



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICO BIOLÓGICAS
MAESTRÍA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

Optimización del proceso de escaldado de rebanadas de carambola
(*Averrhoa carambola* L.) y predicción de la retención de vitamina C

TESIS

Que presenta

LBG. LUIS ROBERTO LÓPEZ NAFARRATE

Para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIA

Y

TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

Directores

Dr. José de Jesús Caro Corrales

Dra. Olivia Clarissa Caro Hernández



Universidad Autónoma de Sinaloa

Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional Buelna

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia [Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)



Dirección General de Bibliotecas
Ciudad Universitaria
Av. de las Américas y Blvd.
Universitarios
C.P. 80010 Culiacán Sin. Méx.
Tel (667) 713 78 32 y
(667) 712 50 57
dgbuas@uas.edu.mx

Este estudio fue realizado en el Laboratorio de Mediciones Termofísicas del Posgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos de la Facultad de Ciencias Químico Biológicas de la Universidad Autónoma de Sinaloa, bajo la dirección del Dr. José de Jesús Caro Corrales y la Dra. Olivia Clarissa Caro Hernández y la asesoría de la Dra. Rosalina Iribe Salazar. Luis Roberto López Nafarrate recibió beca de SECIHTI.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la **Universidad Autónoma de Sinaloa**, en especial a la **Facultad de Ciencias Químico Biológicas**, por brindarme la oportunidad de formar parte de su comunidad estudiantil y contribuir a mi formación académica, profesional y personal.

A **mis padres** (Miguel Ángel López Cázares y Ofelia Guadalupe Nafarrate Bonilla), por su amor, esfuerzo y apoyo incondicional. Gracias por dar siempre lo mejor de ustedes para ayudarme a alcanzar mis metas, por confiar en mí incluso cuando yo mismo dudaba de mis capacidades y por hacerme sentir acompañado en cada etapa de este camino. Gracias a ustedes me he convertido en la persona que soy hoy.

A **mis hermanos** (José Manuel y Miguel Ángel), por su apoyo constante, por creer en mí y por celebrar cada uno de mis logros. Gracias por hacerme sentir que siempre podía contar con ustedes.

A **mis abuelos** (Pita y Boo), por estar siempre presentes y pendientes de mi formación tanto profesional como personal. Su cariño y apoyo han sido fundamentales a lo largo de mi vida.

A **mi prometida** (Diana Laura), por acompañarme en cada momento de este proceso. Gracias por escucharme, apoyarme e impulsarme constantemente a alcanzar mis objetivos. Tu cariño, comprensión y motivación me ayudaron a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles. Gracias por creer en mí y por caminar a mi lado en cada paso de esta etapa. Te amo.

A **mis directores de tesis**, por su orientación, apoyo y disposición para compartir sus conocimientos. Gracias por ayudarme a enfrentar los desafíos que surgieron durante el desarrollo de este proyecto y por contribuir a mi crecimiento profesional y personal. Al **Dr. José de Jesús Caro Corrales**, por permitirme formar parte de su equipo de trabajo, por su apoyo constante, sus enseñanzas y la confianza depositada en mí durante este tiempo. A la **Dra. Olivia Clarissa Caro Hernández**, por su paciencia, dedicación y apoyo constante. Gracias por

ayudarme a comprender mis errores, por sus valiosas explicaciones y por las observaciones que contribuyeron significativamente al desarrollo de este trabajo y a mi formación profesional.

A la **Dra. Rosalina Iribe Salazar**, a la **Dra. Yessica Viridiana Vázquez López** y al **Dr. Marco César Carrasco Escalante**, por el apoyo brindado durante el desarrollo de este proyecto, por compartir sus conocimientos y por dedicar tiempo a resolver mis dudas y orientarme en aquellos temas que representaban un desafío para mí. Sus enseñanzas contribuyeron significativamente a mi formación profesional y personal.

A la **M.C. Miriam Gill Gaxiola**, por sus consejos, apoyo constante y enseñanzas relacionadas con las técnicas y protocolos de laboratorio. Gracias por responder siempre a mis dudas y por brindarme orientación cuando enfrentaba dificultades en el trabajo experimental.

A **mis compañeros y amigos del laboratorio**: Gisselle, Angélica, Aneth, Johana, Litzy, Carlos y Esmeralda. Gracias por su amistad, apoyo y ayuda constante. Su compañía hizo más agradable cada jornada de trabajo y me permitió afrontar con una sonrisa los momentos de mayor presión y estrés. Sin duda, conocerlos ha sido una de las experiencias más valiosas de esta etapa.

Finalmente, agradezco a **Dios** por permitirme alcanzar esta meta, por darme fortaleza en los momentos difíciles y por acompañarme a lo largo de mi vida.

ÍNDICE

	Pág.
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE CUADROS	viii
I. RESUMEN	5
II. INTRODUCCIÓN	9
III. REVISIÓN DE LITERATURA	12
A. CARAMBOLA	12
1. Características	12
2. Productos derivados	16
3. Producción nacional	16
4. Uso medicinal	16
a. Efecto hipoglucémico	17
b. Hepatoprotector	17
c. Antimicrobiano	17
d. Antihelmíntico	18
e. Efecto antihipertensivo	18
5. Hábitat	18
6. Composición química y nutrimental	19
7. Fitotoxicidad	21
8. Oxalatos	24
a. Contenido en carambola	24
b. Contenido en otros frutos	24
c. Biosíntesis y degradación de oxalatos	24
9. Ácido ascórbico	27
10. Capacidad antioxidante	28
a. Compuestos fenólicos	29
11. Polifenol oxidasa (PPO)	29
a. Mecanismo de acción de la PPO	30
B. PROCESAMIENTO DE LA CARAMBOLA	32
C. ESCALDADO	32
1. Escaldado en agua	33
2. Escaldado por vapor	33

a. Escaldado por pulsos de vapor al vacío	33
3. Escaldado asistido por microondas	34
4. Efecto del escaldado en la vitamina C	34
5. Efecto del escaldado en capacidad antioxidante	34
6. Efecto del escaldado en el contenido de oxalatos	35
D. OPTIMIZACIÓN	37
E. TRANSFERENCIA DE CALOR	38
1. Conducción	38
2. Convección	39
3. Radiación	39
F. PROPIEDADES TERMOFÍSICAS	40
1. Conductividad térmica (k)	40
2. Difusividad térmica (α)	40
3. Densidad (ρ)	41
4. Capacidad calorífica específica (C_p)	41
G. SIMULACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR	42
1. Ventajas de la simulación	42
2. Proceso de desarrollo de un modelo de simulación	42
3. Método de elemento finito	43
IV. JUSTIFICACIÓN	44
V. OBJETIVOS	45
A. OBJETIVO GENERAL	45
B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	45
VI. MATERIALES Y MÉTODOS	46
A. MATERIALES	46
1. Materia prima	46
B. MÉTODOS	46
1. Escaldado	46
2. Diferencia total de color (ΔE)	46
3. Firmeza	47
4. Sólidos Solubles Totales (SST)	47
5. pH	48

6. Determinación de oxalatos	48
a. Fundamento	48
b. Solución blanca	48
c. Curva de calibración de ácido oxálico	49
d. Preparación de la muestra	49
e. Extracción y medición de muestra	49
7. Vitamina C	49
8. Capacidad antioxidante	50
a. Curva de calibración	51
b. Extracción de compuestos fenólicos	51
9. Polifenol oxidasa (PPO)	52
10. Parámetros ingenieriles	53
a. Conductividad térmica (k) y difusividad térmica (α)	53
b. Densidad (ρ)	55
c. Capacidad calorífica específica (C_p)	55
d. Coeficiente convectivo de transferencia de calor (h)	55
11. Simulación de la transferencia de calor	57
12. Predicción de retención de vitamina C	58
13. Diseño experimental	59
a. Optimización	59
b. Análisis de datos	61
c. Validación del modelo de predicción	61
d. Parámetros ingenieriles	61
e. Contraste entre rebanadas de carambola escaldadas optimizadas respecto al fresco	62
VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	63
A. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS	63
1. Color	63
2. Firmeza	63
3. Sólidos solubles totales	64
4. pH	64

B. PARÁMETRO QUÍMICO	64
1. Contenido de oxalatos	64
C. PARÁMETRO NUTRIMENTAL	65
1. Vitamina C	65
D. PARÁMETRO FUNCIONAL	65
1. Capacidad antioxidante	65
E. PARÁMETRO ENZIMÁTICO	66
1. Actividad de la polifenol oxidasa	66
F. MODELOS DE REGRESIÓN DE PARÁMETROS QUÍMICO, NUTRIMENTAL Y FUNCIONAL DE REBANADAS DE CARAMBOLA ESCALDADAS	66
1. Contenido de oxalatos (<i>CO</i>)	66
2. Retención de vitamina C (<i>RVC</i>)	68
3. Capacidad antioxidante (<i>CA</i>)	68
G. MEJORES CONDICIONES PARA LA OBTENCIÓN DE REBANADAS DE CARAMBOLA ESCALDADA	72
1. Optimización del proceso de escaldado	72
2. Validación de los modelos de predicción	74
H. CONTRASTE DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS, QUÍMICO, NUTRIMENTAL, FUNCIONAL Y ENZIMÁTICO DE REBANADAS DE CARAMBOLA ESCALDADAS RESPECTO AL FRESCO	74
1. Parámetros fisicoquímicos	77
a. Color y diferencia total de color (ΔE)	77
a. Firmeza	77
b. Sólidos solubles totales	78
c. pH	78
2. Parámetro químico	79
a. Contenido de oxalatos	79
3. Parámetro nutrimental	79
a. Vitamina C	79
4. Parámetro funcional	81
a. Capacidad antioxidante	81
5. Parámetro enzimático	81

a. Actividad de polifenol oxidasa	81
I. EVALUACIÓN DE PARÁMETROS INGENIERILES EN EL ESCALDADO DE REBANADAS DE CARAMBOLA	82
1. Conductividad térmica (k)	82
2. Difusividad térmica (α)	84
3. Densidad aparente (ρ)	86
4. Capacidad calorífica específica (C_p)	86
5. Coeficiente convectivo de transferencia de calor (h)	89
J. SIMULACIÓN DE TRANSFERENCIA DE CALOR	90
K. VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN	90
L. PREDICCIÓN DE LA RETENCIÓN DE VITAMINA C	96
1. Predicción de retención de vitamina C	96
2. Validación de la predicción de retención de vitamina C	96
VIII. CONCLUSIONES	96
IX. BIBLIOGRAFÍA	101
ABREVIATURAS	115
ANEXOS	118

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Descripción	Pág.
1	Árbol de carambola.	13
2	Fruto y rebanadas de carambola.	15
3	Esquema de los mecanismos potenciales de la nefrotoxicidad y neurotoxicidad de carambola en humanos.	22
4	Representación esquemática de la biosíntesis y degradación del ácido oxálico	26
5	Mecanismos de acción de PPO en papa.	31
6	Gráfico de superficie de respuesta.	36
7	Sonda dual modelo KD2 Pro, Decagon, EUA.	54
8	Efecto de la temperatura y el tiempo de escaldado sobre el contenido de oxalatos (<i>CO</i>) en rebanada de carambola, (A) superficie de respuesta y (B) contornos.	67
9	Efecto de la temperatura y el tiempo de escaldado sobre la retención de vitamina C (<i>RVC</i>) en rebanada de carambola, (A) superficie de respuesta y (B) contornos.	69
10	Efecto de la temperatura y el tiempo de escaldado sobre la capacidad antioxidante (<i>CA</i>) en rebanada de carambola, (A) superficie de respuesta y (B) contornos.	70
11	Gráfico de deseabilidades individuales de las variables de proceso y respuesta y deseabilidad global correspondientes a las condiciones óptimas del proceso de escaldado en rebanadas de carambola.	73
12	Conductividad térmica (<i>k</i>) para rebanadas de carambola en función de la temperatura ($LSD = 0.0936 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\alpha = 0.05$).	83
13	Difusividad térmica (α) para rebanadas de carambola en función de la temperatura ($LSD = 4.93 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, $\alpha = 0.05$).	85
14	Densidad aparente (ρ) de rebanadas de carambola en función de la temperatura ($LSD = 38 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $\alpha = 0.05$).	87

15	Capacidad calorífica específica (C_p) para rebanadas de carambola en función de la temperatura ($LSD = 768.7 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\alpha = 0.05$).	88
16	Modelo tridimensional de una rebanada de carambola, por medio del método de elemento finito.	91
17	Perfil de temperatura en la etapa de calentamiento a 80.6°C , con tiempo de (A) 1 s, (B) 20 s y (C) 60 s en rebanada completa y media rebanada de carambola al utilizar el modelo de elemento finito.	92
18	Perfil de temperatura en la etapa de enfriamiento a 3.6°C , con tiempo de (A) 506 s, (B) 535 s y (C) 565 s en rebanada completa y media rebanada de carambola al utilizar el modelo de elemento finito.	93
19	Historia de temperatura para rebanada de carambola estimada con el método de elemento finito y experimental.	94
20	Gráfico de la velocidad de degradación de vitamina C para rebanadas de carambola escaldadas, calculada mediante la historia de temperatura simulada por el método de elemento finito (HTMEF) y con historia de temperatura experimental (HTE).	95

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Descripción	Pág.
1	Clasificación taxonómica de la carambola (<i>Averrhoa carambola</i> L.).	14
2	Composición nutrimental de carambola.	20
3	Alimentos con mayor contenido de oxalatos.	25
4	Tratamientos para el diseño central compuesto rotatable.	60
5	Variables de respuesta predichas y experimentales evaluadas en rebanadas de carambola en condiciones optimizadas.	75
6	Parámetros fisicoquímicos de rebanadas de carambola escaldadas respecto al fruto fresco.	76
7	Parámetros nutrimental, químico, enzimático y funcional de rebanadas de carambola escaldadas, respecto al fruto fresco.	80
8	Retención de vitamina C predicha mediante cálculos ingenieriles (HTE y HTMEF) y la obtenida experimentalmente para rebanadas de carambola escaldadas a 80.6 °C por 8.41 minutos.	98

I. RESUMEN

La carambola (*Averrhoa carambola* L.) es un fruto tropical con elevado valor nutricional y funcional debido a su contenido de vitamina C y compuestos antioxidantes. Sin embargo, también contiene oxalatos, compuestos asociados con efectos adversos para la salud cuando se consumen en altas concentraciones. El objetivo de este estudio fue optimizar el proceso de escaldado de rebanadas de carambola con base en parámetros químicos, nutricionales y funcionales, así como predecir la retención de vitamina C mediante la simulación de la transferencia de calor. Inicialmente, se caracterizó el fruto fresco mediante la determinación de firmeza (punción), sólidos solubles totales (refractometría), pH (potenciometría), color (colorimetría), contenido de oxalatos (CO), retención de vitamina C (RVC), capacidad antioxidante (CA) y actividad de polifenol oxidasa (PPO). Posteriormente, las rebanadas de carambola fueron sometidas a diferentes condiciones de temperatura (70–95 °C) y tiempo (2–15 min) de escaldado. La optimización del proceso se realizó mediante la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR). Además, se determinaron las propiedades termofísicas del fruto a 25, 50, 70 y 90 °C, que incluyeron conductividad y difusividad térmicas (k y α , fuente lineal de calor), densidad aparente (ρ , desplazamiento de volumen) y capacidad calorífica específica (C_p , definición de α), así como el coeficiente convectivo de transferencia de calor (h , parámetros concentrados) tanto para el escaldado, como para el enfriamiento. Estos parámetros fueron utilizados para desarrollar un modelo de transferencia de calor mediante el Método de Elemento Finito (MEF). Se predijo la retención de vitamina C al usar la historia de temperatura simulada bajo condiciones óptimas con el MEF y se validó con resultados experimentales. Las condiciones óptimas de escaldado se encontraron a 80.6 °C durante 8.4 minutos, se obtuvo una reducción de oxalatos de 63.0 %, una retención de vitamina C de 53.5 % y una capacidad

antioxidante de 86.6 %. Asimismo, se inactivó completamente la polifenol oxidasa. El modelo de simulación describió adecuadamente la transferencia de calor durante el proceso. La retención de vitamina C predicha mostró una buena concordancia con los datos experimentales, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.988. La deseabilidad global fue 0.814. Los parámetros de calidad en rebanadas de carambola escaldadas en las condiciones optimizadas fueron diferentes a los de rebanadas de carambola frescas, excepto los parámetros a^* , b^* de color y en CA . El parámetro k se encontró en un rango de 0.488 a 0.807 $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$, α osciló desde 1.68×10^{-7} a $2.62 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$, ρ estuvo entre 756 a 956 kg m^{-3} mientras que C_p varió de 3071 a 4127 $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$. El coeficiente h para el escaldado y para enfriamiento de rebanadas de carambola fue 268 ± 3.10 y $289 \pm 5.7 \text{ W m}^{-2} \text{K}^{-1}$, respectivamente. Al utilizar el MEF se obtuvo un coeficiente R^2 de 0.988. Con el estudio de penetración de calor se predijo una retención de vitamina C de 52.3% y en forma experimental se obtuvo $52.6 \pm 1.4 \%$. El escaldado optimizado permitió reducir el contenido de oxalatos y la actividad enzimática, se conservó simultáneamente una alta proporción de vitamina C y capacidad antioxidante. Además, la simulación de la transferencia de calor constituyó una herramienta útil para predecir la calidad nutrimental de la carambola durante el procesamiento térmico.

ABSTRACT

Star fruit (*Averrhoa carambola* L.) is a tropical fruit with high nutritional and functional value due to its vitamin C content and antioxidant compounds. However, it also contains oxalates, compounds associated with adverse health effects when consumed at high concentrations. The objective of this study was to optimize the blanching process of star fruit slices based on chemical, nutritional, and functional parameters, as well as to predict vitamin C retention through heat transfer simulation. Initially, fresh fruit was characterized by determining firmness (puncture test), total soluble solids (refractometry), pH (potentiometry), color (colorimetry), oxalate content (*OC*), vitamin C retention (*VCR*), antioxidant capacity (*AC*), and polyphenol oxidase (PPO) activity. Subsequently, star fruit slices were subjected to different blanching temperatures (70–95 °C) and times (2–15 min). Process optimization was carried out using Response Surface Methodology (RSM). In addition, the thermophysical properties of the fruit were determined at 25, 50, 70, and 90 °C, including thermal conductivity and thermal diffusivity (k and α , transient line heat source method), apparent density (ρ , volume displacement method), and specific heat capacity (C_p , calculated from thermal diffusivity definition), as well as the convective heat transfer coefficient (h , lumped parameters method) during both blanching and cooling. These parameters were used to develop a heat transfer model using the Finite Element Method (FEM). Vitamin C retention was predicted from the simulated temperature history under the optimized blanching conditions using the FEM model and subsequently validated with experimental data. The optimal blanching conditions were 80.6 °C for 8.4 min, resulting in a 63.0% reduction in oxalate content, a vitamin C retention of 53.5%, and an antioxidant capacity of 86.6%. In addition, polyphenol oxidase was completely inactivated. The heat transfer model adequately described the thermal behavior during the blanching process. The predicted vitamin C retention showed good agreement with the experimental data, with a coefficient of

determination (R^2) of 0.988. The overall desirability value was 0.814. Quality parameters of blanched star fruit slices under the optimized conditions differed from those of fresh slices, except for the color parameters a^* and b^* , and antioxidant capacity. Thermal conductivity (k) ranged from 0.488 to 0.807 W m⁻¹ K⁻¹, thermal diffusivity (α) ranged from 1.68×10⁻⁷ to 2.62×10⁻⁷ m² s⁻¹, apparent density (ρ) ranged from 756 to 956 kg m⁻³, and specific heat capacity (Cp) varied from 3071 to 4127 J kg⁻¹ K⁻¹. The convective heat transfer coefficient (h) was 268 ± 3.10 W m⁻² K⁻¹ during blanching and 289 ± 5.7 W m⁻² K⁻¹ during cooling. The FEM model yielded a coefficient of determination (R^2) of 0.988. Heat penetration analysis predicted a vitamin C retention of 52.3%, while the experimentally determined value was 52.6 ± 1.4%. The optimized blanching process reduced oxalate content and enzymatic activity while preserving a high proportion of vitamin C and antioxidant capacity. Furthermore, heat transfer simulation proved to be a useful tool for predicting the nutritional quality of star fruit during thermal processing.

II. INTRODUCCIÓN

La carambola (*Averrhoa carambola* L.) es un fruto exótico que, al cortarse en rebanadas transversales, presenta una forma estrellada con cinco puntas. Es originaria de Asia Tropical y se encuentra distribuida en países como Filipinas, Florida, China, India, América Tropical, Indonesia, Malasia, Tailandia y otras regiones tropicales. Se consume en fresco y se utiliza en la preparación de ensaladas, refrescos, encurtidos, jugos y dulces en almíbar. Los mercados europeos, particularmente en Bélgica, Dinamarca, Finlandia, Francia, Alemania, Holanda, España, Suecia, Suiza e Inglaterra, abastecen durante todo el año carambola importada de Malasia (Grajales y col., 2005).

El comercio internacional de carambola ha aumentado significativamente en la última década, impulsado por la creciente demanda de frutas tropicales en mercados internacionales. Según el informe de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2024), la exportación global de frutas tropicales como la carambola ha logrado un incremento del 8 % anual, se destaca principalmente en países como Tailandia, Filipinas y Vietnam. Estos países lideran la exportación mundial debido a sus condiciones climáticas favorables y su infraestructura agrícola especializada. En América Latina, países como Costa Rica, Colombia, México y Brasil son los principales productores y exportadores de carambola. Según la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2023), la exportación de carambola en América Latina ha mostrado un crecimiento constante en los últimos años, con un incremento del 10 % en los volúmenes exportados en comparación con la década anterior.

El aumento en consumo y exportación se debe tanto a su apariencia atractiva como a sus aportes nutrimentales, entre los cuales se destaca por contener vitaminas [A, B1 (tiamina), B2

(riboflavina), B5 (niacina) y C], ácidos (oxálico, cítrico, málico, succínico, fumárico y α -cetoglutarico), aminoácidos (asparagina, treonina, serina, ácido glutámico, prolina, glicina, alanina, valina, isoleucina, fenilalanina, ácido gamma-aminobutírico o GABA, ornitina e histidina), carotenos, betacarotenos, luteína (flavonoide), proteínas, carbohidratos y grasas (Gonzales y Palacios, 2003).

La polifenoloxidasa (PPO) es una enzima clave en el proceso de oxidación de compuestos fenólicos, que en presencia de oxígeno y en condiciones específicas, produce melaninas que provocan la decoloración de frutas y hortalizas. En el caso de la carambola, la acción de la PPO no solo afecta la apariencia de la fruta, sino que también puede alterar su valor nutricional y la calidad sensorial del producto final (Calderón y Aguirre, 2025). La polifenol oxidasa, cataliza la reacción dependiente de oxígeno que transforma O-difenoles en O-quinonas, éstas conducen a la formación de polímeros marrones responsables del impacto negativo para la industria alimenticia (Aristizabal y col., 2012).

