en tiempo real de los atributos fisicoquímicos de las CV, facilitando la detección temprana de cambios que indiquen una disminución en la calidad del producto. La integración de la inteligencia artificial en este proceso no solo mejoraría la precisión de las predicciones de VU, sino que también optimizaría la gestión de inventarios y reduciría el desperdicio de alimentos en la industria de servicios alimentarios.

Por lo tanto, se recomienda la colaboración interdisciplinaria entre expertos en ciencia de alimentos, ciencia de datos e inteligencia artificial para desarrollar sistemas avanzados de monitoreo y predicción

que puedan ser aplicados en la industria alimentaria. Estos sistemas podrían incluir algoritmos de aprendizaje automático y redes neuronales que procesen datos en tiempo real para proporcionar alertas tempranas y recomendaciones de manejo que aseguren la calidad y maximicen la VU de productos como las CV.

3.5. Referencias

- Aguirre, J. F., Osella, C. A., Carrara, C. R., Sánchez, H. D., & Buera, M. D. P. (2011). Effect of storage temperature on starch retrogradation of bread staling. *Starch - Stärke*, *63*(9), 587–593. <https://doi.org/10.1002/star.201100023>
- Alpers, T., Kerpes, R., Frioli, M., Nobis, A., Hoi, K. I., Bach, A., Jekle, M., & Becker, T. (2021). Impact of Storing Condition on Staling and Microbial Spoilage Behavior of Bread and Their Contribution to Prevent Food Waste. *Foods*, *10*(1), 76. <https://doi.org/10.3390/foods10010076>
- Alsailawi, H., Mustafa, Mudhafar, & Abdulrasool, M. M. (2020). Effect of Frozen Storage on the Quality of Frozen Foods—A Review. *Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, *14*(3). <https://doi.org/10.17265/1934-7375/2020.03.002>
- Calvo Carrillo, M. D. L. C., López Méndez, O. X., Carranco Jáuregui, M. E., & Marines, J. (2020). Evaluación fisicoquímica y sensorial de un pan tipo baguette utilizando harinas de trigo (*triticum spp*) y chícharo (*pisum sativum L.*). *Biotecnología*, *22*(3), 116–124. <https://doi.org/10.18633/biotecnologia.v22i3.1227>
- Choe, E., & Min, D. B. (2007). Chemistry of Deep-Fat Frying Oils. *Journal of Food Science*, *72*(5). <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00352.x>
- Contreras-López, E., Jaimez-Ordaz, J., Ugarte-Bautista, I., Ramírez-Godínez, J., González-Olivares, L. G., García-Curiel, L., & Pérez-Flores, J. G. (2022). Use of image analysis to determine the shelf-life of an apple compote with wine. *Food Science and Technology*, *42*, e04122. <https://doi.org/10.1590/fst.04122>
- Esperanza-Naranjo, P. A., Alcocer-Vallejo, R. M., & Santamaría-Aguirre, J. R. (2018). Isoconversión Isotermal para una estimación rápida de la vida Útil de comprimidos de Ácido acetil salicílico. *Química Central*, *6*(1), 37–47. <https://doi.org/10.29166/quimica.v6i1.1414>
- Gálvez-Toledo, D. K., Contreras-López, E., Jaimez-Ordaz, J., González-Olivares, L. G., & Pérez-Flores, J. G. (2023). Estudio de los atributos fisicoquímicos de calidad que influyen en la vida útil de muffins de vainilla. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, *8*(1), 889–898. <https://doi.org/10.29105/idcyta.v8i1.113>
- García-Curiel, L., Pérez-Flores, J. G., Contreras-López, E., Pérez-Escalante, E., & Hernández-Hernández, A. A. (2023). Anthocyanin content prediction in frozen strawberry puree. *Italian Journal of Food Science*, *35*(2), 88–97. <https://doi.org/10.15586/ijfs.v35i2.2315>
- Jaimez-Ordaz, J., Pérez-Flores, J. G., Castañeda-Ovando, A., González-Olivares, L. G., Añorve-Morga, J., & Contreras-López, E. (2019). Kinetic parameters of lipid oxidation in third generation

- (3G) snacks and its influence on shelf-life. *Food Science and Technology*, 39(suppl 1), 136–140. <https://doi.org/10.1590/fst.38917>
- Kazakos, S., Mantzourani, I., & Plessas, S. (2022). Quality Characteristics of Novel Sourdough Breads Made with Functional *Lactocaseibacillus paracasei* SP5 and Prebiotic Food Matrices. *Foods*, 11(20), 3226. <https://doi.org/10.3390/foods11203226>
- Liu, A., Xu, R., Zhang, S., Wang, Y., Hu, B., Ao, X., Li, Q., Li, J., Hu, K., Yang, Y., & Liu, S. (2022). Antifungal Mechanisms and Application of Lactic Acid Bacteria in Bakery Products: A Review. *Frontiers in Microbiology*, 13, 924398. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.924398>
- Osorio-Diaz, P., Sanchez-Pardo, M. E., & Bello-Perez, L. A. (2014). Mexican Bakery Products. In W. Zhou, Y. H. Hui, I. De Leyn, M. A. Pagani, C. M. Rosell, J. D. Selman, & N. Therdthai (Eds.), *Bakery Products Science and Technology* (1st ed., pp. 723–734). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118792001.ch41>
- Summen, M. A., & Erge, H. S. (2014). Thermal Degradation Kinetics of Bioactive Compounds and Visual Color in Raspberry Pulp: Thermal Degradation of Bioactive Compounds. *Journal of Food Processing and Preservation*, 38(1), 551–557. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12002>
- Taglieri, I., Macaluso, M., Bianchi, A., Sanmartin, C., Quartacci, M. F., Zinnai, A., & Venturi, F. (2021). Overcoming bread quality decay concerns: Main issues for bread shelf life as a function of biological leavening agents and different extra ingredients used in formulation. A review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(5), 1732–1743. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10816>
- Touati, N., Barba, F. J., Louaileche, H., Frigola, A., & Esteve, M. J. (2016). Effect of Storage Time and Temperature on the Quality of Fruit Nectars: Determination of Nutritional Loss Indicators. *Journal of Food Quality*, 39(3), 209–217. <https://doi.org/10.1111/jfq.12189>
- 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 utilizados

A continuación, se muestra la forma en la que fueron ordenados los datos para llevar a cabo el análisis estadístico con R . La Tabla A.1 proporciona información detallada sobre las condiciones de estudio y diversos atributos de calidad relacionados con las conchas de vainilla. Aquí está una descripción:

- **Condiciones:** Indica las condiciones de estudio y se clasifican como CE1, CE2, CE3, CE4, CE5 y CE6.
- **Empaque:** Describe si las conchas de vainilla se almacenaron con empaque (**ConEmpaque**) o sin empaque (**SinEmpaque**).
- **Temperatura:** Representa la temperatura de almacenamiento, categorizada en tres niveles: 20, 30 y 40.
- **Tiempo:** Indica el período de almacenamiento de las conchas de vainilla, variando desde 0 hasta 36 días.
- **Atributo de calidad:** Este campo identifica el atributo de calidad bajo evaluación, que puede ser actividad acuosa, contenido de humedad o peso. Se etiqueta como “Determinación 1”, “Determinación 2” y “Determinación 3”, ya que la determinación de cada atributo de calidad en cada día fue realizada por triplicado.

Cada fila representa una instancia única de las conchas de vainilla bajo condiciones específicas de empaque, temperatura y tiempo. La tabla está diseñada para permitir un análisis detallado de cómo estas condiciones afectan diferentes atributos de calidad, aunque los valores específicos para cada determinación no se encuentran presentes en la tabla proporcionada.

Tabla A.1: Organización del conjunto de datos.