Aunado al aumento en el consumo y popularidad de la carambola, se presentan reportes de casos por intoxicación con el fruto, asociados con su alto contenido de oxalatos. Estos son compuestos químicos naturales que produce el organismo y también se encuentran presentes en algunos alimentos. Un alto contenido de oxalato puede causar problemas graves como cálculos renales y cristales, que pueden dañar los riñones y provocar que dejen de funcionar. Además, el fruto presenta una fitotoxina propia de la carambola, la cual se denomina caramboxina y en combinación con niveles altos de oxalatos puede causar daños neurológicos (García-Cairasco y col., 2013).

El escaldado es un proceso térmico que ha mostrado reducir los contenidos de oxalatos en diversos alimentos, además inactiva enzimas que causan oscurecimiento y disminución de la

vida del producto. Las investigaciones acerca del método de escaldado se han enfocado en encontrar la temperatura y tiempo óptimos a los cuales deben someterse los diferentes frutos y hortalizas. Para ello, se utilizan metodologías como la superficie de respuesta, en la cual se analiza la influencia de estos parámetros sobre los compuestos bioactivos (Quispe-Herrera y col., 2022).

Por lo anterior, el presente estudio busca optimizar el proceso de escaldado de carambola, con el propósito de conservar la mayor cantidad posible de nutrimentos, inactivar la enzima polifenol oxidasa y reducir el contenido de oxalatos. Asimismo, se pretende desarrollar simulaciones adecuadas de transferencia de calor, que permitan predecir el comportamiento térmico del fruto y estimar el contenido de vitamina C bajo diferentes condiciones de procesamiento.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

A. CARAMBOLA

1. Características

El árbol de carambola es perenne, con un tronco que puede ser único o ramificado y su altura varía de pequeña a mediana (**Figura 1**). Estos árboles crecen rápidamente en áreas protegidas de vientos fuertes. La zona de mayor producción de frutos se encuentra en el área media de la copa, que mide entre 0.9 y 2.1 m. Las hojas de la carambola son compuestas, con una longitud de 15 a 30 cm, y se distribuyen de manera alterna en las ramas. Cada hoja está formada por 5 a 11 hojuelas verdes, que miden de 1.5 a 9 cm de largo y de 1 a 4.5 cm de ancho (Crane y Balerdi, 2015).

La planta se empieza a desarrollar de 15 a 20 días después de que se ha sembrado, con escarificación. El período del florecimiento es de dos años y el período de la primera cosecha es entre los veintiséis meses aproximadamente. Los árboles inician su producción entre los 4 a 5 años, se logra obtener tres cosechas al año, pues se sabe que florece y fructifica todo el año. Las flores son de color rojo y púrpura, se agrupan en racimos diminutos y son perfectas. Tienen un pedicelo corto, son regulares y presentan heterostilia o distilia. Son hermafroditas, autoincompatibles y se polinizan de forma cruzada. Cada flor tiene cinco pétalos, cinco sépalos, cinco estambres y cinco estaminodios. El **Cuadro 1** muestra la clasificación taxonómica de la carambola (Gonzales y Palacios, 2003).

La planta de carambola produce pequeños racimos de flores rojas, lilas o moradas que contienen cinco pétalos. Los frutos suelen ser pequeños y de color verde oscuro cuando están inmaduros; pero se vuelven amarillos cuando están completamente maduros (**Figura 2**). Por lo



Figura 1. Árbol de carambola.

En el inciso (A) de la figura se muestra el tronco de un árbol de carambola el cual es un tronco continuo (perene) que sigue del tronco hasta las ramificaciones, en el inciso (B) se observa los frutos salientes de las ramificaciones, las cuales son delgadas y entrelazadas semejantes al comportamiento de enredaderas de tallo grueso, en el inciso (C) se observan las flores del árbol de carambola.

Cuadro 1. Clasificación taxonómica de la carambola (*Averrhoa carambola* L.).

División	Espermatofitas
Subdivisión	Angiospermas
Clase	Dicotiledóneas
Subclase	Polipétalos
Serie	Disciflorae
Orden	Geraniales
Familia	Oxalidaceae
Género	<i>Averrhoa</i>
Especie	<i>carambola</i>

Fuente: Muthu y col., 2016.

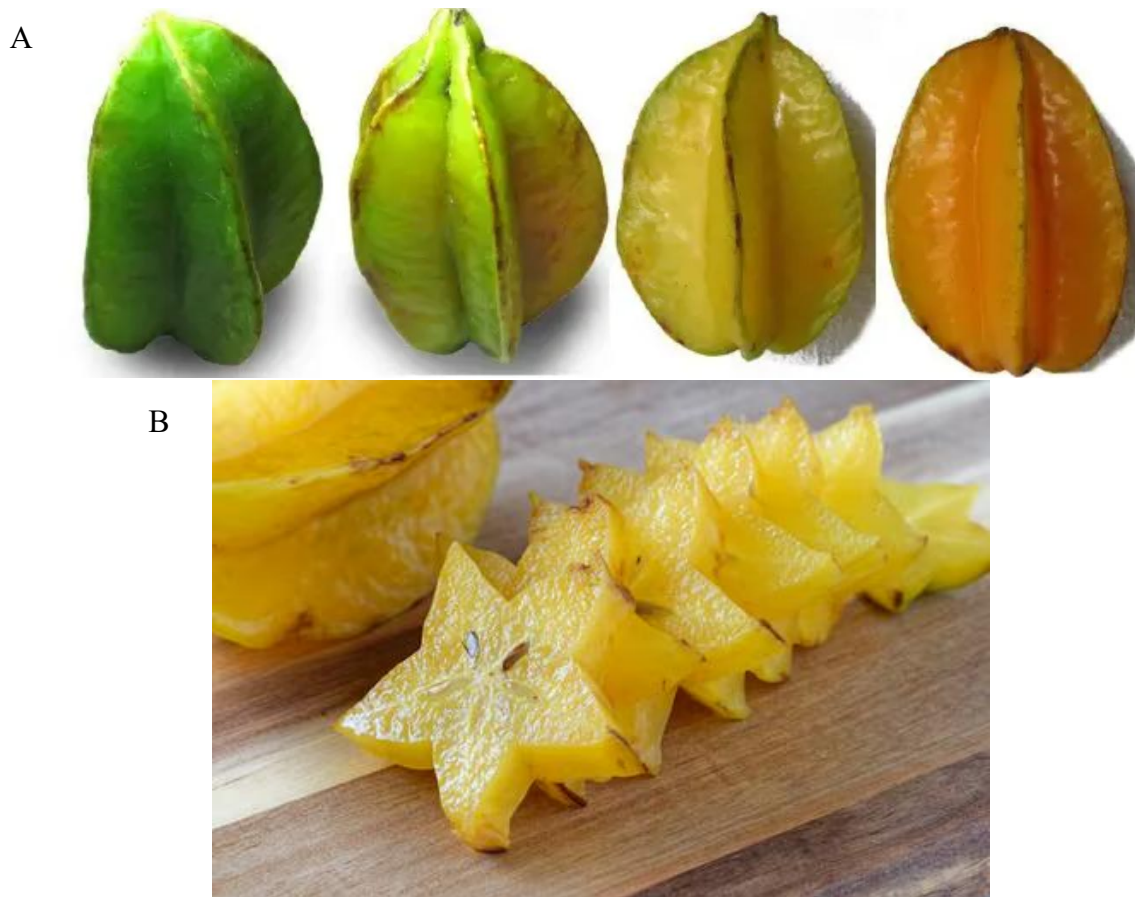


Figura 2. Fruto y rebanadas de carambola.

En la imagen (A) se observa el fruto en diferentes estados de madurez, pasa de coloración verde (inmaduro) hasta la coloración naranja (maduro), en la imagen (B) se muestran las rebanadas del fruto y la peculiar forma de estrella que se forma al cortarlas de manera horizontal, también se muestra el interior del fruto en el cual solo se encuentra pulpa y semillas, con 5 compartimentos regularmente en forma de cresta que le otorgan su particular figura.

general, las carambolas son carnosas con cinco crestas o ángulos longitudinales y tiene una textura crujiente. Además, los frutos tienen forma de estrella cuando se cortan horizontalmente de ahí que el fruto se llame carambola “star fruit” (Muthu y col., 2016).

2. Productos derivados

Entre los principales derivados de la carambola se encuentran los jugos, néctares, concentrados, mermeladas, jaleas, fruta cristalizada, frutas deshidratadas, productos congelados, polvos obtenidos por secado y fermentados, los cuales permiten diversificar su utilización y generar productos con mayor valor agregado. La selección del proceso depende del producto final deseado, de las características fisicoquímicas del fruto y de la conservación de sus atributos nutricionales y funcionales.

3. Producción nacional

La producción de carambola en México en el año 2023 fue de 574 toneladas. Los estados donde se reporta la producción más importante son: Morelos, Jalisco, Colima, Michoacán y Yucatán (SIAP 2023).

4. Uso medicinal

Además de ser una fuente de alimento, la carambola también se considera una hierba en muchas partes de Brasil, China, India, Malasia y Taiwán, este fruto se utiliza ampliamente en preparaciones ayurvédicas y de medicina tradicional china como remedio para la fiebre, el dolor de garganta, la tos, el asma, el dolor de cabeza crónico y las inflamaciones de la piel. Los estudios fitoquímicos y farmacológicos sugieren que los extractos de las hojas, frutos y raíces de la carambola contienen saponinas, flavonoides, alcaloides y taninos que son conocidos por conferir propiedades antioxidantes y curativas específicas (Muthu y col., 2016).

a. Efecto hipoglucémico

Sánchez-Cruzado (2019) reportó que el zumo del fruto de carambola presentó efecto hipoglucémico en dosis de 100 y 200 mg/kg de masa corporal al séptimo y catorceavo día en ratas albinas. Esto se atribuyó a la restauración de las enzimas antioxidantes a un nivel estándar en el páncreas, debido a que Saikia y col. (2015) informaron que los flavonoides y el ácido gálico mejoran la hiperglucemia y la sensibilidad a la insulina a través de la activación de la proteína quinasa activada con monofosfato de adenosina (AMPK) en el músculo esquelético, el hígado y el tejido adiposo blanco. La activación de AMPK provoca una regulación positiva del transportador de glucosa en el músculo esquelético y el tejido adiposo blanco al tiempo que inhibe la producción de glucosa en el hígado.

b. Hepatoprotector

Diferentes partes de la planta de carambola se utilizan para el tratamiento de diversas enfermedades y trastornos en la población de algunas comunidades. Nuevas investigaciones realizadas en ratones sugieren el efecto hepatoprotector y antioxidante de sus hojas. El extracto en acetona de las hojas muestra una alta eficacia hepatoprotectora y antioxidante en una forma dependiente de la dosis. Aún es necesario documentar el mecanismo hepatoprotector y los componentes activos presentes para el desarrollo de un nuevo fármaco contra el daño hepático (González y col., 2017).

c. Antimicrobiano

Linn y Lan (2012) evaluaron la actividad antimicrobiana y antioxidante de frutos tropicales como la carambola. Se analizaron las partes comestibles del fruto y se encontró diferentes compuestos fitoquímicos y fenólicos, flavonoides, alcaloides y glucósidos, en frutos maduros y verdes. Sin embargo, los frutos verdes mostraron patrones antimicrobianos diferentes en

comparación con los frutos maduros. Es interesante observar que los frutos maduros inhiben el crecimiento de *Salmonella*, pero permiten el crecimiento de especies de *Lactobacillus*.

d. Antihelmíntico

Shah y col. (2011) evaluaron el potencial antihelmíntico del extracto foliar de carambola al utilizar al gusano *Pheretima posthuma* como organismo de prueba. Se evaluaron diversas concentraciones del extracto en el bioensayo (10 a 100 mg/mL) y se evaluaron como variables de respuesta la determinación del tiempo de parálisis y el tiempo de muerte de los gusanos. Se incluyó albendazol como referencia estándar (10 a 100 mg/mL) y agua destilada como control. El resultado mostró que la carambola produjo parálisis, así como la muerte de los gusanos. La actividad antihelmíntica del extracto de hojas de carambola fue comparable a la del fármaco de referencia a una concentración de 100 mg/mL; el extracto de la planta produjo parálisis a los gusanos en 10 min y la muerte en 16 min, mientras que el albendazol mostró efectos similares a 10 y 21 min, respectivamente.

e. Efecto antihipertensivo

Se ha informado que la carambola puede reducir la presión arterial debido a su contenido de potasio, el cual actúa como diurético y contribuye a esta reducción. Wijaya y col. (2012) demostraron que la ingesta de 200 mL de jugo de carambola redujo la presión arterial en pacientes normotensos a los 30 min. Además, aunque se observaron cambios importantes en la presión arterial, las variaciones en la cantidad de jugo consumido no generaron diferencias en el efecto.

5. Hábitat

Originaria de Asia sur oriental, está distribuida en varios países tropicales de América, también las islas del Pacífico como: Hawái, Taiwán, Malasia, Filipinas y Tailandia. Entre los

países de América, Brasil es el mayor productor de carambola el cual se distribuye a lo largo de todo el país, en Perú se encuentra en áreas debajo de los 1200 m.s.n.m (metros sobre el nivel del mar), de la Costa de la Amazonía, donde se tiene clima cálido y húmedo, con una temperatura de 18 a 34 °C. Se encuentra clasificada como subtropical, ya que sus árboles maduros logran tolerar las temperaturas que están bajas como 2.8 °C en periodos de tiempos cortos con muy poco daño. Pero, las plantas que son más jóvenes son las que están más susceptibles a una helada y mueren a 0 °C (Gonzales y Palacios, 2003).

6. Composición química y nutrimental

Contiene compuestos norisoprenoides, que son los principales responsables del aroma en las plantas. Estos se generan a través de la fragmentación de carotenoides bajo la acción de la luz, que resulta en metabolitos con 9, 10, 11 y 13 átomos de carbono, se destaca especialmente los norisoprenoides C-13. También contiene alquenos, que son compuestos asociados al aroma de las hortalizas, además de otros componentes como vitaminas [A, B1 (tiamina), B2 (riboflavina), B5 (niacina) y C], ácidos (oxálico, cítrico, málico, succínico, fumárico y α -cetoglutarico), aminoácidos (asparagina, treonina, serina, ácido glutámico, prolina, glicina, alanina, valina, isoleucina, fenilalanina, ácido gamma-aminobutírico o GABA, ornitina e histidina), carotenos, betacarotenos, luteína (flavonoide), proteínas, carbohidratos y grasas (Gonzales y Palacios, 2003).

El fruto de carambola presenta contenido de saponinas, taninos, alcaloides y flavonoides. Además, se ha documentado la presencia de ácido gálico (0.96 %), ácido protocatecúico (0.05 %) y quercetina (0.40 %) (Verma y col., 2018). En el **Cuadro 2** se muestra la tabla nutrimental de la carambola.

Cuadro 2. Composición nutrimental de carambola.

Nutrimento	Contenido por 100 g
Calorías (kcal)	33.0
Carbohidratos (g)	7.83
Proteínas (g)	0.54
Grasas (g)	0.34
Fibra (g)	2.70
Vitamina C (mg)	21.2
Vitamina B1 o tiamina (mg)	0.03
Vitamina B2 o riboflavina (mg)	0.03
Vitamina B3 o niacina (mg)	0.41
Vitamina B6 piridoxina (mg)	0.10
Folatos (mg)	14.0
Vitamina A (UI)	493
Vitamina E (UI)	0.37
Calcio (mg)	4.00
Magnesio (mg)	9.00
Fósforo (mg)	16.0
Sodio (mg)	2.00
Potasio (mg)	163
Hierro (mg)	0.26
Zinc (mg)	0.11
Cobre (mg)	0.12
Selenio (mg)	0.60
Agua (g)	90.9

Fuente: Modificado de Muthu y col., 2016.

7. Fitotoxicidad

Recientemente, se ha informado sobre un aumento en los efectos tóxicos debido al consumo de carambola. Los efectos adversos más comunes tras ingerir este fruto son la nefrotoxicidad y neurotoxicidad. Entre los síntomas neurotóxicos reportados en casos de intoxicación humana por carambola se incluyen el hipo persistente, parestesia, confusión mental, alteraciones en el estado de consciencia, convulsiones y coma (Chang y col., 2000; Yap y col., 2002; Tse y col., 2003; Herbland y col., 2009; Wijayaratne y col., 2018). Se ha reportado intoxicación aguda con manifestaciones neurológicas similares a un accidente cerebrovascular. Los casos de neurotoxicidad fueron poco frecuentes entre los pacientes que presentaban una función renal normal (Abeysekera y col., 2015; Barman y col., 2016; Samad y col., 2017).

La carambola contiene ácido oxálico y caramboxina. Se piensa que la nefrotoxicidad es provocada por el oxalato, que está presente en grandes cantidades en este fruto (Chen y col., 2001). Originalmente, se pensaba que los efectos neurotóxicos observados en pacientes con insuficiencia renal preexistente se debían a la acumulación de oxalato debido a una excreción renal deficiente (Chen y col., 2001). Sin embargo, investigaciones recientes han identificado un nuevo compuesto llamado caramboxina (**Figura 3**), la cual también desempeña un papel en la neurotoxicidad. La caramboxina es un análogo de aminoácido no proteinogénico. Su estructura es similar a la de la fenilalanina y se metaboliza y excreta por vía renal. Posee propiedades neuroexcitadoras y activa los receptores NMDA y AMPA/kainato (García-Cairasco y col., 2013). Los receptores AMPA-R y KAR (receptores de kainato) son receptores ionotrópicos transmembrana de glutamato (es decir, receptores no NMDA) que se encuentran en el sistema nervioso central.

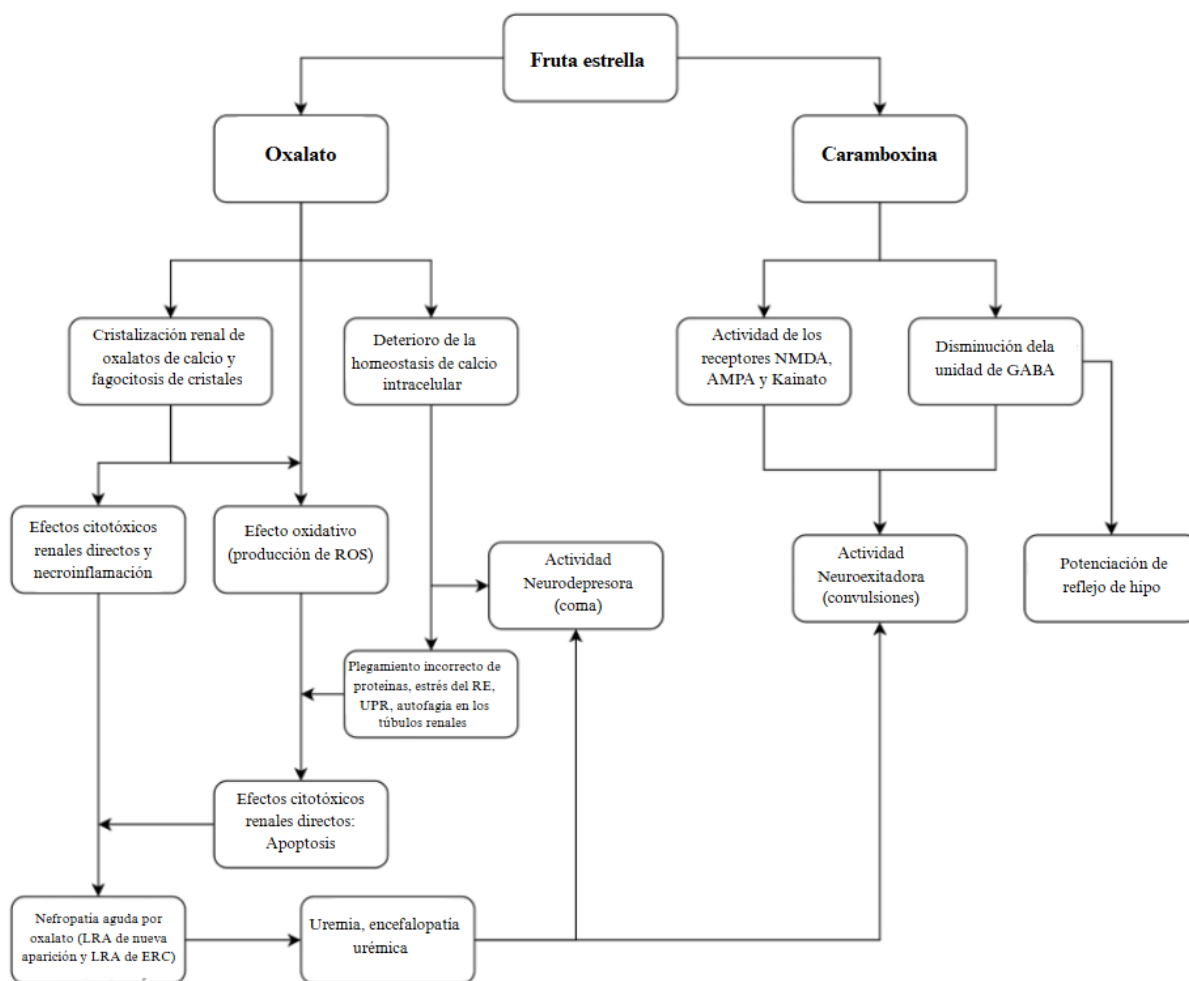


Figura 3. Esquema de los mecanismos potenciales de la nefrotoxicidad y neurotoxicidad de carambola en humanos. Tomada de Yasawardene y col. (2020).

*NMDA: N-methyl-D-aspartato, AMPA: ácido α -amino-3-hidroxi-5-metil-4-isoxazolepropiónico, GABA: ácido γ -aminobutírico, ROS: especies reactivas de oxígeno, ER: retículo endoplásmico, UPR: respuesta de proteínas desplegadas, AKI: lesión renal aguda, CKD: enfermedad renal crónica (Yasawardene y col., 2020).