Condiciones	Empaque	Temperatura	Tiempo	Atributo de calidad
CE1	ConEmpaque	20	0	Determinación 1
CE1	ConEmpaque	20	0	Determinación 2
CE1	ConEmpaque	20	0	Determinación 3
CE1	ConEmpaque	20	3	Determinación 1
CE1	ConEmpaque	20	3	Determinación 2
CE1	ConEmpaque	20	3	Determinación 3
CE1	ConEmpaque	20	8	Determinación 1
CE1	ConEmpaque	20	8	Determinación 2
CE1	ConEmpaque	20	8	Determinación 3
CE1	ConEmpaque	20	10	Determinación 1
CE1	ConEmpaque	20	10	Determinación 2
CE1	ConEmpaque	20	10	Determinación 3
CE1	ConEmpaque	20	15	Determinación 1
CE1	ConEmpaque	20	15	Determinación 2
CE1	ConEmpaque	20	15	Determinación 3
CE1	ConEmpaque	20	17	Determinación 1
CE1	ConEmpaque	20	17	Determinación 2
CE1	ConEmpaque	20	17	Determinación 3
CE1	ConEmpaque	20	22	Determinación 1
CE1	ConEmpaque	20	22	Determinación 2
CE1	ConEmpaque	20	22	Determinación 3
CE1	ConEmpaque	20	24	Determinación 1
CE1	ConEmpaque	20	24	Determinación 2
CE1	ConEmpaque	20	24	Determinación 3
CE1	ConEmpaque	20	28	Determinación 1
CE1	ConEmpaque	20	28	Determinación 2
CE1	ConEmpaque	20	28	Determinación 3
CE1	ConEmpaque	20	31	Determinación 1
CE1	ConEmpaque	20	31	Determinación 2
CE1	ConEmpaque	20	31	Determinación 3
CE1	ConEmpaque	20	36	Determinación 1
CE1	ConEmpaque	20	36	Determinación 2
CE1	ConEmpaque	20	36	Determinación 3
CE2	ConEmpaque	30	0	Determinación 1

Condiciones	Empaque	Temperatura	Tiempo	Atributo de calidad
CE2	ConEmpaque	30	0	Determinación 2
CE2	ConEmpaque	30	0	Determinación 3
CE2	ConEmpaque	30	3	Determinación 1
CE2	ConEmpaque	30	3	Determinación 2
CE2	ConEmpaque	30	3	Determinación 3
CE2	ConEmpaque	30	8	Determinación 1
CE2	ConEmpaque	30	8	Determinación 2
CE2	ConEmpaque	30	8	Determinación 3
CE2	ConEmpaque	30	10	Determinación 1
CE2	ConEmpaque	30	10	Determinación 2
CE2	ConEmpaque	30	10	Determinación 3
CE2	ConEmpaque	30	15	Determinación 1
CE2	ConEmpaque	30	15	Determinación 2
CE2	ConEmpaque	30	15	Determinación 3
CE2	ConEmpaque	30	17	Determinación 1
CE2	ConEmpaque	30	17	Determinación 2
CE2	ConEmpaque	30	17	Determinación 3
CE2	ConEmpaque	30	22	Determinación 1
CE2	ConEmpaque	30	22	Determinación 2
CE2	ConEmpaque	30	22	Determinación 3
CE2	ConEmpaque	30	24	Determinación 1
CE2	ConEmpaque	30	24	Determinación 2
CE2	ConEmpaque	30	24	Determinación 3
CE2	ConEmpaque	30	28	Determinación 1
CE2	ConEmpaque	30	28	Determinación 2
CE2	ConEmpaque	30	28	Determinación 3
CE2	ConEmpaque	30	31	Determinación 1
CE2	ConEmpaque	30	31	Determinación 2
CE2	ConEmpaque	30	31	Determinación 3
CE2	ConEmpaque	30	36	Determinación 1
CE2	ConEmpaque	30	36	Determinación 2
CE2	ConEmpaque	30	36	Determinación 3
CE3	ConEmpaque	40	0	Determinación 1
CE3	ConEmpaque	40	0	Determinación 2
CE3	ConEmpaque	40	0	Determinación 3
CE3	ConEmpaque	40	3	Determinación 1
CE3	ConEmpaque	40	3	Determinación 2

Condiciones	Empaque	Temperatura	Tiempo	Atributo de calidad
CE3	ConEmpaque	40	3	Determinación 3
CE3	ConEmpaque	40	6	Determinación 1
CE3	ConEmpaque	40	6	Determinación 2
CE3	ConEmpaque	40	6	Determinación 3
CE3	ConEmpaque	40	10	Determinación 1
CE3	ConEmpaque	40	10	Determinación 2
CE3	ConEmpaque	40	10	Determinación 3
CE3	ConEmpaque	40	13	Determinación 1
CE3	ConEmpaque	40	13	Determinación 2
CE3	ConEmpaque	40	13	Determinación 3
CE3	ConEmpaque	40	17	Determinación 1
CE3	ConEmpaque	40	17	Determinación 2
CE3	ConEmpaque	40	17	Determinación 3
CE3	ConEmpaque	40	20	Determinación 1
CE3	ConEmpaque	40	20	Determinación 2
CE3	ConEmpaque	40	20	Determinación 3
CE4	SinEmpaque	20	0	Determinación 1
CE4	SinEmpaque	20	0	Determinación 2
CE4	SinEmpaque	20	0	Determinación 3
CE4	SinEmpaque	20	3	Determinación 1
CE4	SinEmpaque	20	3	Determinación 2
CE4	SinEmpaque	20	3	Determinación 3
CE4	SinEmpaque	20	6	Determinación 1
CE4	SinEmpaque	20	6	Determinación 2
CE4	SinEmpaque	20	6	Determinación 3
CE4	SinEmpaque	20	10	Determinación 1
CE4	SinEmpaque	20	10	Determinación 2
CE4	SinEmpaque	20	10	Determinación 3
CE4	SinEmpaque	20	13	Determinación 1
CE4	SinEmpaque	20	13	Determinación 2
CE4	SinEmpaque	20	13	Determinación 3
CE4	SinEmpaque	20	17	Determinación 1
CE4	SinEmpaque	20	17	Determinación 2
CE4	SinEmpaque	20	17	Determinación 3
CE4	SinEmpaque	20	20	Determinación 1
CE4	SinEmpaque	20	20	Determinación 2
CE4	SinEmpaque	20	20	Determinación 3

Condiciones	Empaque	Temperatura	Tiempo	Atributo de calidad
CE5	SinEmpaque	30	0	Determinación 1
CE5	SinEmpaque	30	0	Determinación 2
CE5	SinEmpaque	30	0	Determinación 3
CE5	SinEmpaque	30	3	Determinación 1
CE5	SinEmpaque	30	3	Determinación 2
CE5	SinEmpaque	30	3	Determinación 3
CE5	SinEmpaque	30	6	Determinación 1
CE5	SinEmpaque	30	6	Determinación 2
CE5	SinEmpaque	30	6	Determinación 3
CE5	SinEmpaque	30	10	Determinación 1
CE5	SinEmpaque	30	10	Determinación 2
CE5	SinEmpaque	30	10	Determinación 3
CE5	SinEmpaque	30	13	Determinación 1
CE5	SinEmpaque	30	13	Determinación 2
CE5	SinEmpaque	30	13	Determinación 3
CE5	SinEmpaque	30	17	Determinación 1
CE5	SinEmpaque	30	17	Determinación 2
CE5	SinEmpaque	30	17	Determinación 3
CE5	SinEmpaque	30	20	Determinación 1
CE5	SinEmpaque	30	20	Determinación 2
CE5	SinEmpaque	30	20	Determinación 3
CE6	SinEmpaque	40	0	Determinación 1
CE6	SinEmpaque	40	0	Determinación 2
CE6	SinEmpaque	40	0	Determinación 3
CE6	SinEmpaque	40	3	Determinación 1
CE6	SinEmpaque	40	3	Determinación 2
CE6	SinEmpaque	40	3	Determinación 3
CE6	SinEmpaque	40	6	Determinación 1
CE6	SinEmpaque	40	6	Determinación 2
CE6	SinEmpaque	40	6	Determinación 3
CE6	SinEmpaque	40	10	Determinación 1
CE6	SinEmpaque	40	10	Determinación 2
CE6	SinEmpaque	40	10	Determinación 3
CE6	SinEmpaque	40	13	Determinación 1
CE6	SinEmpaque	40	13	Determinación 2
CE6	SinEmpaque	40	13	Determinación 3
CE6	SinEmpaque	40	17	Determinación 1

Condiciones	Empaque	Temperatura	Tiempo	Atributo de calidad
CE6	SinEmpaque	40	17	Determinación 2
CE6	SinEmpaque	40	17	Determinación 3
CE6	SinEmpaque	40	20	Determinación 1
CE6	SinEmpaque	40	20	Determinación 2
CE6	SinEmpaque	40	20	Determinación 3

A.2. Análisis estadístico con R

A.2.1. Análisis factorial

Se elaboró un script en R para llevar a cabo un análisis de diseño factorial $A \times B \times C$, con el propósito de evaluar la influencia del empaque, la temperatura y el tiempo de almacenamiento en conchas de vainilla, con el objetivo de estudiar su vida útil. El código proporcionado se centró en evaluar cómo estos factores afectan los cambios en la actividad acuosa. Cabe destacar que el mismo código fue adaptado posteriormente para investigar también las variaciones en la evolución del contenido de humedad y del peso de este producto durante su almacenamiento. A continuación se explican las etapas del código:

1. **Cargar la librería:**

- Se cargó la librería `readxl`, que se utiliza para leer archivos de Excel.