Las convulsiones se producen debido a un desequilibrio entre las actividades excitatorias e inhibitorias del cerebro. El glutamato es el principal neurotransmisor excitatorio y el GABA el principal inhibidor en el cerebro (Yasawardene y col., 2020). Por lo tanto, el aumento de la actividad excitatoria en las neuronas glutamatérgicas o la disminución de la actividad inhibidora GABAérgica en el cerebro pueden provocar convulsiones. Los pacientes con enfermedad renal crónica (estadios 3 a 5) son más susceptibles a la intoxicación, se presenta inicialmente hipo, que puede progresar a trastornos de la conciencia como confusión mental, coma, convulsiones y muerte. Esta mayor susceptibilidad se produce porque en los nefropáticos la caramboxina no se excreta adecuadamente, lo que da lugar a niveles séricos elevados, esto le permite atravesar la barrera hematoencefálica y en consecuencia actuar sobre el sistema nervioso central. Esta neurotoxina inhibe el sistema GABAérgico, presenta por tanto un poder excitatorio, convulsivo y neurodegenerativo. En individuos sin nefropatías, la caramboxina se absorbe, distribuye y excreta por vía renal, pero el consumo de carambola debe realizarse con precaución ya que el consumo diario de 300 mL de jugo puro de carambola en pacientes sanos puede provocar nefropatías debido al alto contenido de ácido oxálico, que puede producir insuficiencia renal aguda y cálculos renales (Medeiros y Silva, 2018).

La estimulación excesiva de los receptores NMDA y AMPA puede provocar neurodegeneración debido a una sobrecarga de calcio dentro de las células. Dado que la caramboxina posee una fuerte actividad excitatoria, es posible que sus efectos neurodegenerativos se deban a este mecanismo. En condiciones normales, el sistema nervioso central mantiene un equilibrio entre excitación e inhibición. Sin embargo, un desplazamiento hacia un estado de hiperexcitabilidad inducido por la caramboxina en las carambolas podría explicar síntomas como confusión

mental, convulsiones y estado epiléptico tras la intoxicación. Además, el hipo intratable, un hallazgo frecuente en estos casos, podría estar relacionado con la inhibición de la unión del GABA. Este neurotransmisor desempeña un papel clave en el reflejo del hipo, actúa como inhibidor a nivel del mesencéfalo. Así, el efecto inhibidor de la caramboxina sobre la unión del GABA en el centro del hipo podría intensificar este reflejo, causa hipo persistente (Yasawardene y col., 2020).

8. Oxalatos

a. Contenido en carambola

El contenido de oxalato de la carambola difiere entre las variedades dulces y ácidas de *Averrhoa carambola* L., con hasta 7 mg/g en la variedad ácida y de 0.4 a 0.8 mg/g en la variedad dulce (Ferrara, 2018). La concentración de oxalato medida del jugo de carambola ácida fresca en varios estudios osciló entre 2.46 g/dL y 8.20 g/dL (Chen y col., 2001).

b. Contenido en otros frutos

Existe una gran variedad de frutos que contienen ácido oxálico, la mayoría de consumo diario en algunas regiones. Sin embargo, las concentraciones de oxalatos no son necesariamente altas o la ración de estos alimentos es pequeña. Destaca como el alimento con mayor contenido la espinaca, la cual podría representar en algunos lugares una importante fuente de alimento, por lo que su consumo frecuente podría llegar a generar problemas de salud a largo plazo. En el **Cuadro 3** se muestran los alimentos con mayor contenido de oxalatos.

c. Biosíntesis y degradación de oxalatos

Se ha planteado que la biosíntesis del oxalato en las plantas puede originarse a partir de tres precursores principales: glioxilato/glicolato, oxalacetato y ácido ascórbico (**Figura 4A**).

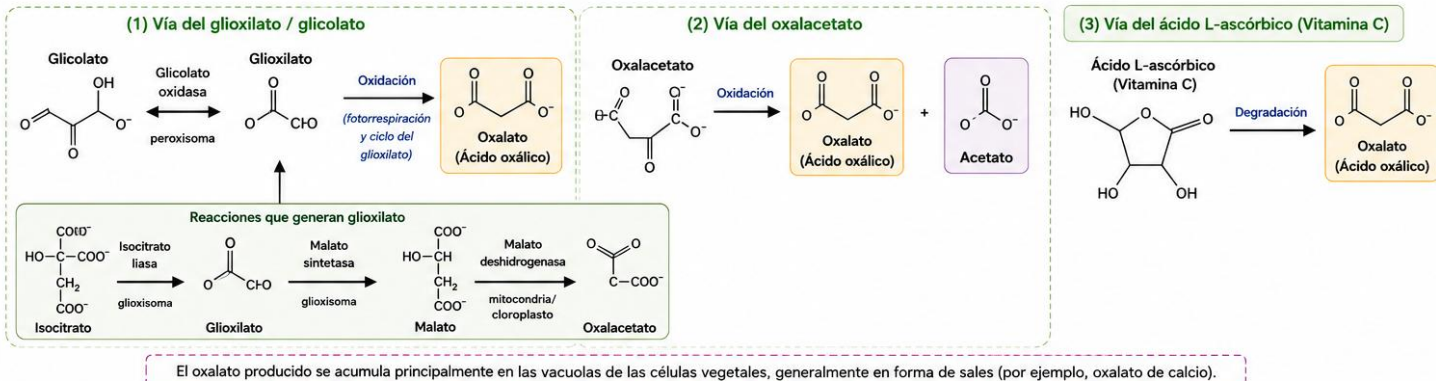
Cuadro 3. Alimentos con mayor contenido de oxalatos.

Alimento	mg oxalato/100 g de alimento	g alimento/ración estándar	mg oxalato/ración
Espinaca	780	200	1.56
Remolacha	675	100	675
Café en polvo	650	10.0	65.0
Acelga	645	200	1.29
Cacao en polvo	600	10.0	60.0
Germen de trigo	270	10.0	27.0
Nuez	200	20.0	40.0
Cacahuete	187	20.0	37.0
Chocolate	120	25.0	30.0
Perejil	100	5.00	5.00
Puerro	90.0	75.0	67.5
Limón	85.0	145	123
Té infusión	75.0	150	112
Berza	74.0	200	148
Apio	20.0	75.0	15.0
Judías verdes	20.0	200	40.0
Patatas	20.0	200	40.0
Pimiento verde	20.0	60.0	12.0
Frambuesa	15.0	100	1.50
Lechuga	15.0	100	1.50
Fresa	10.0	100	1.00

Fuente: Mataix-Verdú, 2011.

A. BIOSÍNTESIS DEL ÁCIDO OXÁLICO EN PLANTAS

Se han propuesto tres precursores principales para la biosíntesis del ácido oxálico en las plantas.



B. DEGRADACIÓN DEL ÁCIDO OXÁLICO EN PLANTAS

El ácido oxálico puede degradarse mediante la acción de varias enzimas que lo convierten en compuestos más simples.

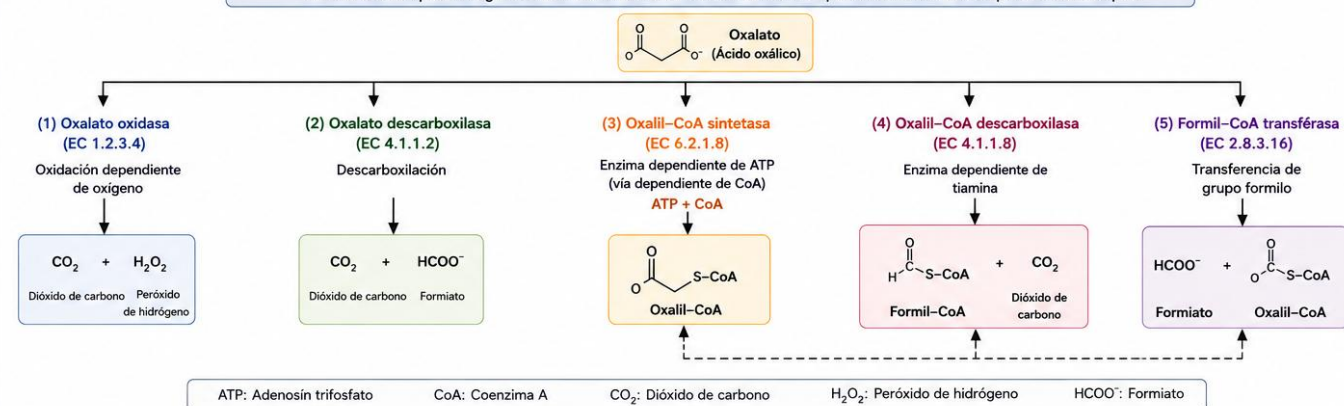


Figura 4. Representación esquemática de la biosíntesis y degradación del ácido oxálico

(A) El ácido oxálico se puede formar a través de tres precursores principales, a saber, glioxilato/ glicolato, oxalacetato y ascorbato. (B) La degradación del ácido oxálico tiene lugar mediante: Oxalato oxidasa, Oxalato descarboxilasa, Oxalil-CoA descarboxilasa/Formil-CoA transferasa (Kumar V. y col 2019).

Durante la fotorrespiración y el ciclo del glioxilato, la oxidación del sistema glioxilato/glicolato favorece la formación y acumulación de oxalato (Libert y Franceschi, 1987). Asimismo, la oxidación del oxalacetato constituye otra ruta metabólica capaz de producir oxalato junto con acetato. En numerosas especies vegetales, el ácido L-ascórbico también representa una fuente importante para la síntesis de este compuesto. La degradación del oxalato ocurre mediante la acción de diversas enzimas, entre las que destacan la oxalato oxidasa, la oxalato descarboxilasa, la oxalil-CoA sintetasa (también denominada oxalato-CoA ligasa) y el sistema conformado por la oxalil-CoA descarboxilasa y la formil-CoA transferasa. Aunque aún existe controversia acerca de cuál es la principal vía biosintética del oxalato en las plantas, la evidencia disponible indica que su catabolismo depende principalmente de la actividad de la oxalato oxidasa y de la oxalil-CoA sintetasa (Kumar V. y col 2019).

La oxalato oxidasa, perteneciente al grupo de las oxidorreductasas, cataliza la oxidación del oxalato en presencia de oxígeno, genera dióxido de carbono y peróxido de hidrógeno (**Figura 4B**). Por su parte, la oxalato descarboxilasa transforma el ácido oxálico en dióxido de carbono y formiato. La oxalil-CoA sintetasa es una enzima dependiente de ATP que participa en la vía de degradación del oxalato mediada por CoA, produce oxalil-CoA como intermediario. Posteriormente, la oxalil-CoA descarboxilasa, dependiente de tiamina, convierte el oxalil-CoA en formil-CoA y dióxido de carbono. Finalmente, la formil-CoA transferasa, a diferencia de la enzima anterior, cataliza la reacción entre oxalato y formil-CoA para generar formiato y regenerar oxalil-CoA (**Figura 4B**) (Kumar V. 2019).

9. Ácido ascórbico

La vitamina C o ácido ascórbico es un importante micronutriente en la alimentación humana, asociado a la producción de colágeno, fijación del hierro, metabolismo de la tirosina,

conversión del ácido fólico a ácido folínico, el metabolismo de los hidratos de carbono, síntesis de lípidos y proteínas. También se han demostrado los efectos benéficos de este antioxidante al reducir el riesgo de enfermedades pulmonares, cardiovasculares y cánceres no hormonales (Ordóñez-Santos y col 2013).

Durante el procesamiento de las frutas y hortalizas, este importante compuesto bioactivo se altera fácilmente por la acción de la temperatura, la luz, los cambios de pH y los iones metálicos. Además, es la vitamina que se pierde con mayor facilidad durante la elaboración, almacenamiento y cocción de los alimentos (Robertson & Samaniego, 1986).

10. Capacidad antioxidante

Los antioxidantes son compuestos capaces de prevenir o retrasar los procesos de oxidación, tanto naturales como inducidos, que pueden ser promovidos por factores como la exposición a la luz, el oxígeno o la presencia de metales de transición, entre ellos hierro, cobre, cobalto y manganeso (Madrid y Madrid, 2001). En los organismos vivos, los radicales libres se generan de manera continua como parte del metabolismo celular y participan en diversas funciones fisiológicas; sin embargo, cuando su producción supera la capacidad de los sistemas antioxidantes para neutralizarlos, se produce un desequilibrio conocido como estrés oxidativo (Charley, 2001).

Los ácidos grasos presentes en las membranas celulares son particularmente susceptibles al ataque de los radicales libres, lo que favorece procesos de peroxidación lipídica tanto de origen enzimático como no enzimático. Este fenómeno altera la integridad estructural y funcional de las membranas celulares, además de generar compuestos altamente reactivos, como aldehídos insaturados e hidroperóxidos lipídicos. Dichos productos pueden afectar el funcionamiento de

enzimas, modificar biomoléculas e inducir alteraciones en proteínas y otros lípidos, lo que contribuye al deterioro celular (Arapa y Cahuana, 2017).

a. Compuestos fenólicos

Los compuestos fenólicos constituyen un grupo de sustancias orgánicas ampliamente distribuidas en las plantas, donde se producen como metabolitos secundarios que participan en mecanismos de defensa frente a factores bióticos y abióticos. Además de su función protectora, estos compuestos contribuyen de manera importante a las características sensoriales de frutas y hortalizas, ya que influyen en atributos como el color, el aroma, el sabor y la astringencia. Debido a su estructura química, caracterizada por la presencia de grupos hidroxilo unidos a uno o más anillos aromáticos, poseen una elevada capacidad para neutralizar radicales libres y actuar como antioxidantes (Kuskoski y col., 2005).

El término polifenoles engloba una amplia variedad de compuestos con diferentes estructuras y funciones biológicas. Entre los principales grupos se encuentran los flavonoides, isoflavonoides, antocianidinas, antraquinonas, xantonas, ácidos fenólicos, ácidos hidroxycinámicos, fenilpropenos, ligninas y taninos, los cuales pueden presentarse tanto en forma de monómeros como de estructuras poliméricas (Calderón, 2011).

11. Polifenol oxidasa (PPO)

La polifenol oxidasa (PPO; EC 1.14.18.1) es una metaloenzima dependiente de cobre ampliamente distribuida en frutas, hortalizas y otros tejidos vegetales. Esta enzima desempeña un papel importante en los mecanismos de defensa de las plantas y es la principal responsable del pardeamiento enzimático que ocurre durante la cosecha, el almacenamiento y el procesamiento de productos vegetales (Queiroz y col., 2008; Zhang, 2023).

En los tejidos vegetales intactos, la PPO se encuentra localizada principalmente en los cloroplastos, mientras que sus sustratos fenólicos se almacenan en las vacuolas, lo que impide que ambos entren en contacto. Sin embargo, cuando el tejido sufre daños mecánicos ocasionados por operaciones como el corte, pelado, rebanado o trituración, se pierde la integridad de las membranas celulares, lo que permite el contacto entre la enzima, los compuestos fenólicos y el oxígeno atmosférico, condición necesaria para que ocurra la reacción enzimática (Zhang, 2023).

a. Mecanismo de acción de la PPO

La PPO presenta dos actividades catalíticas principales: actividad monofenolasa, mediante la cual hidroxila monofenoles para formar *o*-difenoles, y actividad difenolasa o catecol oxidasa, que cataliza la oxidación de los *o*-difenoles a *o*-quinonas al utilizar oxígeno molecular como agente oxidante (Queiroz y col., 2008). Las *o*-quinonas producidas son compuestos altamente reactivos que experimentan reacciones no enzimáticas de condensación y polimerización con otros compuestos fenólicos, aminoácidos y proteínas, lo que da lugar a la formación de melaninas, pigmentos de color marrón responsables del pardeamiento enzimático de frutas y hortalizas (Queiroz y col., 2008; Gandhi y col., 2018). Este mecanismo se puede observar en la **Figura 5**.

El pardeamiento enzimático ocasionado por la actividad de la PPO no solo afecta el color del producto, sino que también puede modificar el aroma, el sabor, la textura y el valor nutricional, debido a la oxidación de compuestos fenólicos con actividad antioxidante. Como consecuencia, se reduce la aceptación del consumidor y el valor comercial de los productos hortofrutícolas (Queiroz y col., 2008; Zhang, 2023). Por esta razón, durante el procesamiento de frutas como la carambola se emplean tratamientos de conservación, entre ellos el escaldado,

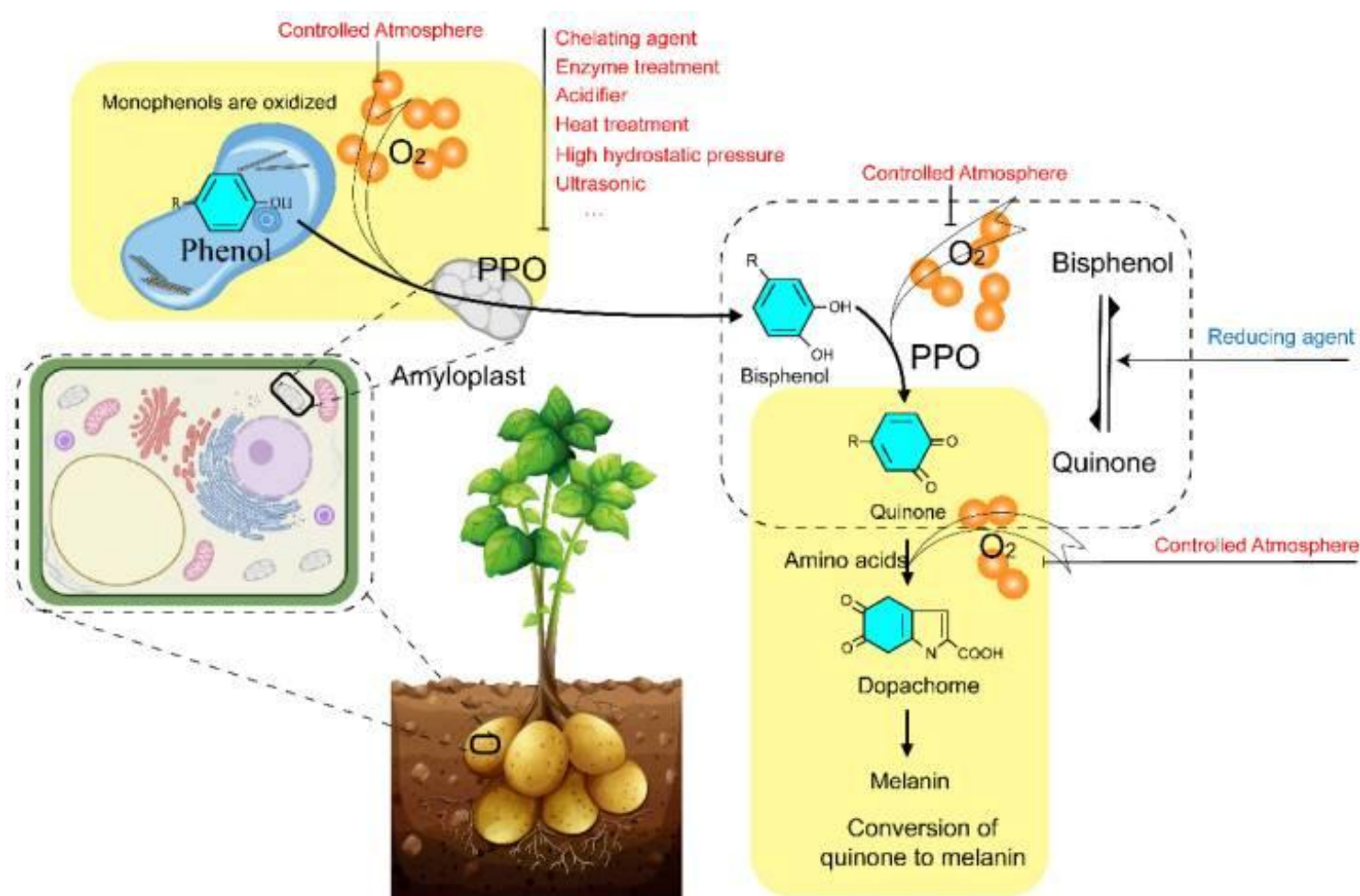


Figura 5. Mecanismo de acción de PPO en papa.

La PPO en los tubérculos de papa se localiza en los amiloplastos, y los fenoles se encuentran en las vesículas. En presencia de oxígeno, la PPO activada oxida los monofenoles a bisfenoles, que a su vez se oxidan a quinonas. Posteriormente, las quinonas se convierten en dopacromo en presencia de aminoácidos y oxígeno, y luego en melanina. Por otro lado, el calor, las enzimas y los tratamientos químicos pueden disminuir la actividad biológica de la PPO e inhibir el pardeamiento enzimático (Zhang S. 2023).

cuya finalidad es inactivar la actividad de la polifenol oxidasa y disminuir el desarrollo del pardeamiento enzimático, esto contribuye a preservar la calidad sensorial y funcional del producto.

B. PROCESAMIENTO DE LA CARAMBOLA

Mantener la calidad y la vida útil de frutas y hortalizas perecederas es un desafío importante que enfrenta la industria alimentaria. Los principales parámetros de calidad para los frutos de carambola son el color y sabor. Sin embargo, existen diferencias entre las cualidades de los diferentes alimentos procesados en relación con los métodos de procesamiento empleados para obtener los respectivos productos. Diferentes temperaturas, materiales de empaque y tiempo de almacenamiento pueden afectar el contenido de oxalatos y la estabilidad de los compuestos antioxidantes, el ácido ascórbico, carotenoides totales y los compuestos fenólicos totales del fruto. Los diferentes métodos de procesamiento comúnmente aplicados en el procesamiento de carambola incluyen tratamientos físicos (escaldado, cocción, secado, pasteurización, concentración por evaporación y liofilización), tratamiento biológico (fermentación) y tratamiento químico (osmodeshidratación). Los métodos de procesamiento, como los métodos físicos, biológicos y químicos, pueden alterar la calidad del fruto (Pande R. y col 2025).

C. ESCALDADO

El escaldado ordinario es una operación unitaria en el procesamiento de frutas y hortalizas que consiste básicamente en la inmersión del producto en agua a temperatura cercana a la de ebullición, durante un tiempo breve, con el fin de inactivar enzimas indeseables (Andersson y col., 1994). En un escaldado convencional, los productos se sumergen en agua caliente (70 a 100 °C) durante varios min. Luego, las muestras escaldadas se drenan y se enfrían antes de enviarlas a la siguiente operación de procesamiento.

1. Escaldado en agua

El escaldado con agua caliente es el método más empleado a nivel comercial debido a su simplicidad en la implementación y operación. Sin embargo, cuando se prolonga en el tiempo, puede provocar una pérdida de nutrimentos como carbohidratos, proteínas, minerales solubles en agua, vitaminas y azúcares.

2. Escaldado por vapor

De acuerdo con Xiao y col. (2017), el vapor sobrecalentado es un medio de calentamiento ampliamente utilizado en el escaldado debido a su alta entalpía. En la fase inicial del proceso, el vapor se condensa sobre la superficie del producto, se transfiere una gran cantidad de calor latente al material, ya que su temperatura es menor que la del vapor. A medida que avanza el tratamiento, la temperatura del alimento aumenta progresivamente hasta alcanzar el umbral crítico en el que las enzimas o los microorganismos pierden su actividad y quedan inactivados.

a. Escaldado por pulsos de vapor al vacío

Actualmente, algunos investigadores trabajan en la optimización del escaldado por vapor mediante un proceso denominado "Escaldado por pulsos de vapor al vacío" (VSPB, por sus siglas en inglés). Esta técnica implica la eliminación inicial del aire frío presente en el material al utilizar una bomba de vacío, lo que mejora la transferencia de calor dentro y alrededor del alimento. Como resultado, el vapor de alta temperatura penetra eficientemente, lo que permite un rápido incremento térmico y la inactivación enzimática en menor tiempo (Wang y col., 2022). Se ha demostrado que esta tecnología, aplicada en productos como el jengibre, logra la inactivación total de la enzima peroxidasa tras cuatro ciclos de tratamiento con VSPB, además de preservar sus compuestos bioactivos.

3. Escaldado asistido por microondas

Respecto al escaldado asistido por microondas, éstas son ondas electromagnéticas con una frecuencia que varía de 300 MHz a 300 GHz (Regier y col., 2017). Los sistemas están generalmente restringidos a ciertas frecuencias, dentro de la llamada banda industrial, científica y médica (ICM), y por ciertos niveles máximos de emisión y límites de exposición para humanos.

4. Efecto del escalado en la vitamina C

La disminución del contenido de vitamina C durante el escaldado se atribuye principalmente a la elevada sensibilidad del ácido ascórbico al calor y al oxígeno, factores que aceleran su degradación durante el procesamiento de frutas y hortalizas. Inicialmente, el ácido ascórbico se oxida de forma reversible a ácido deshidroascórbico (DHAA); posteriormente, este compuesto se hidroliza de manera irreversible para formar ácido 2,3-dicetogulónico, el cual carece de actividad biológica como vitamina C (Giannakourou y Taoukis, 2021). Además, debido a que la vitamina C es un compuesto hidrosoluble, una fracción puede difundirse desde los tejidos vegetales hacia el agua de escaldado, lo que ocasiona pérdidas por lixiviación. La magnitud de estas pérdidas depende de factores como la temperatura, el tiempo de tratamiento, la disponibilidad de oxígeno, el pH, la presencia de iones metálicos y el medio de procesamiento, dicha pérdida es generalmente mayor en los tratamientos térmicos convencionales realizados en agua. (Giannakourou y Taoukis, 2021).

5. Efecto del escaldado en capacidad antioxidante

La capacidad antioxidante de frutas y hortalizas puede verse modificada durante el escaldado debido a los cambios físicos y químicos que induce el tratamiento térmico. En general, la disminución de esta propiedad se relaciona con la degradación de compuestos antioxidantes

termolábiles, como el ácido ascórbico, así como con la oxidación y la lixiviación de compuestos fenólicos hidrosolubles hacia el agua de escaldado (Ismail y col., 2004). La magnitud de estas pérdidas está influenciada por diversos factores, entre ellos la temperatura, el tiempo de tratamiento y el medio de escaldado empleado (Jaiswal y col., 2012). Sin embargo, en algunos productos vegetales el calentamiento puede favorecer la ruptura de las paredes celulares, lo que incrementa la liberación y extracción de ciertos compuestos fenólicos previamente unidos a la matriz celular, lo que puede mantener o incluso aumentar la capacidad antioxidante (Ismail y col., 2004; Murador y col., 2018). Por tanto, el efecto del escaldado sobre la capacidad antioxidante depende del equilibrio entre la degradación de los compuestos bioactivos y el incremento en su disponibilidad para ser extraídos y cuantificados (Murador y col., 2018).

6. Efecto del escaldado en el contenido de oxalatos

La disminución del contenido de oxalatos durante el escaldado se atribuye principalmente a la elevada solubilidad en agua de los oxalatos solubles, especialmente aquellos presentes como sales de sodio y potasio. Durante el tratamiento térmico, el calor incrementa la permeabilidad y provoca la ruptura parcial de las membranas celulares, esto facilita la difusión de estos compuestos desde los tejidos vegetales hacia el agua de escaldado mediante un proceso de lixiviación (Noonan y Savage, 2022). La magnitud de esta reducción depende de factores como la temperatura, el tiempo de tratamiento, la relación agua/producto y el tamaño de las piezas procesadas, ya que estas variables determinan la velocidad de transferencia de masa entre el tejido vegetal y el medio líquido (Noonan y Savage, 2022). En contraste, los oxalatos insolubles, principalmente aquellos asociados al calcio presentan una menor disminución debido a su baja solubilidad y limitada movilidad durante el procesamiento térmico (Petroski y Minich, 2024).

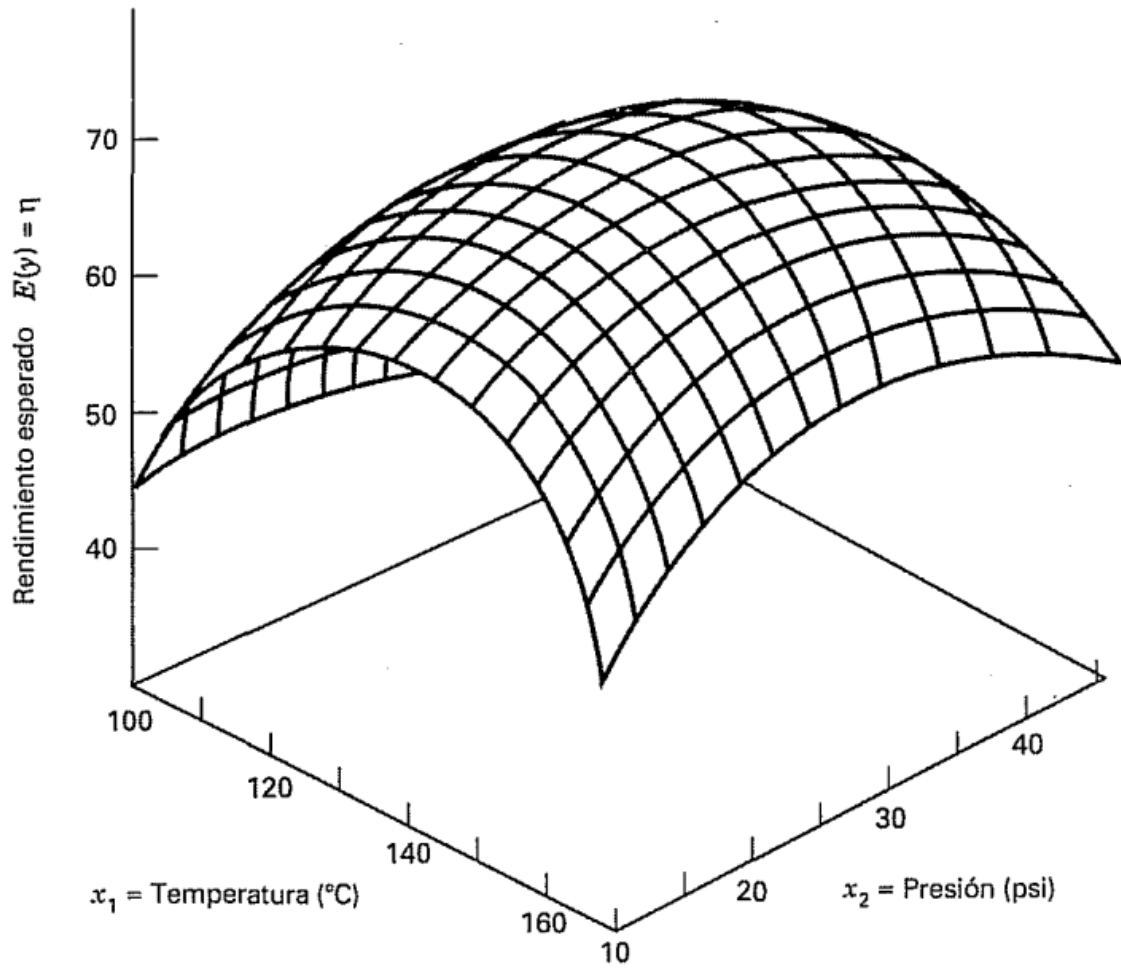


Figura 6. Gráfico de superficie de respuesta.

Superficie de respuesta tridimensional donde se indica el rendimiento esperado (η) como una función de la temperatura (x_1) y la presión (x_2) (Montgomery, 2012).

D. OPTIMIZACIÓN

La Metodología de Superficie de Respuesta (MSR), es una colección de técnicas matemáticas y estadísticas útiles en el modelado y el análisis de problemas en los que una respuesta de interés recibe la influencia de diversas variables y donde el objetivo es optimizar dicha respuesta (Montgomery, 2012).

Por lo general, la superficie de respuesta se representa gráficamente (**Figura 6**) donde “ η ” se grafica contra los niveles de x_1 y x_2 . Para ayudar a visualizar la forma de una superficie de respuesta, con frecuencia se grafican los contornos de la superficie de respuesta. En el gráfico de contorno se trazan las líneas de respuesta constante en el plano x_1 x_2 . Cada contorno corresponde a una altura particular de la superficie de respuesta. En la mayoría de los problemas de MSR, la forma de la relación entre la respuesta y las variables independientes es desconocida. Por lo tanto, el primer paso de la MSR es encontrar una aproximación adecuada de la verdadera relación funcional entre y y el conjunto de variables independientes. Por lo general se emplea un polinomio de orden bajo en alguna región de las variables independientes (Montgomery, 2012). Si la respuesta está bien modelada por una función lineal de las variables independientes, entonces la función de aproximación es el modelo de primer grado:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (1)$$

Si hay curvatura en el sistema, entonces debe usarse un polinomio de grado superior, tal como el modelo de segundo orden:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

E. TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor es la ciencia que determina la rapidez de la transferencia de energía que pasa de un sistema a otro como resultado de una diferencia de temperatura. La transferencia de energía siempre se produce del medio que tiene la temperatura más elevada hacia el de temperatura más baja y esa transferencia se detiene cuando ambos alcanzan la misma temperatura (Cengel, 2007).

En cualquier proceso que implique el calentamiento de alimentos, es posible elaborar un gráfico que represente la temperatura en un punto específico del alimento a lo largo del tiempo, siempre que las condiciones del proceso se mantengan constantes y se realicen mediciones periódicas de la temperatura. Este tipo de gráfico, conocido como historia de temperatura, permite analizar cómo varían las características de calidad del alimento durante el tratamiento térmico aplicado (Iribe-Salazar y col., 2015).

1. Conducción

La conducción es el proceso mediante el cual la energía se transfiere desde las partículas con mayor energía hacia las partículas vecinas con menor energía, debido a las interacciones entre ellas. Este fenómeno puede ocurrir en sólidos, líquidos y gases (Çengel, 2007). Actualmente, este mecanismo de transferencia se describe a través de la ley de conducción de calor de Fourier, cuya expresión unidimensional es:

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

donde q_x es la velocidad de transferencia de calor en la dirección x (W), $-dT/dx$ es el gradiente de temperatura en la dirección x (K m⁻¹), y k es la conductividad térmica (W m⁻¹ K⁻¹).

2. Convección

La convección es el proceso mediante el cual se transfiere energía térmica entre una superficie sólida y un fluido en movimiento (ya sea líquido o gas) que la rodea. Este mecanismo involucra tanto la conducción de calor como el desplazamiento del fluido. A mayor velocidad de flujo del fluido, más eficiente será la transferencia de calor por convección (Çengel, 2007). La ecuación que rige la transferencia de calor por convección se conoce como ley de enfriamiento o calentamiento de Newton (Cengel, 2007).

$$\dot{q} = h (T_s - T_\infty) \quad (4)$$

donde $\dot{q}$ es la densidad de flujo de calor por convección o flux (W m^{-2}), T_s es la temperatura de la superficie, T_∞ la temperatura del fluido (K) y h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$).

3. Radiación

La radiación es un mecanismo de transferencia de energía que ocurre a través del espacio en forma de ondas electromagnéticas. Este proceso obedece a las mismas leyes que regulan el comportamiento de la luz. La radiación adquiere mayor importancia cuando se trata de la transferencia de calor en medios gaseosos o en el vacío, ya que los sólidos y líquidos suelen absorber la energía radiante que los atraviesa (Geankoplis y col., 2018). La radiación se distingue de la conducción y la convección por el hecho de que no requiere un medio físico para la transferencia.

F. PROPIEDADES TERMOFÍSICAS

1. Conductividad térmica (k)

La conductividad térmica se define como la rapidez con que se transfiere una cantidad de calor a través de un material de espesor unitario y por cada unidad de diferencia de temperatura. Esta propiedad indica qué tan bien puede conducir el calor un material. Si la conductividad térmica es alta, el material actúa como un buen conductor; si es baja, funciona como un mal conductor o aislante (Çengel, 2007). En el caso de los alimentos, esta propiedad se ve influenciada por tres aspectos principales: su composición, su estructura y las condiciones de procesamiento. El contenido de agua es especialmente relevante, debido a la alta conductividad térmica del agua en comparación con otros componentes. En cuanto a la estructura, factores como el número y tamaño de los poros, así como la forma, distribución y organización de las distintas fases del alimento, también afectan la conductividad. Finalmente, las condiciones de procesamiento como la temperatura, la presión y el tipo de mecanismo de transferencia de calor, influyen en este comportamiento térmico (Sablani y Rahman, 2003).

2. Difusividad térmica (α)

La difusividad térmica de un material puede entenderse como la relación entre el calor que se transmite a través de él y la cantidad de calor que puede almacenar por unidad de volumen. Un material con alta conductividad térmica o con baja capacidad calorífica presentará una difusividad térmica elevada. Cuanto mayor sea esta propiedad, más rápidamente se distribuirá el calor dentro del material. (Cengel, 2007). Se define por medio de la ecuación:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (5)$$

α = difusividad térmica ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

k = conductividad térmica ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)

ρ = densidad (kg m^{-3})

C_p = capacidad calorífica específica ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)

3. Densidad (ρ)

La densidad de los alimentos sólidos puede determinarse al utilizar un método de desplazamiento, ya sea con aire o con un líquido (Mohsenin, 1986). Cuando se emplea un líquido, únicamente se requiere equipo básico de laboratorio. En este procedimiento, la muestra se sumerge completamente en agua, esto permite medir ya sea el volumen de líquido desplazado o el volumen ocupado por la muestra. Aunque el agua es el líquido más comúnmente utilizado, si el alimento es menos denso que el agua, se recomienda usar otros líquidos como el tolueno. Para evitar que el agua penetre en los poros del alimento, se puede recubrir la muestra con una fina capa de parafina líquida (Rapusas y Driscoll, 1995). En el caso de alimentos sólidos con porosidad, se distinguen dos tipos de densidad: densidad real y densidad aparente. La densidad real se calcula como la masa del alimento dividida por su volumen real, sin considerar los espacios porosos internos. En cambio, la densidad aparente incluye el volumen total del alimento, incluidos dichos poros.

4. Capacidad calorífica específica (C_p)

La capacidad calorífica específica indica la cantidad de energía térmica requerida para modificar la temperatura de cierta masa de material. Se representa comúnmente con el símbolo C_p , que corresponde a la capacidad calorífica a presión constante, condición que se aplica en la mayoría de los procesos de calentamiento y enfriamiento de alimentos. Al igual que la conductividad térmica, la C_p en los alimentos está fuertemente influenciada por su composición, especialmente por su contenido de agua. Entre los métodos disponibles para medir esta

propiedad, la calorimetría diferencial de barrido (DSC) es la técnica más utilizada, ya que permite evaluar cómo afecta la temperatura sobre una amplia gama térmica en una sola prueba (Cengel, 2007).

G. SIMULACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR

La simulación se basa en la creación de modelos computacionales que representan los aspectos fundamentales del funcionamiento de un sistema específico. Estos modelos se emplean para diseñar y ejecutar experimentos, con el propósito de obtener información que facilite la toma de decisiones. Generalmente, esta herramienta se aplica en el estudio de sistemas cuya complejidad impide analizarlos mediante métodos analíticos tradicionales o técnicas numéricas directas (Ríos y col., 2000).

1. Ventajas de la simulación

Una de las principales ventajas de los modelos de simulación es que permiten estudiar y analizar sistemas en situaciones donde la experimentación directa no es viable. Estos modelos facilitan el abordaje de problemas más complejos o con un mayor nivel de detalle, se generan resultados que, en muchos casos, son más precisos que los obtenidos mediante métodos analíticos. Además, una vez desarrollado el modelo, este puede ajustarse o modificarse con rapidez para evaluar diferentes escenarios. Asimismo, los métodos de simulación son más fáciles de comprender y visualizar en comparación con los enfoques analíticos tradicionales (Azarang y García, 1997).

2. Proceso de desarrollo de un modelo de simulación

Por lo general, el proceso de simulación comienza con una descripción detallada del sistema que se desea estudiar. Posteriormente, se lleva a cabo su análisis, la construcción del modelo

matemático o computacional y, finalmente, su validación. Esta última etapa tiene como propósito evaluar qué tan adecuadamente el modelo representa el comportamiento real del sistema, mediante la comparación estadística entre los resultados obtenidos por el modelo y los datos experimentales. Una vez validado, el modelo puede utilizarse para realizar experimentos virtuales que permitan analizar la respuesta del sistema ante variaciones en los factores de entrada, al emplear para ello técnicas de análisis de sensibilidad (Hillier y Lieberman, 1989).

3. Método de elemento finito

El análisis por elementos finitos es una técnica numérica utilizada para resolver problemas complejos mediante la subdivisión de una geometría en un conjunto de regiones más pequeñas y de forma sencilla, conocidas como elementos finitos. Estos elementos se encuentran interconectados por medio de nodos o aristas, los que forman una malla que permite representar el comportamiento del sistema completo. Desde el punto de vista matemático, este método se fundamenta en el principio de que una función continua o discontinua puede aproximarse mediante una combinación lineal de funciones polinomiales. Para ello, se definen funciones de interpolación en cada elemento, las cuales describen el comportamiento de las variables de interés dentro de la malla. Posteriormente, las ecuaciones obtenidas para cada elemento se ensamblan para construir un sistema global que permite determinar la solución del problema analizado (Iribe-Salazar y col., 2015).

IV. JUSTIFICACIÓN

El escaldado es un proceso térmico ampliamente utilizado en la industria alimentaria para mejorar la calidad de los productos vegetales, prolongar su vida útil y conservar sus propiedades sensoriales y nutrimentales. En el caso de la carambola (*Averrhoa carambola* L.), un fruto tropical de alto contenido nutrimental y funcional, la optimización del proceso de escaldado es fundamental para aumentar la vida útil del fruto, así como inactivar las enzimas que generan pardeamiento enzimático, al minimizar la degradación de compuestos bioactivos como la vitamina C. Los oxalatos son compuestos orgánicos presentes en muchos alimentos de origen vegetal, incluidos frutos como la carambola (*Averrhoa carambola* L.). Químicamente, son sales o ésteres del ácido oxálico y tienen relevancia tanto en la nutrición como en la salud humana debido a su capacidad para formar cristales insolubles con minerales como el calcio y el magnesio. En concentraciones elevadas, los oxalatos pueden estar asociados con la formación de cálculos renales en personas susceptibles. Se han reportado casos de toxicidad en personas con insuficiencia renal asociados al contenido de oxalatos, de igual manera se reporta daño neuronal asociado a la presencia de caramboxina en personas con daño renal previo. Aunque existen estudios de disminución de oxalatos en cocción, no existen estudios que integren simultáneamente optimización del escaldado, reducción de oxalatos, simulación de transferencia de calor y predicción de vitamina C en carambola. El presente estudio busca optimizar el proceso de escaldado de rebanadas de carambola con base en parámetros químico, nutrimental y funcional. A través de un análisis detallado del contenido de oxalatos, retención de vitamina C y capacidad antioxidante, se establecen condiciones óptimas de temperatura y tiempo para garantizar una mejor calidad del fruto y proporcionar seguridad al consumidor tras el tratamiento térmico.

V. OBJETIVOS

A. OBJETIVO GENERAL

Optimizar el proceso de escaldado en rebanadas de carambola (*Averrhoa carambola* L.) con base en parámetros químico (concentración de oxalatos), nutrimental (vitamina C) y funcional (capacidad antioxidante) y predecir la retención de vitamina C en las rebanadas de carambola escaldadas bajo condiciones óptimas con base en la simulación de la transferencia de calor.

B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar una caracterización fisicoquímica (color, firmeza, SST y pH), química (concentración de oxalatos), nutrimental (vitamina C), funcional (capacidad antioxidante) y enzimática (polifenol oxidasa) de carambola en fresco.
2. Llevar a cabo el proceso de escaldado en rebanadas de carambola a diferentes condiciones de temperatura (70 a 95 °C) y tiempo (2 a 15 min) y encontrar las condiciones óptimas con base en concentración de oxalatos, retención de vitamina C y capacidad antioxidante.
3. Contrastar los parámetros fisicoquímicos, químico, nutrimental, funcional y enzimático en rebanadas de carambola escaldadas optimizadas respecto al fruto en fresco.
4. Evaluar las propiedades termofísicas (conductividad térmica, difusividad térmica, densidad aparente y capacidad calorífica específica) de carambola en función de la temperatura y el coeficiente convectivo de transferencia de calor durante el escaldado.
5. Simular la transferencia de calor mediante el método de elemento finito y predecir la retención de vitamina C en rebanadas de carambola escaldadas bajo condiciones óptimas.

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

A. MATERIALES

1. Materia prima

Los frutos de carambola se obtuvieron en traspatio en Culiacán, Sinaloa, México. Se obtuvieron siempre de los mismos árboles, en el mismo estado de maduración y se tomó en cuenta tamaño, color y masa en la selección del fruto. Los frutos se transportaron al Laboratorio de Mediciones Termofísicas del Posgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos, se lavaron con agua y jabón, posteriormente se desinfectaron al sumergir el fruto en una solución de hipoclorito de sodio con una concentración de 0.60 mL/L por 3 min (Grajales y col., 2005). Las carambolas se almacenaron en refrigeración hasta su posterior utilización.

B. MÉTODOS

1. Escaldado

El proceso de escaldado se llevó a cabo mediante inmersión en agua caliente a una temperatura de 70 a 95 °C y tiempo de 2 a 15 min. Se utilizó un baño termostático Thermo Fisher/Precision (Modelo 9500, Fisher Scientific, EUA). Una vez escaldadas, las rebanadas de carambola se trasladaron a un baño de agua fría a temperatura de 3 a 6 °C con el fin de someterlos a choque térmico (Pinchao y col., 2016).