2. **Cargar los datos:**

- Se leyó el archivo de Excel “datos_aw.xlsx” y se almacenaron los datos en la variable `dataset`.

3. **Adjuntar y mostrar los datos:**

- Se adjuntaron los datos a nivel global para facilitar el acceso a las columnas y se mostró información básica sobre la estructura del dataset, incluyendo los nombres de las columnas y la estructura de los datos.

4. **Establecer las variables:**

- Se crearon variables para representar los factores del diseño factorial y la variable de respuesta. Los factores eran `Empaque`, `Temperatura` y `Tiempo`, mientras que la variable de respuesta era `aw`.

5. **Cálculo de la tabla ANOVA:**

- Se realizó un modelo de regresión lineal múltiple para analizar la influencia de los factores (`Empaque`, `Temperatura`, y `Tiempo`) y sus interacciones sobre la variable respuesta `aw`. Se utilizó la función `lm()` para definir el modelo, incluyendo las interacciones de los factores a la tercera potencia. Luego se realizó un análisis de varianza (ANOVA) sobre ese modelo y se mostró un resumen de los resultados usando `summary(anova)`.

6. **Guardar el resumen en un archivo de texto:**

- Se capturó la salida del resumen del ANOVA en un archivo de texto plano usando `capture.output()`. El resumen fue guardado en un archivo llamado “anova_aw.txt”.

A continuación se muestra el código implementado:

```

1  ## =====
2  # Proyecto: Vida util de conchas de vainilla - Diseno factorial AxBxC
3  # Autores: Mariana Ines Flores Yanez y Jesus Guadalupe Perez Flores
4  # Lugar y fecha: Pachuca de Soto, Hgo., Mexico. Enero 2024.
5  ## =====
6  # Cargar las librerías:
7  library(readxl)
8  # Cargar los datos:
9  dataset <- read_excel("datos_aw.xlsx")
10 # Adjuntar y mostrar los datos:
11 attach(dataset)
12 names(dataset)
13 str(dataset)
14 # Establecer las variables
15 factor1_empaque <- factor(Empaque)
16 factor2_temperatura <- factor(Temperatura)
17 factor3_tiempo <- factor(Tiempo)
18 respuesta_aw <- dataset$aw
19 # Calculo de la tabla ANOVA
20 model <- lm(respuesta_aw ~ (factor1_empaque + factor2_temperatura + factor3_tiempo)
21             ^3)
22 anova <- aov(model)
23 summary(anova)
24 # Guardar el resumen en un archivo de texto plano (.txt)
25 capture.output(
26   summary(anova),
27   file = "anova_aw.txt"
28 )

```

A.2.2. Influencia de la temperatura y del empaque de almacenamiento

Fue desarrollado un script de R con el propósito de llevar a cabo un análisis de datos y generar un boxplot factorial con letras compactas para señalar diferencias significativas entre diversas condiciones de estudio. Para ello, se examinó la influencia tanto de la temperatura como del tiempo de almacenamiento en la actividad acuosa de conchas de vainilla a lo largo de su almacenamiento. A continuación, se proporciona una descripción simplificada de cada etapa del código:

1. Cargar las librerías:

- Se importaron las librerías necesarias: `readxl` para leer archivos de Excel, `ggplot2` para la visualización de datos, `multcompView` para realizar pruebas de comparación múltiple, y `dplyr` para manipulación de datos.