2. Diferencia total de color (ΔE)

Se utilizó un colorímetro triestímulo (Minolta, Chromameter CR-210, Japón) para medir la diferencia total de color, se siguió la metodología descrita por Xiao y col. (2017). Se evaluaron los parámetros de color L^* , a^* y b^* tanto en la superficie de la muestra fresca (control) como en las muestras sometidas a escaldado, se realizaron cinco mediciones por muestra. En cada

experimento se emplearon seis muestras. Para la calibración del equipo, se efectúan tres mediciones sobre una carta de color blanco, se registraron los parámetros preestablecidos de $Y = 93.5$, $x = 0.3139$ y $y = 0.3196$.

$$\Delta E = [(L^* - L_f^*)^2 + (a^* - a_f^*)^2 + (b^* - b_f^*)^2]^{1/2} \quad (6)$$

donde ΔE es la diferencia total de color en la muestra tratada, L_f^*, a_f^*, b_f^* son los parámetros de color para la muestra fresca, L^*, a^* y b^* son los parámetros de color para la muestra después del tratamiento.

3. Firmeza

La firmeza se determinó con el método descrito por García y col. (2017), con ciertas adaptaciones. La muestra se posiciona sobre la base de un penetrómetro (Chatillon Ametek, E-DFE 100, EUA), el cual se equipó con una punta plana de 11 mm de diámetro. La prueba se realizó con una profundidad de penetración de 2 mm y una velocidad constante de 50 mm/min. Para cada tratamiento se efectúan tres repeticiones, y los resultados se expresaron como la fuerza máxima de compresión necesaria para penetrar el tejido del fruto, en Newtons.

4. Solidos Solubles Totales (SST)

Se utiliza el método descrito por la AOAC en el 2018, este método consiste en colocar una gota del jugo del fruto en un refractómetro (300001, Sper Scientific) para obtener los grados brix ($^{\circ}\text{Bx}$).

5. pH

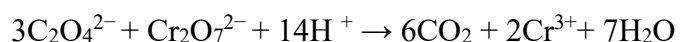
Se utilizó el método descrito por la AOAC 2018, se homogenizan 10 g de muestra en 50 mL de agua, posteriormente se afora hasta los 100 mL y se utiliza un potenciómetro (HI 2211, Hanna Instruments) para medir el pH de la muestra.

6. Determinación de oxalatos

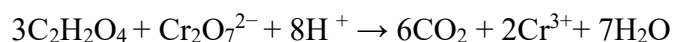
Se utilizó el método descrito por Kassie y col. (2019), para la extracción y determinación de oxalatos totales en alimentos por medio de espectrofotometría.

a. Fundamento

El método se basa en la reducción del dicromato de potasio ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) por medio del ácido oxálico ionizado ($\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$); en medios ácidos los oxalatos actúan como un agente reductor fuerte mientras que el dicromato de potasio actúa como un potente agente oxidante (Kassie y col., 2019). El fundamento del método es que el oxalato se oxida cuantitativamente a dióxido de carbono, mientras que el dicromato se reduce; esta es la reacción:



En caso de que el ácido oxálico no esté ionizado se sigue la siguiente reacción:



b. Solución blanco

La solución blanco se prepara en un matraz aforado al medir 0.5 mM $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ con 0.25 mM de MnCl_2 y se afora a 250 mL con H_2SO_4 al 0.01 M. Además, se requiere que la solución tenga un pH cercano a 3.

c. Curva de calibración de ácido oxálico

Se elabora una curva de calibración mediante una solución estándar de ácido oxálico a 10 mM. Se agregan 0.12607 g de ácido oxálico en 100 mL de ácido sulfúrico al 0.01 M, se elaboran diluciones conocidas (0.01, 0.05, 0.10, 0.25, 0.50, 1.00 y 2.00 mM) en ácido sulfúrico 0.01 M, se agrega 1 mL de cada dilución a 9 mL de solución blanco y se deja incubar a temperatura ambiente (25 °C) durante 60 min. Posteriormente, se mide en un espectrofotómetro a 350 nm.

d. Preparación de la muestra

Se parte de las rebanadas de fruta, ya sea fresca o escaldada, se cortan en trozos pequeños para llevarse a las cápsulas de porcelana previamente secadas, las muestras se secan a 105 °C por 24 h; se pulverizan en mortero y se guardan en desecadores para su posterior uso.

e. Extracción y medición de muestra

Se mide 1 gramo de muestra seca, se hierve en 150 mL de agua, a los cuales se le adicionan 27.5 mL de ácido clorhídrico (HCl) 6 M, se mantiene en reposo durante 30 min en un vaso de precipitado. Después de enfriar, la mezcla se afora a 250 mL con agua destilada, se filtra a través de papel Whatman no. 1, se evapora a un volumen de 10 mL en un rotavapor y, posteriormente, se disuelve el residuo en 10 mL de ácido sulfúrico (H₂SO₄) 0.01M.

Se realiza la medición al agregar 1 mL de la muestra, en 9 mL de solución blanco, se deja incubar durante 60 min. a temperatura ambiente (25 °C), en oscuridad, se mide en espectrofotómetro a 350 nm.

7. Vitamina C

Se evaluó la concentración de vitamina C en carambola fresca y escaldada al seguir la metodología descrita por Iribe-Salazar y col. (2015). Para ello, se elaboró una curva de

calibración mediante una solución estándar de ácido ascórbico C con concentraciones conocidas y 2,6-diclorofenolindofenol (DCPI). Ambos compuestos reaccionan, se genera un gráfico de absorbancia (L1-L2 frente a la concentración de vitamina C), el cual se utiliza para construir la curva de calibración.

Antes de analizar las muestras, se debe determinar la absorbancia total del DCPI (L1), para lo cual se mezcla 1 mL de ácido oxálico al 0.4 % p/v, 1 mL de acetato de sodio como solución buffer y 8 mL de DCPI. El extracto se obtiene al homogeneizar 0.5 g de muestra con 15 mL de ácido oxálico al 0.4 % p/v, mediante un homogeneizador durante 1 min y se filtra a través de una tela de organza de cuatro capas. La absorbancia se mide con un espectrofotómetro.

Según el método, el 2,6-diclorofenolindofenol se reduce en presencia de vitamina C, y las mediciones de absorbancia se registran a 520 nm. Para calibrar el espectrofotómetro en cero, se emplea una mezcla de 1 mL de muestra, 1 mL de solución buffer de acetato de sodio y 8 mL de agua desionizada. Posteriormente, se determina el DCPI residual (L2) al medir la absorbancia de la muestra con 1 mL de muestra, 1 mL de solución buffer de acetato de sodio y 8 mL de DCPI. La diferencia entre L1 y L2 refleja la reducción del DCPI por la vitamina C, y esta diferencia se inserta en la ecuación de la curva de calibración para calcular la concentración de vitamina C en la muestra (mg A.A./100 g f.f.).

8. Capacidad antioxidante

La capacidad antioxidante equivalente a Trolox (TEAC, por sus siglas en inglés Trolox Equivalent Antioxidant Capacity) se evaluó mediante el método ABTS [ácido 2,2'-azinobis-(3-etilbenzotiazolin-6-sulfónico)], se siguió el procedimiento reportado por Perales-Sánchez y col. (2014). Este ensayo se fundamenta en la habilidad de los compuestos antioxidantes con capacidad donadora de hidrógeno para neutralizar el radical catiónico ABTS⁺. Dicho radical se

obtiene a partir de la oxidación del ABTS con persulfato de potasio (2.45 mM), y la solución generada se conserva en oscuridad a 4 °C durante 16 horas antes de su uso.

a. Curva de calibración

Como estándar se empleó Trolox (ácido 6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcroman-2-carboxílico, 97 %) como antioxidante de referencia. Para el análisis, la solución de ABTS⁺ se diluye en buffer fosfato salino (PBS) a pH 7.4 hasta alcanzar una absorbancia de 0.70 ± 0.02 a 734 nm, y se estabiliza a 25 °C. Posteriormente, se mezclan 1980 µL de la solución diluida de ABTS⁺ con 20 µL de las muestras antioxidantes, soluciones estándar de Trolox (0–1200 µM) o PBS como blanco. Transcurridos 6 minutos desde la mezcla, se mide la absorbancia a 734 nm, se utilizó un espectrofotómetro UV-Vis (Genesys 10 UV-Vis, EUA). La actividad antioxidante de los extractos se expresa como µmol equivalentes de Trolox/ g de fruto fresco.

b. Extracción de compuestos fenólicos

La extracción de compuestos fenólicos libres en carambola se llevó a cabo de acuerdo con la metodología propuesta por Iribe-Salazar y col. (2018). Para ello, se prepararon extractos a partir de 1 g de muestra con 10 mL de etanol al 80 %, se empleó un agitador de velocidad constante (Ovan, NR50 E, EUA) durante 10 minutos. Posteriormente, la mezcla se centrifugó (Thermo Fisher Scientific, Lynx 4000, Alemania) a 5000×g durante 10 min a 10 °C, se recuperó el sobrenadante. El residuo sólido se sometió a nuevas extracciones mediante la adición de 10 mL de etanol, se repitió el proceso tres veces. Los extractos obtenidos se concentraron en un rotavapor bajo condiciones controladas (35 rpm y 45 °C). Antes de su análisis, se reconstituyeron con 2 mL de etanol al 96 %. Los extractos fenólicos libres resultantes se almacenaron a –10 °C hasta su posterior evaluación. Para la determinación de la actividad antioxidante, se empleó una dilución 1:3.

9. Polifenol oxidasa (PPO)

Los extractos enzimáticos se obtuvieron al homogeneizar 5 g de muestras de carambola, a los que se les agrega 5 mL de amortiguador de K_2HPO_4 (0.05 M) a un pH de 7.5 que contenga 0.25 g de polivinilpirrolidona (PVPP) y 0.0015 g de ácido etilendiaminotetraacético (EDTA), para después centrifugarse a $14,000\times g$ por 35 min a 4 °C, el sobrenadante es el extracto crudo de polifenol oxidasa. La actividad enzimática de la PPO se evaluó según lo reportado por Murillo y col. (2017), con un espectrofotómetro se midió la velocidad inicial de formación de quinona, por un aumento en la absorbancia a 420 nm (intervalos de 5 s durante 1 min), se usa catecol como sustrato. La reacción de ensayo debe contener 0.334 mL de catecol (0.2 M) en buffer de citrato de sodio (0.1 M, pH = 4.0), 0.067 mL de extracto enzimático y 0.6 mL de buffer de fosfato de potasio (0.05 M, pH = 7.0). La actividad volumétrica se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$a_v = \frac{\left(\frac{\Delta A}{t} \right) V_T}{\varepsilon l V_{Extr}} \quad (7)$$

a_v = Actividad volumétrica de la enzima (U/mL).

$\frac{\Delta A}{t}$ = Pendiente (min^{-1}) del gráfico absorbancia (A) contra tiempo (t).

V_T = Volumen total (mL).

ε = Coeficiente de extinción molar de catecol ($0.00126 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$).

l = Espesor de la celda (cm).

V_{Extr} = Volumen del extracto enzimático (mL).

10. Parámetros ingenieriles

a. Conductividad térmica (k) y difusividad térmica (α)

La conductividad térmica (k) y la difusividad térmica (α) se determinaron al utilizar el método de la fuente lineal de calor, descrito por Iribe-Salazar y col. (2015), mediante un analizador de propiedades térmicas (KD2 Pro, Decagon, EUA) (**Figura 7**). Para ello, se inserta una sonda dual (fuente lineal de calor) en el centro de la muestra, se asegura cubrirla por completo. La muestra se envuelve con película plástica para evitar la entrada de humedad o pérdida de compuestos por lixiviación durante el análisis, y luego se sumerge en agua a las temperaturas de evaluación (25, 50, 70 y 90 °C).

La sonda dual está compuesta por dos tubos delgados de acero, cada uno con un sensor de temperatura interno; uno de ellos además contiene un alambre calefactor. Se hace pasar una corriente por dicho alambre, se registran las variaciones de temperatura durante el proceso de calentamiento y posterior enfriamiento. A partir de estos datos, se aplican ecuaciones específicas y se realiza un análisis de regresión no lineal para estimar los parámetros b_0 , b_1 y b_2 .

$$4\pi \frac{(T-T_0)}{Q_L} = b_0 t + b_1 E_i \left(\frac{b_2}{t} \right) \quad (8)$$

$$4\pi \frac{(T-T_0)}{Q_L} = b_0 t + b_1 \left[E_i \left(\frac{b_2}{t} \right) - E_i \left(\frac{b_2}{t-t_h} \right) \right] \quad (9)$$

donde T_0 es la temperatura inicial, $Q_L = I^2 R/L$, la transferencia de calor por unidad de longitud de la sonda de calentamiento, E_i la función integral exponencial y t_h el tiempo de calentamiento. La conductividad y difusividad térmica se calculan con $k = 1/b_1$ y $\alpha = r^2/(4b_2)$.



Figura 7. Sonda dual modelo KD2 Pro, Decagon, EUA.

b. Densidad (ρ)

Para determinar la densidad se utilizó el método de desplazamiento de fluido que proviene del principio de Arquímedes. Se miden 5 g de carambola, se usa una probeta de 50 mL con una cantidad determinada de tolueno y se introduce la carambola dentro, se registra el volumen inicial y el final, el volumen desplazado corresponde al de la muestra (Rapusas y Driscoll, 1995).

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{V_2 - V_1} \quad (10)$$

Donde:

ρ = Densidad (kg/m³)

m = Masa (kg)

V_1 = Volumen inicial (m³)

V_2 = Volumen final (m³)

c. Capacidad calorífica específica (C_p)

La capacidad calorífica específica (C_p) se obtuvo por despeje de la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (11)$$

$$C_p = \frac{k}{\rho \alpha} \quad (12)$$

d. Coeficiente convectivo de transferencia de calor (h)

El coeficiente convectivo de transferencia de calor (h) se determinó con el método de parámetros concentrados descrito por Iribe-Salazar y col. (2015). Este método se basa en

someter un cuerpo pequeño, con una conductividad térmica elevada, a un proceso de calentamiento, lo cual permite hacer la consideración que dentro del cuerpo no hay gradientes de temperatura, se asume que la temperatura es solo función del tiempo.

Se fabrica un cuerpo de aluminio con la forma del alimento a procesar y se introduce un termopar a una profundidad determinada. Se equilibra a la temperatura inicial y se somete a procesamiento junto a piezas del alimento que tienen la misma forma que el cuerpo de aluminio, de manera que las condiciones a las que se expone el cuerpo de aluminio sean las mismas que el alimento a procesar. Para este método se tiene que:

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = e^{\left(-\frac{hA}{\rho C_p V} t\right)} \quad (13)$$

Al linealizar la ecuación se obtiene:

$$\ln\left(\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}}\right) = -\frac{hA}{\rho C_p V} t \quad (14)$$

donde T_0 es la temperatura inicial del sólido, T_{∞} es la temperatura del fluido, A es el área del sólido, V es el volumen del sólido, ρ es la densidad del sólido, C_p es la capacidad calorífica del sólido y h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor. El cociente $(T - T_{\infty}) / (T_0 - T_{\infty})$ se denomina Fracción de Temperatura No Alcanzada (FTNA).

Para obtener el coeficiente convectivo de transferencia de calor (h), se grafica $\ln$ (FTNA) contra t , para obtener la pendiente mediante un análisis de regresión lineal y obtener h a partir de la pendiente:

$$h = -\frac{(pend) \rho C_p V}{A} \quad (15)$$

El criterio necesario para aplicar este método es que $Bi < 0.1$

11. Simulación de la transferencia de calor

La simulación de la transferencia de calor se realizó con el paquete computacional ANSYS (ANSYS/ED, versión 14.0) con la finalidad de obtener las historias de temperatura estimadas. Primero, se determina la ubicación de los puntos donde se colocan los termopares en el interior del alimento modelado en el simulador; las coordenadas asignadas a los termopares en el modelo deben corresponder con la ubicación de los termopares durante el proceso real, ya que esto permitirá validar las predicciones hechas por el *software*. Se considera un modelo geométrico tridimensional de una rebanada de carambola. En este modelo se implementa una red de elementos con la distribución adecuada de los nodos para obtener una mayor precisión en los resultados. Para modelar se utiliza un elemento tetraedro de 10 nodos (Tet 10 node 87).

Para realizar la simulación se necesita alimentar al simulador las propiedades termofísicas del alimento, lo cual incluye a la conductividad térmica, densidad y capacidad calorífica específica. Estas propiedades se consideran como dependientes de la temperatura. Para simular la transferencia de calor por convección se considera una temperatura inicial (T_0) uniforme que se aplica a todos los nodos. En la superficie del modelo tridimensional se aplica las condiciones de transferencia de calor por convección, se alimenta la temperatura del medio (T_∞) y el coeficiente convectivo de la transferencia de calor (h). El programa se ejecuta a intervalos de 1 s para obtener la historia de temperatura. Los nodos de interés (previamente establecidos) se seleccionan, para obtener el listado de las temperaturas estimadas y poder realizar la validación con datos experimentales (Iribe-Salazar y col. 2015). Al utilizar el MEF se obtuvieron 3 replicas de historia de temperatura simuladas, al cambiar T_0 (17.4, 17.5 y 19.8 °C), T_∞ (80.7, 80.7 y 81.0 °C).

12. Predicción de retención de vitamina C

Para predecir la retención de vitamina C se simula la historia de temperatura de una rebanada de carambola, se ubica el nodo para el punto crítico. En el método gráfico de Bigelow y col. (1920) se grafica la velocidad letal (v_L) contra el tiempo y se estima el área bajo el gráfico, la cual corresponde a la degradación (F_{T_0}) inducida por el proceso:

$$F_{T_0} = \int_0^t 10^{\frac{T-T_0}{z}} dt = \left(\frac{1}{2} v_{L_0} + v_{L_1} + \dots + v_{L_{n-1}} + \frac{1}{2} v_{L_n} \right) \quad (16)$$

Donde T es la temperatura experimental o simulada a cualquier tiempo, T_0 es la temperatura de referencia ($^{\circ}\text{C}$) y z es la constante de resistencia térmica ($^{\circ}\text{C}$).

La degradación de vitamina C sigue una cinética de primer orden, la cual integrada se expresa como:

$$\log(\text{Vit } C) = -\frac{1}{D_{T_0}} t_{T_0} + \log(\text{Vit } C_i) \quad (17)$$

Donde $\text{Vit } C_i$ es el contenido de vitamina C inicial, $\text{Vit } C$ es el contenido de vitamina C retenido, D_{T_0} es el tiempo de retención decimal a T_0 y t_{T_0} el tiempo del proceso a T_0 . Al despejar el tiempo de proceso:

$$t_{T_0} = D_{T_0} \log \frac{\text{Vit } C_i}{\text{Vit } C} \quad (18)$$

La degradación inducida por el proceso (F_{T_0}) a una temperatura de referencia T_0 indica el tiempo t_{T_0} de proceso a la misma temperatura de referencia T_0 :

$$F_{T_0} = t_{T_0} \quad (19)$$

Al combinar las ecuaciones (15) y (17), se obtiene el cociente de retención de vitamina C:

$$\frac{Vit\ C_i}{Vit\ C} = 10^{-\frac{F_{T_0}}{D_{T_0}}} \quad (20)$$

El porcentaje de retención se calcula con:

$$\% Vit\ C_{ret} = \frac{Vit\ C_i}{Vit\ C} (100 \%) \quad (21)$$

Para la vitamina C, el tiempo de reducción decimal es $D_{T_0} = 18.56$ min a $T_0 = 90$ °C y la constante de resistencia térmica es $z = 69.5$ °C (Bañuelos-Navarro, 2020).

13. Diseño experimental

a. Optimización

Se utilizó un Diseño Central Compuesto Rotable (DCCR) con dos factores, temperatura (70 a 95 °C) y tiempo (2 a 15 min), con 5 niveles de variación para cada factor lo que da un total de 13 tratamientos (**Cuadro 4**).

Para optimizar las condiciones de proceso se emplea la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR). Se corre un diseño de primer grado que permita caracterizar en forma preliminar el tipo de superficie de respuesta y determinar la presencia de curvaturas, al utilizar el diseño factorial completo. Si se encuentra que existe curvatura se debe correr un diseño de segundo grado para caracterizar mejor la superficie y lograr modelar la curvatura; con el modelo ajustado se determinará las condiciones óptimas del proceso. Dentro de los criterios empleados para la optimización del proceso, se considera como deseables: menor concentración de oxalatos, mayor retención de vitamina C y mayor capacidad antioxidante.

Cuadro 4. Tratamientos para el Diseño Central Compuesto Rotable (DCCR).

x_1	x_2	$T (^{\circ}\text{C})$	$t \text{ (min)}$
-1	-1	73.6	3.9
1	-1	91.3	3.9
-1	1	73.6	13.1
1	1	91.3	13.1
-1.41421	0	70	8.5
1.41421	0	95	8.5
0	-1.41421	82.5	2
0	1.41421	82.5	15
0	0	82.5	8.5
0	0	82.5	8.5
0	0	82.5	8.5
0	0	82.5	8.5
0	0	82.5	8.5

b. Análisis de datos

Las condiciones óptimas de procesamiento se obtuvieron con el método numérico y la metodología reportada por Derringer y Suich (1980). Las variables de respuesta utilizadas fueron: CO , % RVC y CA . Se realiza el análisis de regresión a las variables de respuesta, donde los términos no significativos ($p > 0.05$) son descartados para determinar los modelos de predicción de cada una de las variables de respuesta, y obtener modelos con mejor ajuste. Esto se realizó a través del *software* Design Expert 13.0.0. Para que un modelo de predicción sea reproducible, es necesario cumplir con cuatro condiciones: significancia p del modelo ($p < 0.05$), coeficiente de determinación ($R^2 > 0.80$), coeficiente de variación ($C.V. < 10\%$) y que pase la prueba de falta de ajuste ($p_{LOF} > 0.05$). Cuando estas condiciones se cumplen, el modelo se considera adecuado y reproducible.

c. Validación del modelo de predicción

Para validar los modelos predichos por la metodología de superficie de respuesta se realizaron corridas de confirmación al utilizar 5 réplicas del proceso de escaldado optimizado ($n = 5$). Se obtuvieron muestras a las cuales se les evaluaron las siguientes variables de respuesta: CO , RVC y CA . Se verificó que la media de cada variable de respuesta estuviera dentro del intervalo de confianza para las condiciones óptimas predichas por el modelo, lo que determina la viabilidad del modelo.

d. Parámetros ingenieriles

Se utilizó un diseño completamente al azar de una sola vía (Montgomery, 2012), donde el factor fue temperatura (25, 50, 70 y 90 °C); las variables de respuesta fueron: conductividad térmica, difusividad térmica, densidad aparente, y capacidad calorífica específica. Se realizaron 3 réplicas y la comparación de medias de las variables de respuesta se llevó a cabo mediante la

prueba de Fisher (*LSD*) con un $\alpha = 0.05$ en el software estadístico STATGRAPHICS 16.1. Un análisis de estadística descriptiva se llevó a cabo para el coeficiente convectivo de transferencia de calor y para la predicción de la retención de vitamina C. En ambos casos, se realizaron tres réplicas; se reporta la media y su desviación estándar.

e. Contraste entre rebanadas de carambola escaldadas optimizadas respecto al fresco

Para la comparación se realizó un análisis de varianza (ANOVA) unifactorial completamente al azar con 2 niveles (fresco y escaldado optimizado). Las variables de respuesta fueron: color, firmeza, sólidos solubles totales, pH, contenido de oxalatos, vitamina C, capacidad antioxidante y actividad de polifenol oxidasa. Se llevaron a cabo 3 réplicas de cada una de ellas y para la comparación de medias de las variables de respuesta se usó la prueba de Fisher (*LSD*) con un $\alpha = 0.05$ en el *software* estadístico STATGRAPHICS 16.1.

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS

1. Color

Los parámetros de color obtenidos para las rebanadas frescas de carambola fueron $L^* = 56.1 \pm 2.16$, $a^* = -2.95 \pm 1.59$ y $b^* = 33.8 \pm 2.77$, lo que corresponde a una coloración amarillo-anaranjada de acuerdo con el diagrama de cromaticidad Lab^* . Medina (2012) reportó un $L^* = 66.5$, $a^* = -3.7$ y $b^* = 19.2$, en rebanadas de carambola, asociados con una coloración amarillo pálido cercano al blanco. En el mismo estudio, las rebanadas de carambola almacenadas durante ocho días en condiciones ambientales presentaron un $L^* = 56.0$, $a^* = -2.2$ y $b^* = 17.0$, lo que evidencia modificaciones en el color durante el almacenamiento. Las diferencias observadas entre los parámetros de color pueden atribuirse al estado de madurez del fruto, a las condiciones de medición y a la variedad.

2. Firmeza

La firmeza de las rebanadas frescas de carambola fue de 12.56 ± 2.27 N. Siller y col. (2004) reportaron una firmeza de 12.7 N en carambola fresca en estadio de madurez tres (fruto amarillo), firmeza semejante a la obtenida en este estudio. Sin embargo, debe considerarse que dichos autores realizaron las mediciones en el fruto completo y no en rebanadas, lo que sugiere que la firmeza de la pulpa y la del fruto con cáscara no difieren de manera importante, posiblemente debido a la similitud en la textura de ambos tejidos.

3. Sólidos solubles totales

El contenido de sólidos solubles totales determinado en las rebanadas frescas de carambola fue de 8.16 ± 0.49 °Bx. Medina (2012) reportó un contenido de sólidos solubles totales de 5 ± 0.5 °Bx en fruto fresco de carambola. Por su parte, Novillo (2009) informó un contenido de sólidos solubles totales de 7.00 ± 0.42 °Bx en jugo de carambola, el cual aumentó a 8.05 ± 0.13 °Bx después de 14 días de almacenamiento. Aunque los resultados corresponden a matrices y condiciones de evaluación distintas, las diferencias observadas pueden atribuirse a diversos factores, como el estado de madurez del fruto, el tiempo de almacenamiento y el tipo de muestra analizada.

4. pH

El pH de las rebanadas frescas de carambola fue de 3.04 ± 0.09 , pH similar al reportado por Novillo (2009) para jugo de carambola fresca (3.42 ± 0.08). Las variaciones de pH pueden atribuirse principalmente al estado de madurez del fruto y a las condiciones de cultivo.

B. PARÁMETRO QUÍMICO

1. Contenido de oxalatos

En las rebanadas frescas de carambola se determinó un contenido de oxalatos de 686 ± 38 mg/100 g f.f. equivalente a 8337 ± 461 mg/100 g s.s (91.8% de humedad). Ferrara (2018) señala que la carambola puede contener hasta 700 mg/100 g f.f. en variedades ácidas, mientras que en variedades dulces se han informado concentraciones de 40 a 80 mg/ 100 g f.f. Asimismo, Massey (2007) reportó un intervalo de 80 a 730 mg/ 100 g de f. f., cuyo límite superior fue cercano al obtenido en este estudio. Las diferencias entre estudios podrían atribuirse a

variaciones en las condiciones de medición, el estado de madurez del fruto y el manejo postcosecha.

C. PARÁMETRO NUTRIMENTAL

1. Vitamina C

En las rebanadas frescas de carambola el contenido de vitamina C fue de 34.8 ± 2.10 mg A.A./100 g f.f. Este resultado es similar a la reportada por Murillo y col. (2014), quienes encontraron 36.3 ± 1.15 mg A.A./100 g f.f. en fruto fresco y 30.1 mg A.A./100 g f.f. después del prensado. La similitud entre estos resultados sugiere que la concentración de vitamina C determinada en este estudio se encuentra dentro del intervalo reportado para este fruto. Las diferencias observadas pueden atribuirse a factores como las condiciones de análisis, el grado de madurez, el manejo postcosecha y las características propias del material vegetal evaluado.

D. PARÁMETRO FUNCIONAL

1. Capacidad antioxidante

La capacidad antioxidante determinada en rebanadas de carambola fresca fue de 23.14 ± 3.87 $\mu\text{mol ET/g f.f.}$ Este valor fue menor al reportado por Muñoz y col. (2009), con 35.95 $\mu\text{mol ET/g f.f.}$; sin embargo, fue superior al reportado por Murillo y col. (2014), quienes registraron 19.44 $\mu\text{mol ET/g f.f.}$ Estas diferencias pueden estar asociadas con factores como el estado de madurez, las condiciones agroclimáticas del cultivo, la variedad del fruto, el manejo postcosecha y las características del material vegetal utilizado en cada estudio

E. PARÁMETRO ENZIMÁTICO

1. Actividad de la polifenol oxidasa

La actividad volumétrica de polifenol oxidasa en rebanadas de carambola fresca fue de 640 ± 53.0 U/mL. Aristizabal y col. (2012) reportaron 1287 U/mL en fruto verde y 59 U/mL en fruto maduro, por lo que, la actividad observada en este estudio podría asociarse con un estado de madurez intermedio. Las variaciones en la actividad volumétrica de esta enzima pueden atribuirse al estado de madurez, a la variedad del fruto y a la técnica empleada para su determinación.

F. MODELOS DE REGRESIÓN DE PARÁMETROS QUÍMICO, NUTRIMENTAL Y FUNCIONAL DE REBANADAS DE CARAMBOLA ESCALDADAS

1. Contenido de oxalatos (CO)

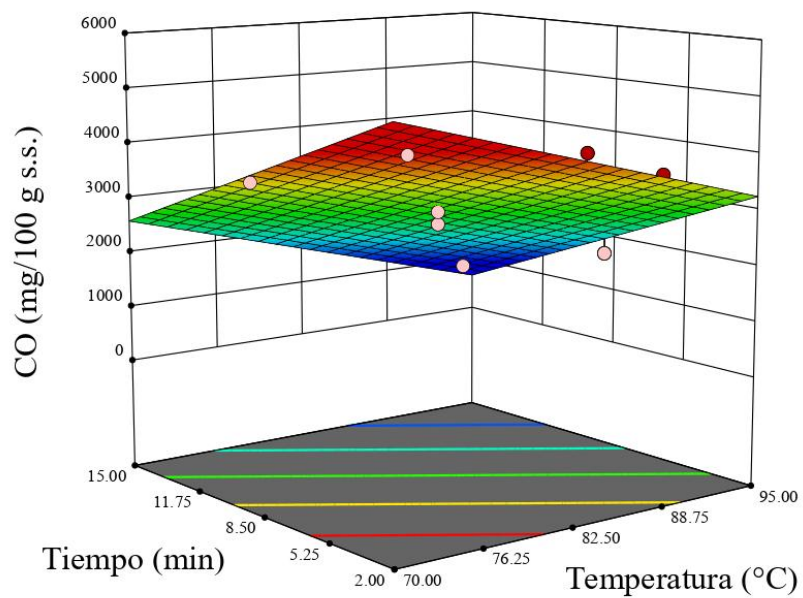
En la **Figura 8** se muestra el contenido de oxalatos en rebanadas de carambola en función de la temperatura y el tiempo de escaldado. Se observó una reducción en el contenido de oxalatos, con concentraciones entre 1156 y 4420 mg/100 g s.s., reducción de 86 y 47 %.

El comportamiento fue lineal y evidenció una disminución en el contenido de oxalatos conforme aumentó la temperatura y el tiempo de escaldado. De acuerdo con el modelo de predicción codificado, el tiempo ejerció un efecto más marcado que la temperatura sobre esta respuesta:

$$CO = 2917 - 677.7T - 911.8t \quad (22)$$

Este modelo presentó como términos significativos la temperatura y el tiempo de escaldado. Asimismo, mostró significancia estadística ($p < 0.01$) y no mostró falta de ajuste ($P_{LOF} = 0.1616$).

(A)



(B)

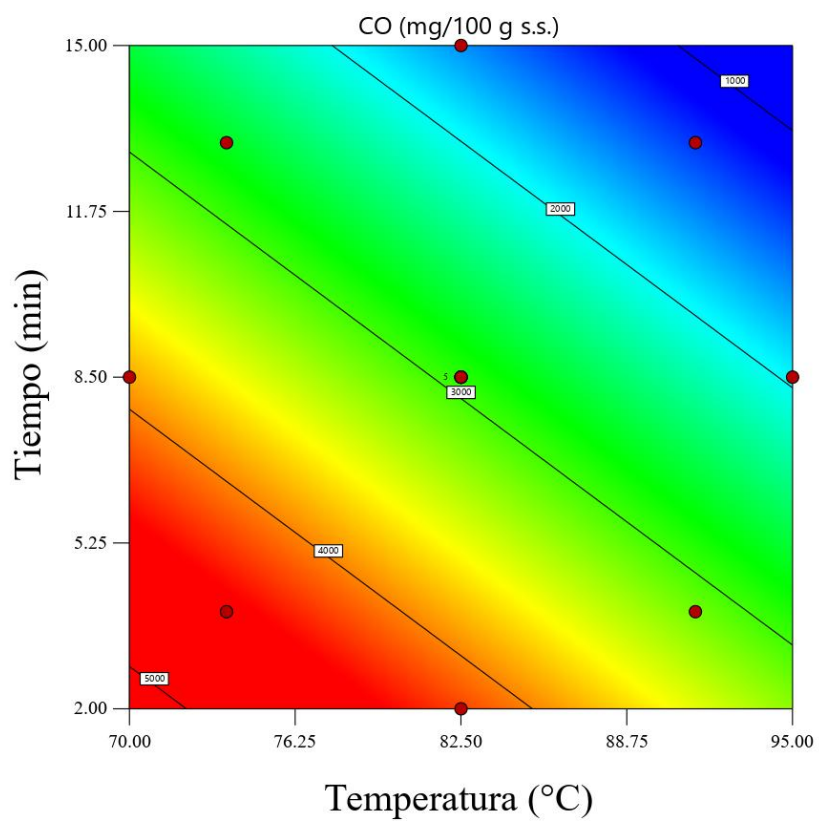


Figura 8. Efecto de la temperatura y el tiempo de escaldado sobre el contenido de oxalatos (CO) en rebanada de carambola, (A) superficie de respuesta y (B) contornos.

Además, presentó un *C.V.* de 9.33 % y un coeficiente R^2_{ajust} de 91.9 %, lo que indica un buen ajuste y una adecuada capacidad predictiva del modelo. Chai y Liebman (2005) reportaron un comportamiento similar en diversas hortalizas, al observar una reducción en el contenido de oxalatos como de la cocción y el escaldado, con disminuciones de entre 30 y 87 %.

2. Retención de vitamina C (*RVC*)

En la **Figura 9** se muestra la *RVC* en función de la temperatura y el tiempo de escaldado, con porcentajes de retención que oscilaron entre 11 y 85 %. Se observó que la *RVC* disminuyó linealmente al aumentar la temperatura y el tiempo de escaldado. De acuerdo con el modelo, la temperatura ejerció un efecto más marcado que el tiempo sobre la retención de vitamina C. Mendoza-Corvis y col. (2015) reportaron un comportamiento semejante en pulpa de mango criollo o común, al observar que el incremento de la temperatura y el tiempo de escaldado disminuye el contenido de vitamina C. Este efecto se atribuye a la alta termosensibilidad de esta vitamina derivada de su estructura química. El modelo de predicción codificado fue:

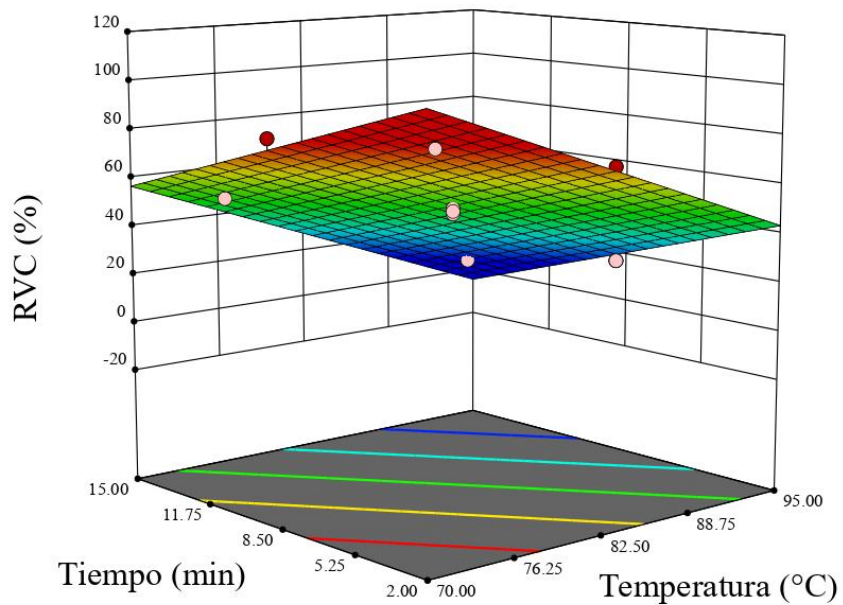
$$RVC = 50.1 - 21.6T - 16.8t \quad (23)$$

El modelo presentó como términos significativos la temperatura y el tiempo de escaldado. Además, mostró significancia estadística ($p < 0.01$), no presentó falta de ajuste ($p_{LOF} = 0.08$). Asimismo, presentó un coeficiente de variación (*C.V.*) de 6.74 % y un R^2_{ajust} de 97.8 %, lo que indica un buen ajuste y una adecuada capacidad predictiva del modelo.

3. Capacidad antioxidante (*CA*)

En la **Figura 10** se muestra la capacidad antioxidante en función de la temperatura y el tiempo de escaldado. Esta respuesta osciló entre 246 y 2185 $\mu\text{mol ET}/100 \text{ g f.f.}$ retención de *CA*

(A)



(B)

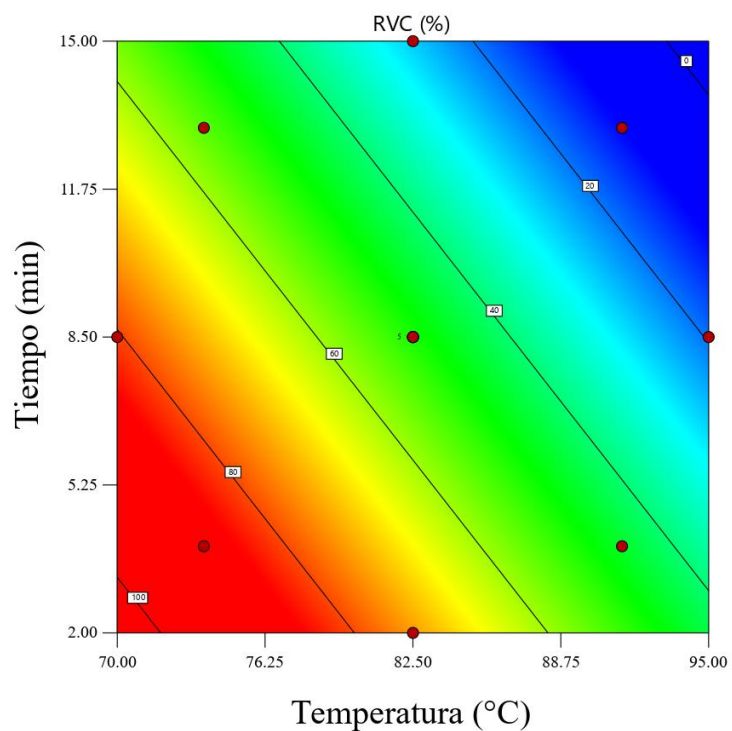
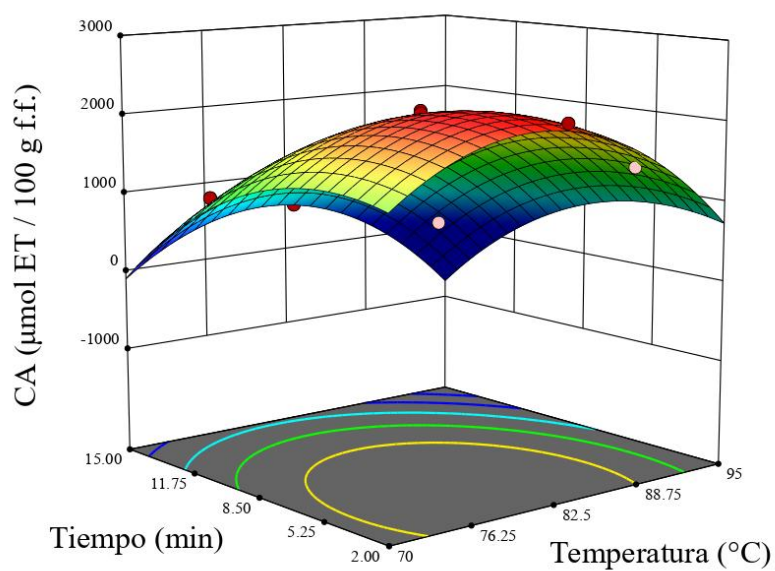


Figura 9. Efecto de la temperatura y el tiempo de escaldado sobre la retención de vitamina C (*RVC*) en rebanada de carambola, (A) superficie de respuesta y (B) contornos.

(A)



(B)

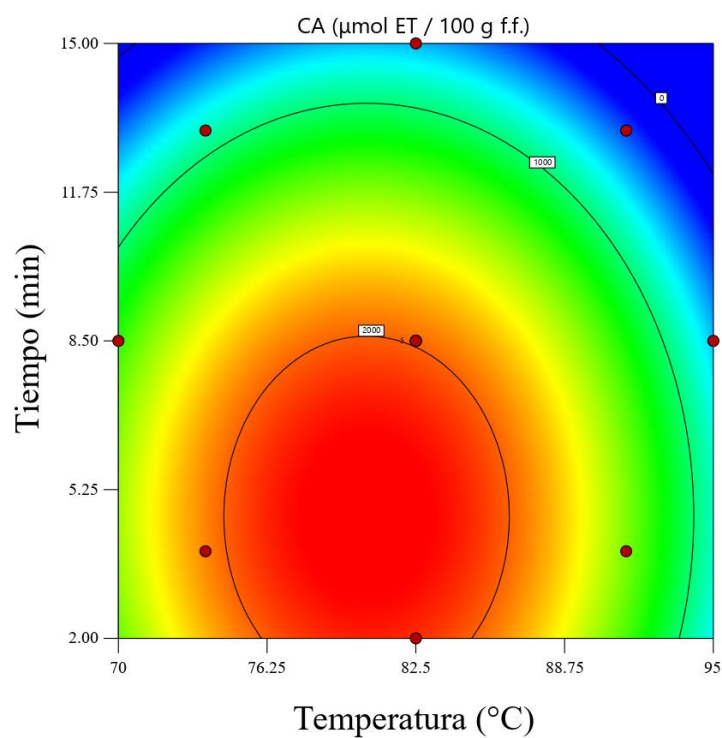


Figura 10. Efecto de la temperatura y el tiempo de escaldado sobre la capacidad antioxidante (CA) en rebanada de carambola, (A) superficie de respuesta y (B) contornos.

de 10.6 y 94 %. La menor CA se obtuvo a 91.3 °C y 13 min, mientras que la mayor se observó a 82.5 °C y 2 min. El modelo codificado de predicción fue:

$$CA = 1984.4 - 239.2T - 534.3t - 510.7T^2 - 320.3t^2 \quad (24)$$

El comportamiento de la capacidad antioxidante se describió mediante un modelo cuadrático respecto a la temperatura y el tiempo, con significancia estadística ($p < 0.01$) y sin falta de ajuste ($P_{LOF} = 0.32$), un $C.V.$ de 7.47 % y un R^2_{ajust} de 97.2 %, lo que indica un adecuado ajuste a los datos experimentales y una buena capacidad predictiva del modelo. Liu y col. (2016) reportan en el escaldado de pulpa de mango a 100 °C por 1 min un aumento en la capacidad antioxidante del 21 %, Quispe Herrera y col. (2022) reportan una pequeña disminución (de 8.4 a 16.3 %) en la capacidad antioxidante de la carambola en un escaldado a temperaturas de 80, 85 y 90 °C por tiempos de 5, 10 y 15 min, tuvieron resultados similares a los obtenidos en el escaldado optimizado en el presente trabajo. Saini y col. (2023) reportaron que el escaldado de papa a 85 °C durante 5 minutos incrementó significativamente la capacidad antioxidante (30.5 %), tanto Quispe como Saini atribuyen este aumento de la capacidad antioxidante a la liberación de compuestos fenólicos, retenidos dentro de las células, en membrana plasmática y pared celular, por lo cual al destruir las células y la estructura se detecta una mayor capacidad antioxidante, posteriormente, si se aumenta el tiempo de escaldado, se comienza a degradar los compuestos fenólicos por lo que disminuye la capacidad antioxidante; concluyen que a escaldados en tiempos cortos se logra un aumento de la capacidad antioxidante dada principalmente por la detección de los compuestos fenólicos.

G. MEJORES CONDICIONES PARA LA OBTENCIÓN DE REBANADAS DE CARAMBOLA ESCALDADA

1. Optimización del proceso de escaldado

Una vez desarrollados los modelos de predicción, se definieron los objetivos de optimización para cada variable de respuesta con el propósito de determinar las condiciones óptimas del proceso. Los criterios de optimización consistieron en establecer un valor objetivo de 3079 mg/100 g s.s. para el criterio de oxalatos, maximizar la retención de vitamina C y la capacidad antioxidante. Para la optimización del proceso de escaldado de rebanadas de carambola, a las variables *CO*, % *RVC* y *CA* se les asignó la misma importancia relativa (+++). Asimismo, se estableció una ponderación de 1 a todas las variables de respuesta.