2. Cargar los datos:

- Se leyó y cargó un conjunto de datos desde un archivo Excel llamado “datos_aw.xlsx” y fue almacenado en la variable `dataset`.
3. **Análisis de varianza (ANOVA):**
 - Se realizó un modelo de regresión lineal (`lm`) para analizar la variabilidad de la variable `aw` en función del factor `Condiciones` en el conjunto de datos. Luego, se realizó un ANOVA (`aov`) sobre ese modelo y se mostró un resumen de los resultados.
 4. **Prueba de Tukey:**
 - Se realizó la prueba de Tukey (`TukeyHSD`) sobre los resultados del ANOVA para identificar diferencias significativas entre las condiciones de estudio.
 5. **Compactar las letras en una pantalla:**
 - Se utilizó la función `multcompLetters4` para compactar las letras que indican diferencias significativas entre las condiciones de estudio.
 6. **Creación de una tabla con datos resumidos:**
 - Se creó una tabla `Tk` que resumió las estadísticas (media y tercer cuartil) de la variable `aw` agrupadas por la variable `Condiciones`. La tabla se ordenó por la media en orden descendente.
 7. **Extracción de letras compactas y agregado a la tabla:**
 - Se extrajeron las letras compactas del resultado de la prueba de Tukey y se añadieron a la tabla `Tk`.
 8. **Crear el boxplot con ggplot2:**
 - Se utilizó `ggplot2` para crear un diagrama de cajas y bigotes (boxplot) con información específica en el eje **X**, **y**, **Y** colores. Se incorporó información sobre temperatura y se personalizó el estilo del gráfico.
 9. **Guardar la figura final:**
 - Se guardó el gráfico resultante en un archivo llamado “aw_boxplot.png” con dimensiones y resolución específicas.

A continuación se muestra el código implementado:

```

1 ## =====
2 # Proyecto: Vida util de conchas de vainilla - Diseno factorial AxBxC
3 # Autores: Mariana Ines Flores Yanez y Jesus Guadalupe Perez Flores
4 # Lugar y fecha: Pachuca de Soto, Hgo., Mexico. Enero 2024.
5 ## =====
6 # Cargar las librerias:
7 library(readxl)
8 library(ggplot2)
9 library(multcompView)
10 library(dplyr)
11 # Cargar los datos:
12 dataset <- read_excel("datos_aw.xlsx")
13 # Analisis de varianza
14 model <- lm( aw ~ Condiciones, data = dataset )

```

```

15 anova <- aov(model)
16 summary(anova)
17 # Prueba de Tukey
18 tukey <- TukeyHSD(x=anova, conf.level=0.95)
19 print(tukey)
20 # Compactar las letras en una pantalla
21 cld <- multcompLetters4(anova, tukey)
22 print(cld)
23 # Creacion de una tabla con los datos resumidos y la visualizacion de letras
  compactas
24 # Tabla con el factor (Temperatura) y el 3er cuartil
25 Tk <- group_by(dataset, Condiciones) %>%
26   summarise(mean=mean(aw), quant = quantile(aw, probs = 0.75)) %>%
27   arrange(desc(mean))
28 # Extraccion de la pantalla de letras compactas y agregando a la tabla Tk
29 cld <- as.data.frame.list(cld$Condiciones)
30 Tk$cld <- cld$Letters
31 print(Tk)
32 # Crear el boxplot utilizando ggplot2:
33 ggplot(dataset, aes(x = factor(Condiciones), y = aw, fill = factor(Temperatura),
  color = factor(Temperatura))) +
34   geom_boxplot(alpha = 0.25, outlier.colour = "black", color = "black") +
35   geom_jitter(width = 0.25, alpha = 0.25) +
36   labs(x = "Condiciones de estudio (CE)", y = "Actividad de agua (aw)") +
37   theme_bw() +
38   theme(panel.grid.major = element_line(color = "gray", linetype = "dotted"), panel.
  grid.minor = element_blank()) +
39   guides(fill = guide_legend(title = "Temperatura"), color = guide_legend(title = "
  Temperatura")) +
40   annotate("text", x = Tk$Condiciones, y = Tk$quant, label = Tk$cld, color = "black"
  , size = 3, vjust = -1, hjust = -1) +
41   scale_fill_manual(values = c("#66c2a5", "#fc8d62", "#8da0cb"),
  breaks = c(20, 30, 40),
42   labels = expression("20\u00B0C", "30\u00B0C", "40\u00B0C")) +
43   scale_color_manual(values = c("#66c2a5", "#fc8d62", "#8da0cb"),
  breaks = c(20, 30, 40),
44   labels = expression("20\u00B0C", "30\u00B0C", "40\u00B0C"))
45 # Guardar la figura final:
46 ggsave("aw_boxplot.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.2.3. Influencia del tiempo de almacenamiento

En el código proporcionado, se llevó a cabo un análisis de datos y la creación de gráficos, específicamente boxplots con letras compactas, para explorar las diferencias significativas entre condiciones

de estudio, enfocándose en la influencia del tiempo de almacenamiento sobre la evolución de la actividad acuosa en conchas de vainilla. A continuación, se explica cada etapa del código:

1. Cargar bibliotecas:

- Se cargaron las bibliotecas necesarias, incluyendo `readxl` para leer archivos de Excel, `multcompView` para pruebas de comparación múltiple, `ggplot2` para visualización de datos, `dplyr` para manipulación de datos, y `gridExtra` para organizar gráficos.

2. Importar la base de datos:

- Se importó la base de datos desde el archivo “datos_aw.xlsx” y se almacenó en la variable `dataset`.

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

- Se definió una función llamada `analyze_and_plot` que realiza un análisis detallado para una condición específica (CE1, CE2, etc.). El análisis incluye cálculos de media, intervalo de confianza, ANOVA, prueba de Tukey, y la creación de un gráfico de dispersión con barras de error y letras compactas.

4. Llamar a la función para cada condición y organizar en dos filas:

- Se llamó a la función `analyze_and_plot` para cada condición de estudio (CE1 a CE6) y se almacenaron los resultados en variables separadas (`gg_ce1`, `gg_ce2`, etc.).

5. Organizar los gráficos en dos columnas:

- Se utilizó la función `grid.arrange` para organizar los gráficos generados en dos columnas. Se creó un gráfico combinado que presenta los resultados de las diferentes condiciones de estudio en dos filas.

6. Guardar la imagen combinada:

- Se guardó la imagen combinada de los gráficos en un archivo llamado “aw_plots_Tiempo.png” con un ancho de 8 unidades, alto de 10 unidades y una resolución de 300 dpi.

A continuación se muestra el código implementado:

```

1 ## =====
2 # Proyecto: Vida util de conchas de vainilla - Diseno factorial AxBxC
3 # Autores: Mariana Ines Flores Yanez y Jesus Guadalupe Perez Flores
4 # Lugar y fecha: Pachuca de Soto, Hgo., Mexico. Enero 2024.
5 ## =====
6 # Cargar bibliotecas
7 library(readxl)
8 library(multcompView)
9 library(ggplot2)
10 library(dplyr)
11 library(gridExtra)
12 # Importar la base de datos
13 dataset <- read_excel("datos_aw.xlsx")
14 # Funcion para realizar el analisis y crear el grafico
15 analyze_and_plot <- function(condicion) {
16   # Filtrar el dataset para la condicion dada

```

```

17 subset_dataset <- subset(dataset, Condiciones == condicion)
18 # Convertir Tiempo a factor y ordenar los niveles
19 subset_dataset$Tiempo <- factor(subset_dataset$Tiempo, levels = unique(subset_
dataset$Tiempo))
20 # Calcular la media y el intervalo de confianza del 95% para aw por Tiempo
21 summary_data <- subset_dataset %>%
22   group_by(Tiempo) %>%
23   summarise(
24     mean_aw = mean(aw),
25     lower_ci = mean_aw - qt(0.975, length(aw) - 1) * sd(aw) / sqrt(length(aw)),
26     upper_ci = mean_aw + qt(0.975, length(aw) - 1) * sd(aw) / sqrt(length(aw))
27   )
28 # Analisis de varianza
29 model <- lm(aw ~ Tiempo, data = subset_dataset)
30 anova_result <- aov(model)
31 summary(anova_result)
32 # Prueba de Tukey
33 tukey_result <- TukeyHSD(anova_result)
34 # Visualizar las letras solo para los niveles presentes en los datos
35 cld <- multcompLetters4(anova_result, tukey_result)
36 # Creacion de una tabla con los datos resumidos y la visualizacion de letras
compactas
37 Tk <- group_by(subset_dataset, Tiempo) %>%
38   summarise(mean = mean(aw)) %>%
39   arrange(desc(mean))
40 # Extraccion de la pantalla de letras compactas y agregando a la tabla Tk
41 cld <- as.data.frame.list(cld$Tiempo)
42 Tk$cld <- cld$Letters
43 # Crear un grafico de dispersion con barras de error y linea
44 gg <- ggplot(summary_data, aes(x = Tiempo, y = mean_aw)) +
45   geom_point() +
46   geom_line(aes(group = 1), color = "blue", linetype = "dotted") +
47   geom_errorbar(aes(ymin = lower_ci, ymax = upper_ci), width = 0.2) +
48   labs(x = "Tiempo (dias)",
49        y = "Actividad de agua (AW)") +
50   theme_bw() +
51   theme(panel.grid.major = element_line(color = "gray", linetype = "dotted"),
52         panel.grid.minor = element_blank()) +
53   geom_text(data = Tk, aes(x = Tiempo, y = mean, label = cld), size = 3, vjust =
-1, hjust = -1)
54 # Devuelve el grafico ggplot
55 return(gg)
56 }
57 # Llamar a la funcion para cada condicion y organizar en dos filas
58 gg_ce1 <- analyze_and_plot("CE1")
59 gg_ce2 <- analyze_and_plot("CE2")
60 gg_ce3 <- analyze_and_plot("CE3")
61 gg_ce4 <- analyze_and_plot("CE4")

```