Las ponderaciones se utilizan durante la optimización para otorgar mayor o menor relevancia al cumplimiento del objetivo deseado, ya sea de minimización o de maximización. Cuando la ponderación es igual a 1, la deseabilidad individual de cada respuesta varía linealmente entre 0 y 1; en cambio, ponderaciones inferiores a 1 (mínimo de 0.1) reducen el énfasis en el cumplimiento del objetivo establecido.

La **Figura 11** muestra el comportamiento de la deseabilidad global y de las deseabilidades individuales correspondientes a las condiciones óptimas del proceso de escaldado de rebanadas de carambola. Aunque la deseabilidad individual del porcentaje de retención de vitamina C (*RVC*) fue relativamente baja (0.59), la deseabilidad global alcanzó 0.814. De acuerdo con Schoeninger y col. (2014), debido a la complejidad estructural de los alimentos, deseabilidades entre 0.6 y 0.8 aún pueden considerarse aceptables. Finalmente, las condiciones óptimas para el escaldado de rebanadas de carambola correspondieron a una temperatura de 80.6 °C y un tiempo de 8 min 24 s.

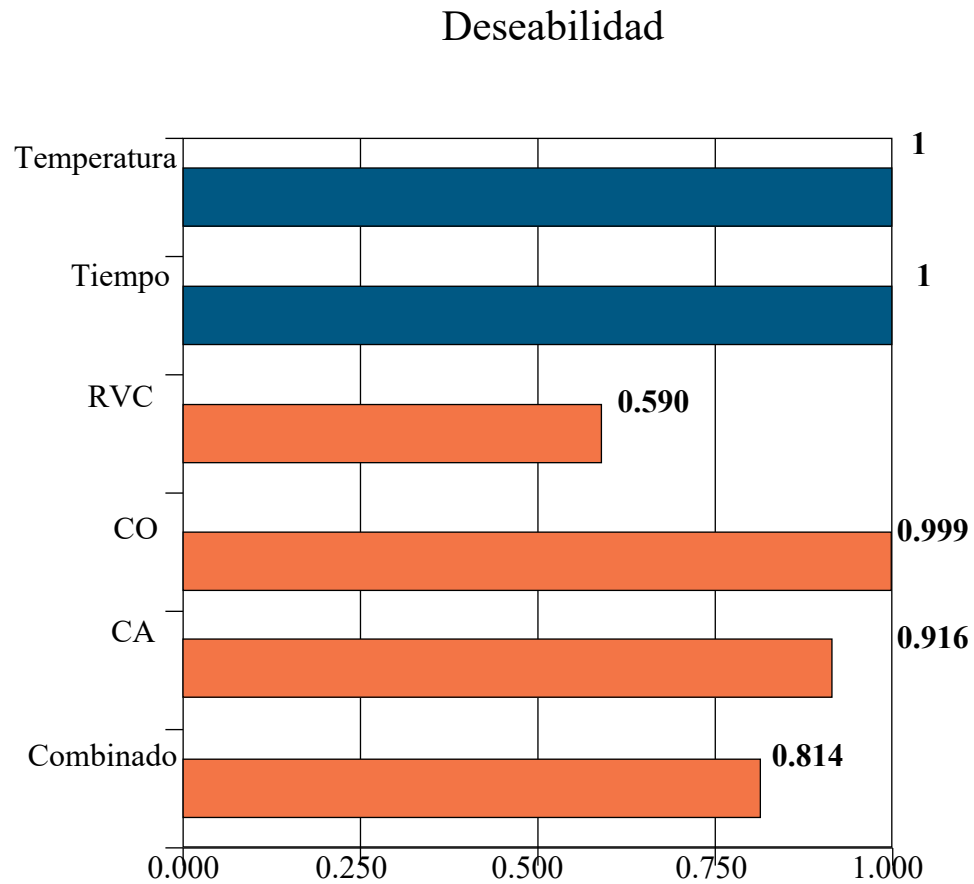


Figura 11. Gráfico de deseabilidades individuales de las variables de proceso y respuesta y deseabilidad global correspondientes a las condiciones óptimas del proceso de escaldado en rebanadas de carambola.

2. Validación de los modelos de predicción

En el **Cuadro 5** se presentan las variables de respuesta predichas por el modelo y las obtenidas experimentalmente para validar el modelo matemático aplicado al proceso de escaldado de rebanadas de carambola bajo las condiciones óptimas de los factores evaluados. Los datos experimentales corresponden al promedio de cinco mediciones realizadas para cada variable de respuesta e incluyen la desviación estándar obtenida en cada caso. Los resultados muestran que las medias experimentales de todas las variables se ubicaron dentro de los intervalos estimados por el modelo matemático, lo que indica una adecuada capacidad predictiva y una buena concordancia entre los datos experimentales y predichos.

La validación confirmó que los modelos matemáticos permiten estimar el comportamiento de las variables de respuesta dentro del intervalo de temperatura y tiempo evaluado. De esta manera, los intervalos reportados por el modelo, con un nivel de confianza del 95 % respaldan que, al aplicar las condiciones óptimas del proceso de escaldado, los datos experimentales se mantengan dentro del rango esperado. Esto confirma la utilidad de los modelos para predecir el comportamiento del sistema dentro del intervalo estudiado.

H. CONTRASTE DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS, QUÍMICO, NUTRIMENTAL, FUNCIONAL Y ENZIMÁTICO DE REBANADAS DE CARAMBOLA ESCALDADAS RESPECTO AL FRESCO

En el **Cuadro 6** se presentan los resultados experimentales de las variables de respuesta fisicoquímicas (color, firmeza, sólidos solubles totales y pH). En este cuadro se aprecian las variables que presentaron diferencias entre las rebanadas de carambola sometidas al tratamiento de escaldado optimizado y las rebanadas frescas.

Cuadro 5. Variables de respuesta predichas y experimentales evaluadas en rebanadas de carambola en condiciones optimizadas.

Variables	Experimental	Exacto	Mínimo	Máximo
<i>RVC</i> (%)	54.5 ± 2.33	55.0	51.0	59.0
<i>CO</i> (mg/100 g s.s.)	3088 ± 67	3080	2757	3402
<i>CA</i> (μ mol ET/100 g f.f.)	2001 ± 93	2022	1862	2182

Cuadro 6. Parámetros fisicoquímicos de rebanadas de carambola escaldada optimizada respecto al fruto fresco.

Parámetro	Fresco	Escaldado	LSD
Color	$L^* = 56.1 \pm 2.16^b$	$L^* = 47.9 \pm 3.11^a$	3.91
	$a^* = -2.95 \pm 1.59^a$	$a^* = -2.58 \pm 1.34^a$	2.15
	$b^* = 33.8 \pm 2.77^a$	$b^* = 30.7 \pm 4.92^a$	5.83
Firmeza (N)	12.56 ± 2.27^b	4.06 ± 0.25^a	2.35
SST (°Bx)	8.16 ± 0.49^b	6.10 ± 0.40^a	0.66
pH	3.04 ± 0.09^a	3.32 ± 0.14^b	0.17

Letras diferentes en una misma fila indican diferencias significativas (Fisher, $p \leq 0.05$).

1. Parámetros fisicoquímicos

a. Color y diferencia total de color (ΔE)

Las rebanadas de carambola escaldadas optimizadas, presentaron los siguientes parámetros de color: $L^* = 47.9 \pm 3.11$, $a^* = -2.58 \pm 1.34$ y $b^* = 30.7 \pm 4.92$. Los parámetros a^* y b^* no presentaron diferencias significativas, mientras que el parámetro L de rebanadas de carambola escaldadas optimizadas resultó significativamente menor al correspondiente de rebanadas de carambola fresca. La diferencia total de color fue de $\Delta E = 8.80$. Tavares y col (2022) obtuvieron una disminución en la luminosidad de grano de caupí, después de escaldado a temperaturas de 70, 80 y 90 °C, en tiempos de 1 a 10 min, esta disminución se la atribuyeron al colapso celular y la exudación de líquido, lo que indujo una menor reflectancia de la muestra. De acuerdo con Onwude y col. (2018), el ojo humano no percibe diferencias de color cuando ΔE es menor a 10; por lo tanto, los cambios de color observados en las rebanadas no serían perceptibles visualmente. Las variaciones del parámetro L^* pueden atribuirse a la variedad del fruto, al estado de madurez y el tiempo de exposición del fruto al escaldado, ya que este parámetro generalmente se ve influenciado por el contenido de humedad en el alimento y con ello se ejerce un efecto significativo en el color de éste (Mazzeo y col., 2015). De igual manera las variaciones en luminosidad se pueden atribuir a la destrucción de las paredes celulares y membranas plasmáticas lo que permite lixiviar líquidos y que disminuya la reflectancia del futo con la luz.

a. Firmeza

La firmeza de las rebanadas de carambola escaldadas optimizada fue de 4.06 ± 0.25 N, resultado menor a la firmeza obtenida en rebanadas de carambola fresca. Esta disminución puede atribuirse al efecto del escaldado, el cual provoca pérdida de turgencia debido a la ruptura

de la membrana celular, la degradación de la pared celular y los cambios enzimáticos y no enzimáticos en la estructura y composición de las pectinas (Peng y col., 2017).

Tavares y col (2022) obtuvieron una disminución de la firmeza de grano de caupí, durante el proceso de escaldado a temperaturas de 70, 80 y 90 °C, se concluye que el aumento de temperatura genera una gran pérdida de la firmeza, debido a los polímeros pécticos de la pared celular y la lámina media que cambian durante el procesamiento, la pectina metoxilada es propensa a la despolimerización no enzimática y a las conversiones de desmetoxilación a altas temperaturas, que es la principal responsable del ablandamiento extenso de los alimentos frescos. Además, la despolimerización β se ve afectada en alimentos con bajo contenido de ácido durante el tratamiento térmico

b. Sólidos solubles totales

Los sólidos solubles totales de las rebanadas de carambola escaldadas en las condiciones optimizadas fueron de 6.10 ± 0.40 °Bx, menores a los obtenidos en rebanadas de carambola fresca (8.16 ± 0.49 °Bx). Este comportamiento es similar al encontrado por Robles-Ozuna y col. (2007) quienes reportan una disminución que va de 3.1 °Bx en nopal fresco a 2.3 °Bx en nopal escaldado por 2 min a 70 °C. Cuastumal y col. (2016) atribuyen la disminución de este parámetro a procesos de lixiviación durante el procesamiento térmico.

c. pH

El pH obtenido para las rebanadas de carambola escaldadas optimizadas fue de 3.32 ± 0.14 , superior a lo encontrado en este estudio para rebanadas de carambola frescas. Esta diferencia puede atribuirse al efecto del agua de escaldado y a los cambios generados por la temperatura sobre la matriz del fruto. En este sentido, Cuastumal y col. (2016), en un estudio sobre el escaldado de pulpa de mango, también reportaron cambios en el pH después del tratamiento

térmico, los cuales asociaron con la oxidación de compuestos orgánicos cuando la matriz biológica es afectada por la temperatura.

2. Parámetro químico

a. Contenido de oxalatos

El contenido de oxalatos en las rebanadas de carambola sometidas al tratamiento de escaldado optimizado fue de 254 ± 5.60 mg/100 g f.f., equivalente a 3088 ± 67 mg/100 g s.s., lo que representa una disminución importante respecto a las rebanadas frescas (**Cuadro 7**). Este comportamiento coincide con lo reportado por Chai y Liebman (2005), quienes observaron en espinaca cocida por 12 min. una reducción del contenido de oxalatos de 803 a 107 mg/100 g. Dicha disminución puede atribuirse a la solubilidad de las sales de oxalato en el agua y a su eliminación por lixiviación durante el tratamiento térmico. En este sentido, los autores evaluaron diferentes métodos de cocción y señalaron que el hervido en agua produjo la mayor disminución de oxalatos, en comparación con aquellos métodos que no implican contacto directo con agua.

3. Parámetro nutrimental

a. Vitamina C

El contenido de vitamina C en las rebanadas de carambola sometidas al tratamiento de escaldado optimizado fue de 18.6 ± 1.80 mg A.A./100 g f.f., lo que representó una retención del 53.5 % respecto a las rebanadas frescas. De acuerdo con Ordóñez-Santos y col. (2013), la disminución de estos compuestos puede atribuirse a diversos procesos químicos, la oxidación del ácido ascórbico hacia su forma dehidroascórbica (DHAA), la posterior hidrólisis del DHAA y la formación de compuestos sin actividad nutricional como resultado de reacciones de polimerización. (**Cuadro 7**).

Cuadro 7. Parámetros nutrimental, químico, enzimático y funcional de rebanadas de carambola escaldadas, respecto al fruto fresco.

Parámetro	Fresco	Escaldado	<i>LSD</i>	% de retención	% de disminución
Contenido de oxalatos (mg/100 g f.f.)	686 ± 38 ^a	254 ± 5.60 ^b	39.6	-	63 ± 0.80
Contenido de oxalatos (mg/100 g s.s.)	8337 ± 461 ^a	3088 ± 67 ^b	480.9	-	63 ± 0.80
Ácido ascórbico (mg A.A./100 g f.f.)	34.8 ± 2.10 ^a	18.6 ± 1.80 ^b	1.4	53.5 ± 5.17	-
Capacidad antioxidante (μmol ET/g f.f.)	23.14 ± 3.87 ^a	20.01 ± 0.93 ^a	4.11	86.6 ± 4.02	-
PPO (U/mL)	640 ± 53.0 ^a	0 ^b	54.6	-	100

Letras diferentes en una misma fila indican diferencias significativas (Fisher, $p \leq 0.05$)

4. Parámetro funcional

a. Capacidad antioxidante

La capacidad antioxidante obtenida para rebanadas de carambola sometidas al tratamiento de escaldado optimizado fue de $20.01 \pm 0.93 \mu\text{mol ET/g f.f.}$, sin presentar diferencias significativas respecto al fresco (**Cuadro 7**). Liu y col. (2016) reportaron un aumento en la capacidad antioxidante posterior al escaldado con vapor en pulpa de mango. De manera similar, Valero y col. (2012) señalaron que el escaldado con vapor en ciruela no produjo cambios significativos en esta variable. Además, mencionan que puede presentarse un aumento en el contenido de polifenoles, mientras otros compuestos se degradan, lo que podría explicar el mantenimiento de la capacidad antioxidante posterior al tratamiento.

5. Parámetro enzimático

a. Actividad de polifenol oxidasa

La actividad enzimática del polifenol oxidasa presentó una inactivación en las rebanadas de carambola escaldadas optimizadas, respecto a las rebanadas frescas (**Cuadro 7**). Este efecto se considera deseable, ya que retrasa las reacciones de deterioro del fruto y favorece su conservación. Este comportamiento coincide con lo reportado por Calderón y Aguirre (2025), quienes observaron una disminución de hasta 82.8 % en la actividad enzimática de PPO durante el escaldado y osmodeshidratado de láminas de carambola tratadas a 60 °C durante 30 s.

I. EVALUACIÓN DE PARÁMETROS INGENIERILES EN EL ESCALDADO DE REBANADAS DE CARAMBOLA

1. Conductividad térmica (k)

En la **Figura 12** se presenta la conductividad térmica de rebanadas de carambola en función de la temperatura. La k incrementó linealmente conforme aumentó la temperatura. La k para las rebanadas de carambola osciló entre 0.488 a 0.807 W m⁻¹ K⁻¹ al incrementar la temperatura de 25 a 90 °C, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.96, lo que indica un buen ajuste lineal. El modelo de predicción para esta variable fue:

$$k = 4.70 \times 10^{-3} T + 0.362 \quad (25)$$

La conductividad térmica obtenida en esta investigación es similar a la reportada por Zambrano y Yupanqui (2016), quienes reportan una conductividad térmica para carambola sin tratamiento en un rango de 0.587 a 0.714 W m⁻¹ K⁻¹ a temperaturas de 30 a 45 °C. Por su parte, Barboza (2011) reporta una media de 0.624 W m⁻¹ K⁻¹ para pulpa de carambola. Estos autores observaron que a medida que incrementaba la temperatura y el contenido de humedad en la carambola, la conductividad térmica se incrementaba. También cabe destacar que reportan una conductividad calculada por la ecuación de Sweat (1974) de 0.597 W m⁻¹ K⁻¹, y por la ecuación de Choi-Okos de 0.585 W m⁻¹ K⁻¹. En los alimentos, el contenido de humedad influye en la conductividad térmica, ya que ésta decrece cuando el contenido de humedad se reduce (Rahman y col., 1997). Por ello, las diferencias entre los estudios pueden deberse a los métodos y condiciones de medición para calcular la conductividad térmica, además de las variaciones en concentraciones de sólidos solubles y contenido de humedad. Iribe-Salazar, y col. (2015) encontraron una tendencia de aumento en la conductividad térmica al incrementar la

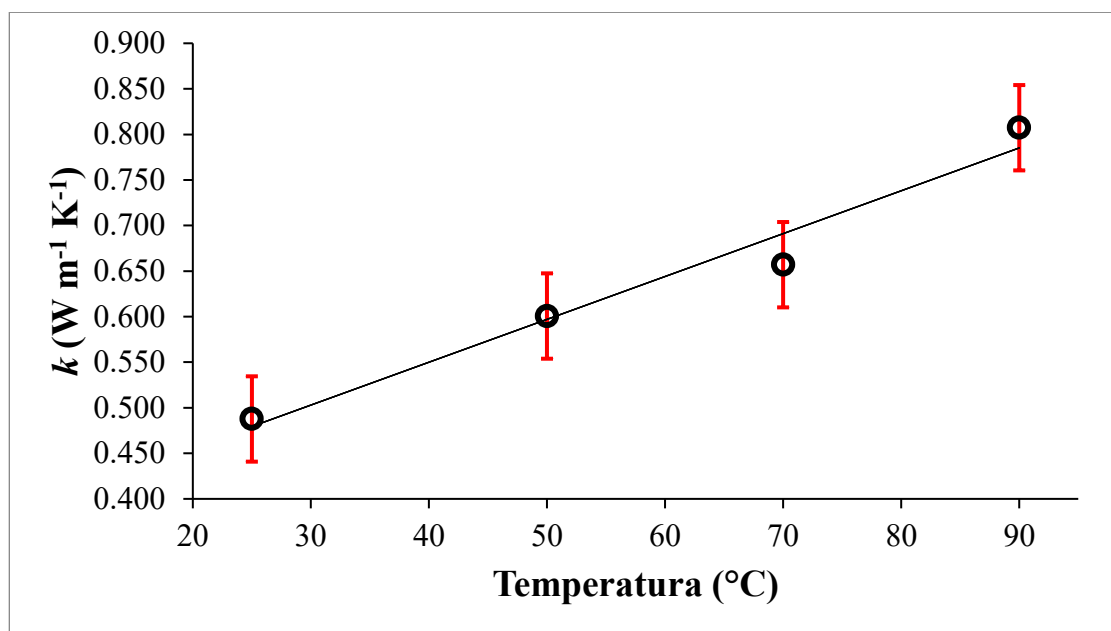


Figura 12. Conductividad térmica (k) para rebanadas de carambola en función de la temperatura ($LSD = 0.0936 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\alpha = 0.05$).

temperatura de estudio en alimentos de origen vegetal, lo cual concuerda con la tendencia encontrada en este estudio.

2. Difusividad térmica (α)

En la **Figura 13** se muestra el comportamiento de la difusividad térmica de rebanadas de carambola en función de la temperatura. Este parámetro se encontró en un intervalo de 1.68×10^{-7} a $2.62 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, presentó una correlación lineal del aumento de la difusividad térmica con el aumento de la temperatura. Se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.92 y el modelo de predicción encontrado fue:

$$\alpha = 1.42 \times 10^{-9} T + 1.24 \times 10^{-7} \quad (26)$$

Barboza (2011) reporta una difusividad térmica media de $1.503 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para pulpa de carambola. Por su parte, Laohasongkram y col. (1995) reportan una difusividad térmica para mango en un rango de $1.43 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ a $2.05 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para temperaturas de 60 a 100 °C y humedades de 59 a 81 %, donde concluyen que conforme se incrementan la humedad y temperatura, la difusividad térmica aumenta. El comportamiento observado en las rebanadas de carambola fue similar al reportado en dicho estudio, ya que en ambos casos la

difusividad térmica aumentó con la temperatura. Sin embargo, las diferencias en las difusividades se pueden deber a la composición de los frutos, al porcentaje de humedad y a la porosidad del fruto. Singh (1982) señala que la difusividad térmica está influenciada principalmente por la temperatura, ésta relaciona la velocidad de flujo de calor con el gradiente de temperaturas a través de la densidad y la capacidad calorífica específica del alimento.

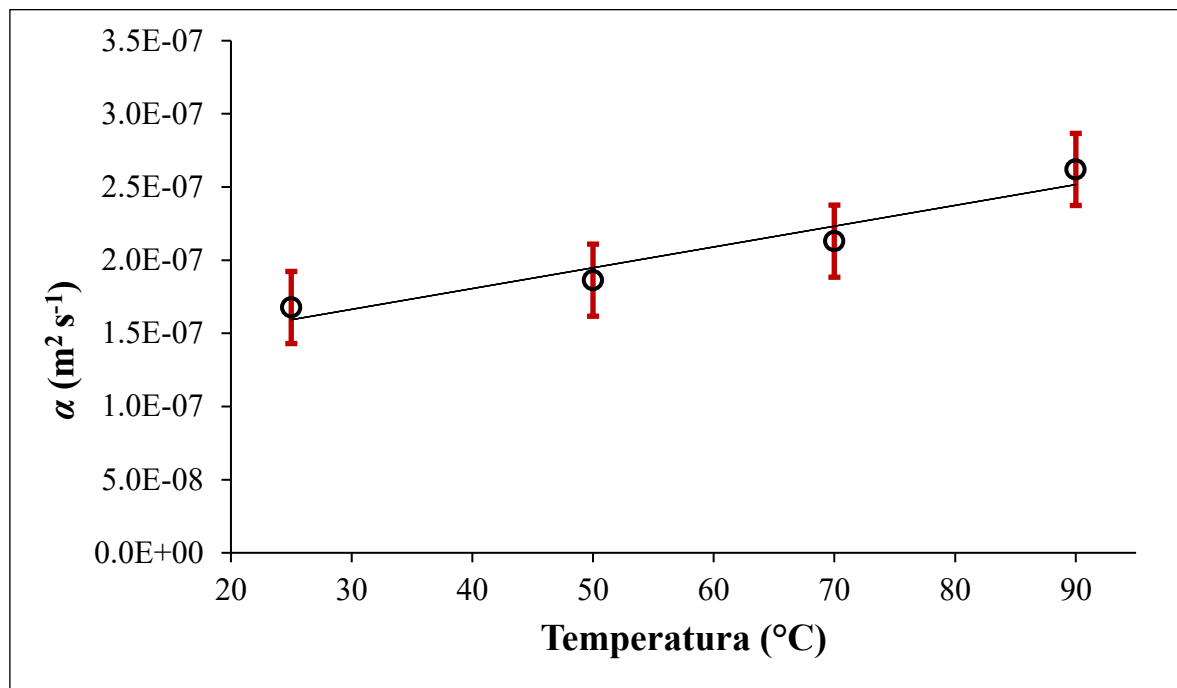


Figura 13. Difusividad térmica (α) para rebanadas de carambola en función de la temperatura ($LSD = 4.93 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, $\alpha = 0.05$).