```

61 gg_ce5 <- analyze_and_plot("CE5")
62 gg_ce6 <- analyze_and_plot("CE6")
63 # Organizar los graficos en dos columnas
64 combined_plot <- grid.arrange(
65   arrangeGrob(gg_ce1 + ggtitle("CE1"), gg_ce2 + ggtitle("CE2"), gg_ce3 + ggtitle("
66     CE3"), ncol = 1),
67   arrangeGrob(gg_ce4 + ggtitle("CE4"), gg_ce5 + ggtitle("CE5"), gg_ce6 + ggtitle("
68     CE6"), ncol = 1),
69   ncol = 2,
70   widths = c(1, 1),
71   heights = c(1)
72 )
73 # Guardar la imagen combinada
74 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 de las conchas de vainilla a lo largo de su almacenamiento en diversas condiciones de estudio.

A.3. Análisis factorial

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: el tipo de empaque (A), la temperatura de almacenamiento (B) y el tiempo de almacenamiento (C) 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 actividad acuosa.

Tabla A.2: ANOVA completo de la variación del peso de las conchas de vainilla.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor-p
A: Empaque	1	20	20	3.466	0.0656.
B: Temperatura	2	260	130	22.572	0.00000000813***
C: Tiempo	13	10480	806.2	140.015	2×10^{-16} ***
AB	2	1677	838.4	145.607	2×10^{-16} ***
AC	6	2154	358.9	62.34	2×10^{-16} ***
BC	19	1202	63.3	10.988	2×10^{-16} ***
ABC	6	1389	231.4	40.194	2×10^{-16} ***
Residuales	100	576	5.8		

Tabla A.3: ANOVA completo del contenido de humedad de las conchas de vainilla.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor-p
A: Empaque	1	1055.2	1055.2	5161.46	2×10^{-16} ***
B: Temperatura	2	873.1	436.5	2135.25	2×10^{-16} ***
C: Tiempo	13	845	65	317.94	2×10^{-16} ***
AB	2	469.8	234.9	1149.02	2×10^{-16} ***
AC	6	291.2	48.5	237.44	2×10^{-16} ***
BC	18	203.2	11.3	55.23	2×10^{-16} ***
ABC	6	81.4	13.6	66.33	2×10^{-16} ***
Residuales	98	20	0.2		

Tabla A.4: ANOVA completo de la actividad acuosa de las conchas de vainilla.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor-p
A: Empaque	1	1.0551	1.0551	73002	2×10^{-16} ***
B: Temperatura	2	1.3945	0.6972	48241	2×10^{-16} ***
C: Tiempo	13	0.8282	0.0637	4408	2×10^{-16} ***
AB	2	1.4185	0.7092	49071	2×10^{-16} ***
AC	6	0.2192	0.0365	2527	2×10^{-16} ***
BC	19	0.3596	0.0189	1310	2×10^{-16} ***
ABC	6	0.2594	0.0432	2991	2×10^{-16} ***
Residuales	100	0.0014	0		