3. Densidad aparente (ρ)

El comportamiento de la densidad aparente de carambola frente a las diferentes temperaturas de estudio se presenta en la **Figura 14**, donde se aprecia una disminución lineal de la densidad con el incremento de la temperatura de estudio. El rango encontrado para rebanadas de carambola fue de 756 a 956 kg m⁻³ con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.98 y el modelo de predicción para esta variable fue:

$$\rho = 3.01T + 1039 \quad (27)$$

Góngora (2015) reportó densidad aparente de 847 a 975 kg m⁻³ durante el secado de carambola a temperaturas de 50 a 70 °C y tiempos de 60 a 180 min. Estos resultados son similares a los obtenidos en el presente estudio; las variaciones observadas pueden atribuirse al efecto del proceso térmico y al contenido de agua del fruto.

Rodríguez-Ramírez y col. (2012) mencionan que los modelos fenomenológicos permiten describir con mayor precisión la transferencia de masa y calor cuando se considera que la densidad del material varía en función de la temperatura y del contenido de humedad interno.

4. Capacidad calorífica específica (C_p)

En la **Figura 15** se presenta el gráfico correspondiente a la capacidad calorífica específica de rebanadas de carambola escaldadas a diferentes temperaturas. La C_p aumentó linealmente al elevarse la temperatura, se encontró en un rango de 3071 a 4127 J kg⁻¹ K⁻¹. Se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.94 y el modelo de predicción encontrado fue:

$$C_p = 15.09T + 2736 \quad (28)$$

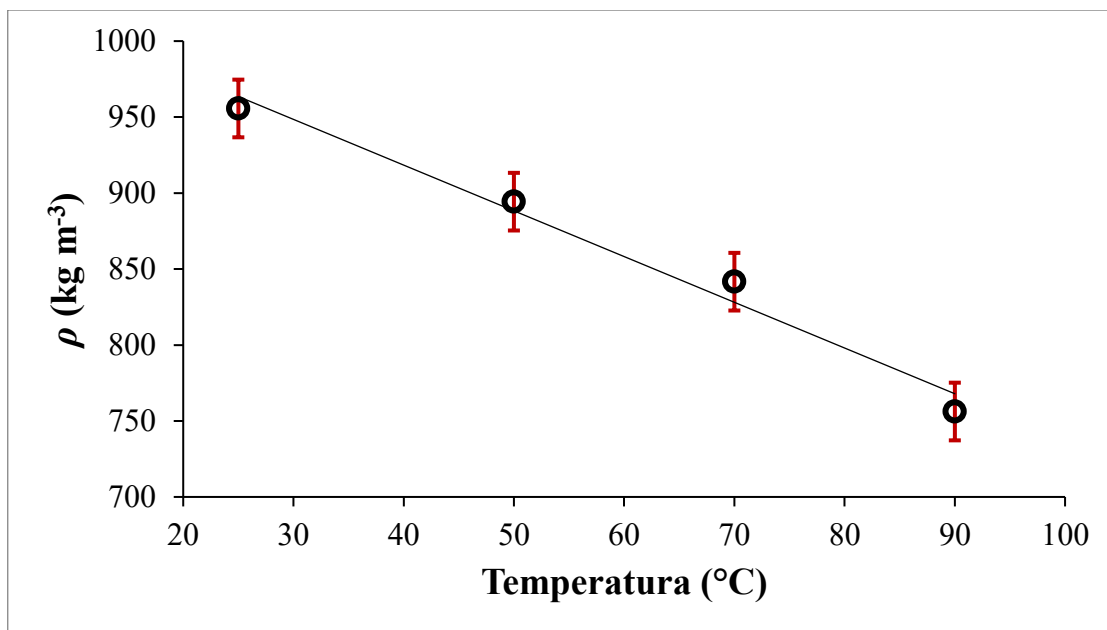


Figura 14. Densidad aparente (ρ) de rebanadas de carambola en función de la temperatura ($LSD = 38 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $\alpha = 0.05$).

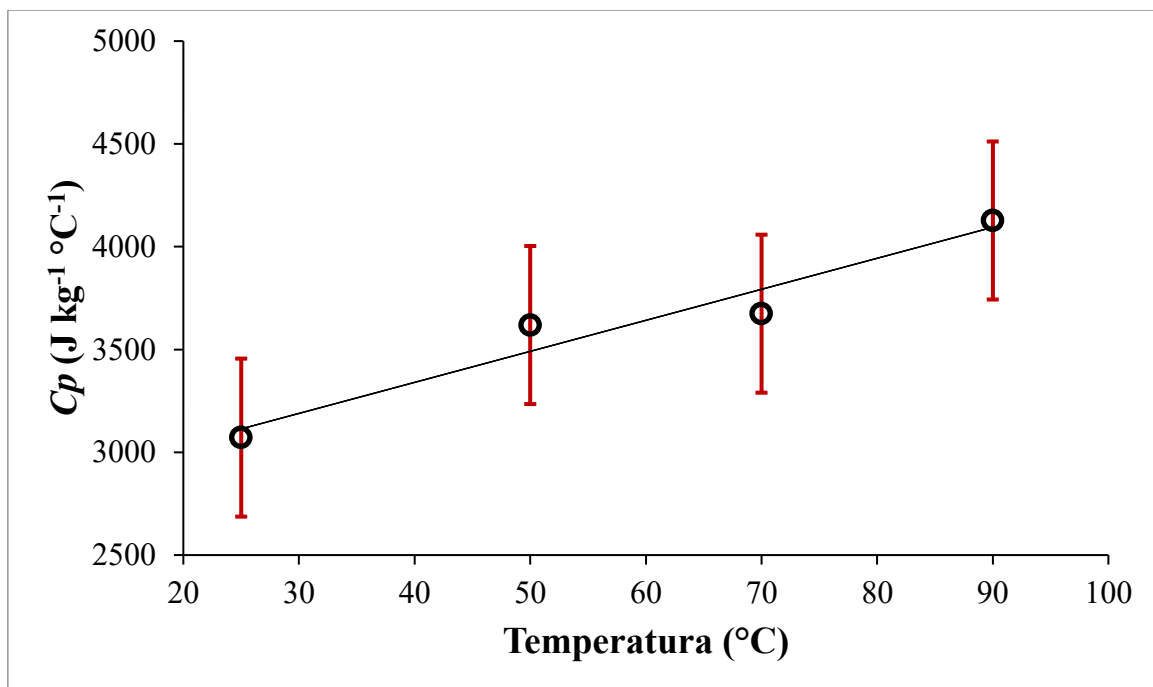


Figura 15. Capacidad calorífica específica (C_p) para rebanadas de carambola en función de la temperatura ($LSD = 768.7 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\alpha = 0.05$).

Los resultados obtenidos caen dentro de lo reportado por diversos autores como Gómez-Sánchez, y col. (2007) con una capacidad calorífica de $3990 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ para tomate y Machado-Velasco y Vélez-Ruiz (2008) quienes reportan una capacidad calorífica de $3840 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ para chile poblano. El C_p se ve afectado por el contenido de humedad en los frutos además de la composición de estos tanto por sus proteínas como por las grasas.

1. Coeficiente convectivo de transferencia de calor (h)

El coeficiente convectivo de transferencia de calor (h) obtenido durante el proceso de escaldado de las rebanadas de carambola fue de $268 \pm 3.10 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, calculado de la media de 3 réplicas a partir del método de parámetros concentrados. Manrique (2002) reportó coeficientes típicos para h en un intervalo de 50 a $1000 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ para procesos de convección en líquidos. Mendoza y Herrera (2012), encontraron coeficientes convectivos de transferencia de calor de 214 y $230 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ para papa criolla (*Solanum tuberosum* grupo phureja) sometida a escaldado mediante agua a 80 y 90 °C. Madera y col. (2017) reportan un coeficiente convectivo de transferencia de calor de 390 a $535 \text{ W m}^{-2} \text{ °C}^{-1}$ para zapallo (*Cucurbita maxima*) en un proceso de escaldado a temperaturas de 70, 80 y 90 °C por 6 min.

Para la etapa de enfriamiento, el coeficiente convectivo de transferencia de calor (h) fue de $289 \pm 5.7 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Iribe-Salazar y col. (2015) reportaron $468 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ para enfriamiento a 5 °C de brócoli después de escaldarlo a 90 °C por 3 min. Moreno (2019) reportan coeficientes de 406 y $507 \text{ W m}^{-2} \text{ °C}^{-1}$ para esfera en enfriamiento por inmersión en agua a temperaturas de 0 y -5°C respectivamente, además también obtuvieron coeficientes de 1049 y $1401 \text{ W m}^{-2} \text{ °C}^{-1}$ en cubos de cobre, concluyeron que un parámetro de gran importancia para la transferencia de calor es la forma del objeto. Las variaciones en el coeficiente convectivo pueden deberse a las condiciones del medio de calentamiento, o a la velocidad del fluido, a la geometría del sistema

empleado, así como al diferencial de temperatura en la película de fluido con el que se trabajó (Singh y Heldman, 2013).

J. SIMULACIÓN DE TRANSFERENCIA DE CALOR

En la **Figura 16** se muestra el modelo tridimensional de la rebanada de carambola creada mediante el Método de Elemento Finito (MEF) con las medidas de la rebanada experimental y la posición del nodo para simular las historias de temperatura. El nodo de interés se encontró en las coordenadas $x = 0.027$ m, $y = 0.035$ m y $z = 0.0035$ m. En las **Figuras 17 y 18** se muestran los perfiles de temperatura, para las etapas de calentamiento y enfriamiento, respectivamente; en los que es posible apreciar la gama de colores que va desde el rojo que muestra las zonas más calientes, hasta el azul fuerte, que presenta las regiones más frías.

K. VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN

En la **Figura 19** se observa la historia de temperatura estimada con el Método de Elemento Finito (MEF) al considerar propiedades termofísicas dependientes de la temperatura. La comparación entre los datos simulados y los experimentales mostró un R^2 ajustado de 0.988. Este resultado indica un ajuste adecuado, ya que el coeficiente de determinación R^2 fue mayor a 0.90. Por lo tanto, la predicción realizada mediante MEF presentó una alta concordancia con los datos experimentales, lo que evidencia que la simulación desarrollada resulta satisfactoria para describir el comportamiento térmico de las rebanadas de carambola durante el proceso.

L. PREDICCIÓN DE LA RETENCIÓN DE VITAMINA C

1. Predicción de retención de vitamina C

En la **Figura 20** se muestra el gráfico de la velocidad de degradación de la vitamina C,

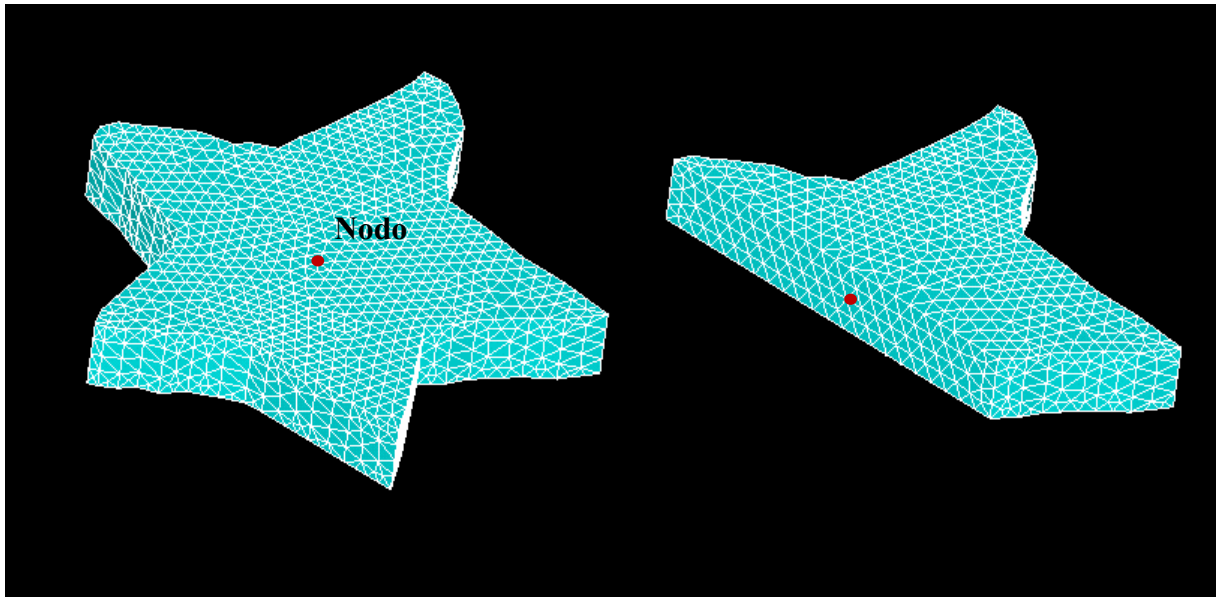
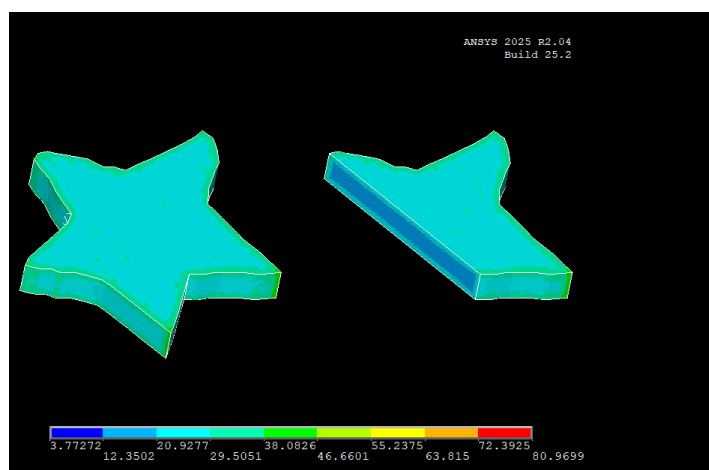
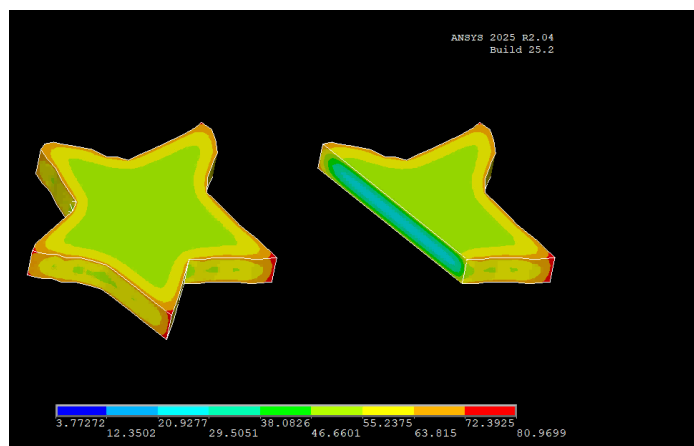


Figura 16. Modelo tridimensional de una rebanada de carambola, por medio del método de elemento finito.

(A)



(B)



(C)

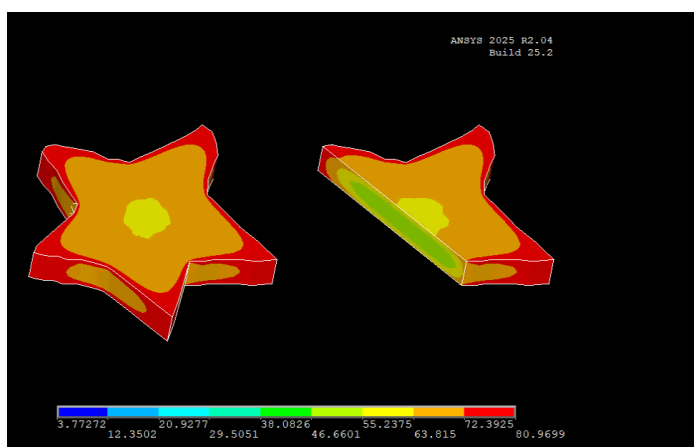
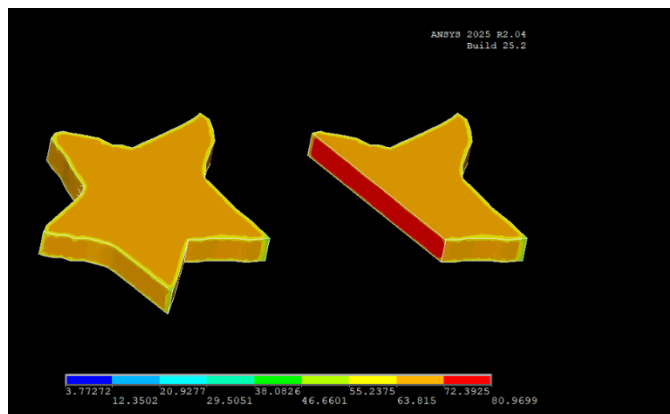
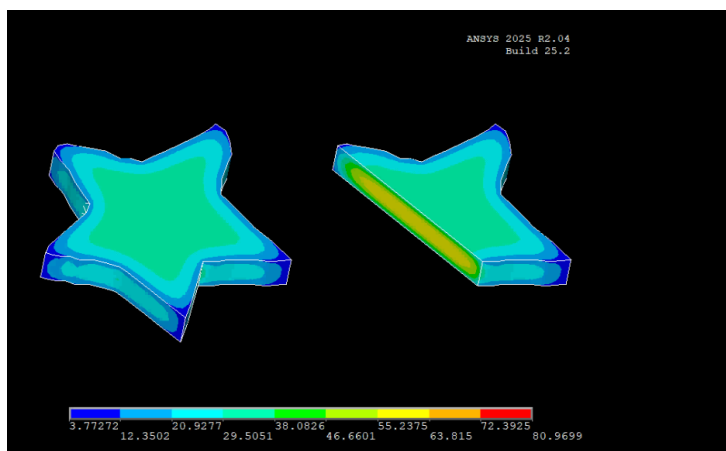


Figura 17. Perfil de temperatura en la etapa de calentamiento a 80.6 °C, con tiempo de (A) 1 s, (B) 20 s y (C) 60 s en rebanada completa y media rebanada de carambola al utilizar el modelo de elemento finito.

(A)



(B)



(C)

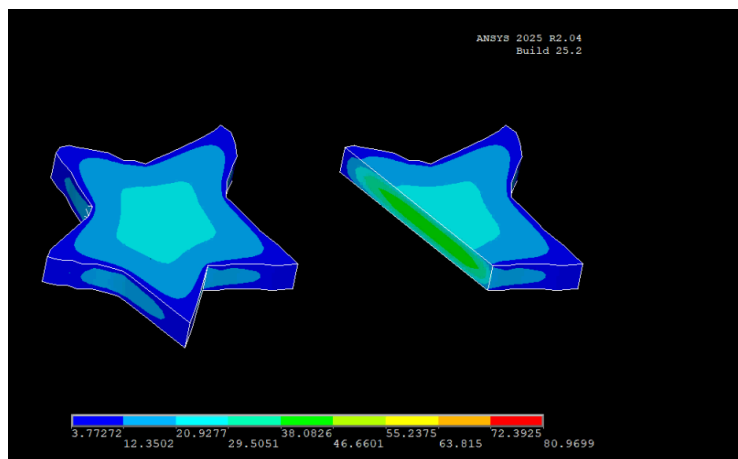


Figura 18. Perfil de temperatura en la etapa de enfriamiento a 3.6 °C, con tiempo de (A) 506 s, (B) 535 s y (C) 565 s en rebanada completa y media rebanada de carambola al utilizar el modelo de elemento finito.

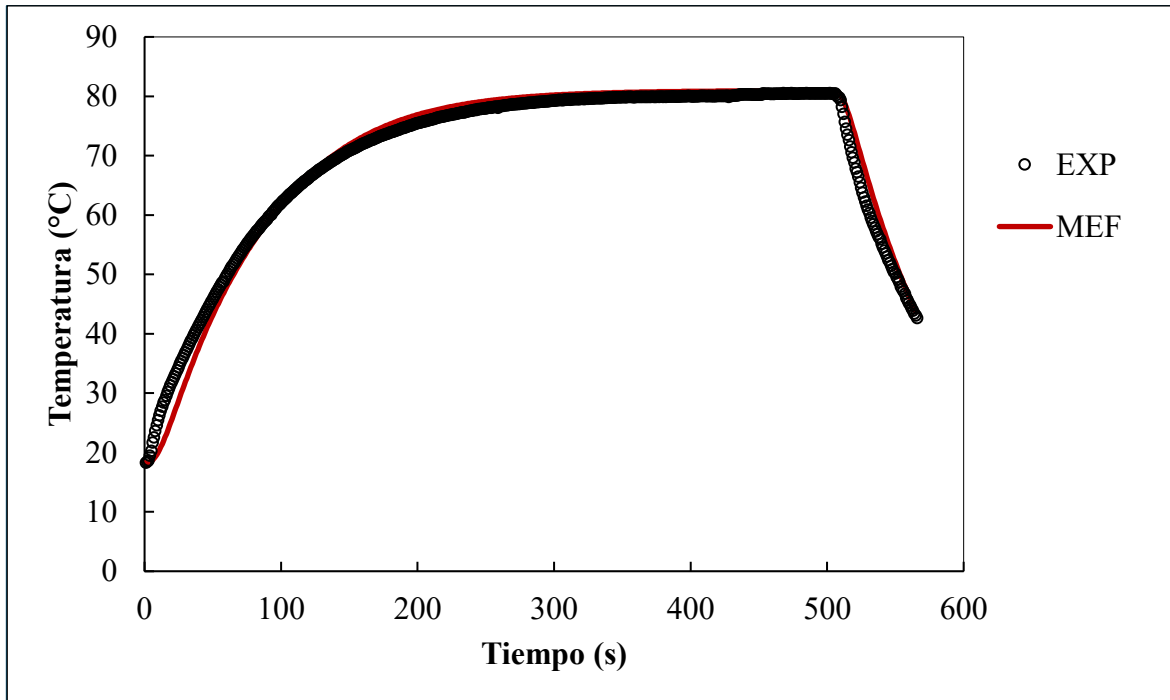


Figura 19. Historia de temperatura para rebanada de carambola estimada con el método de elemento finito y experimental.

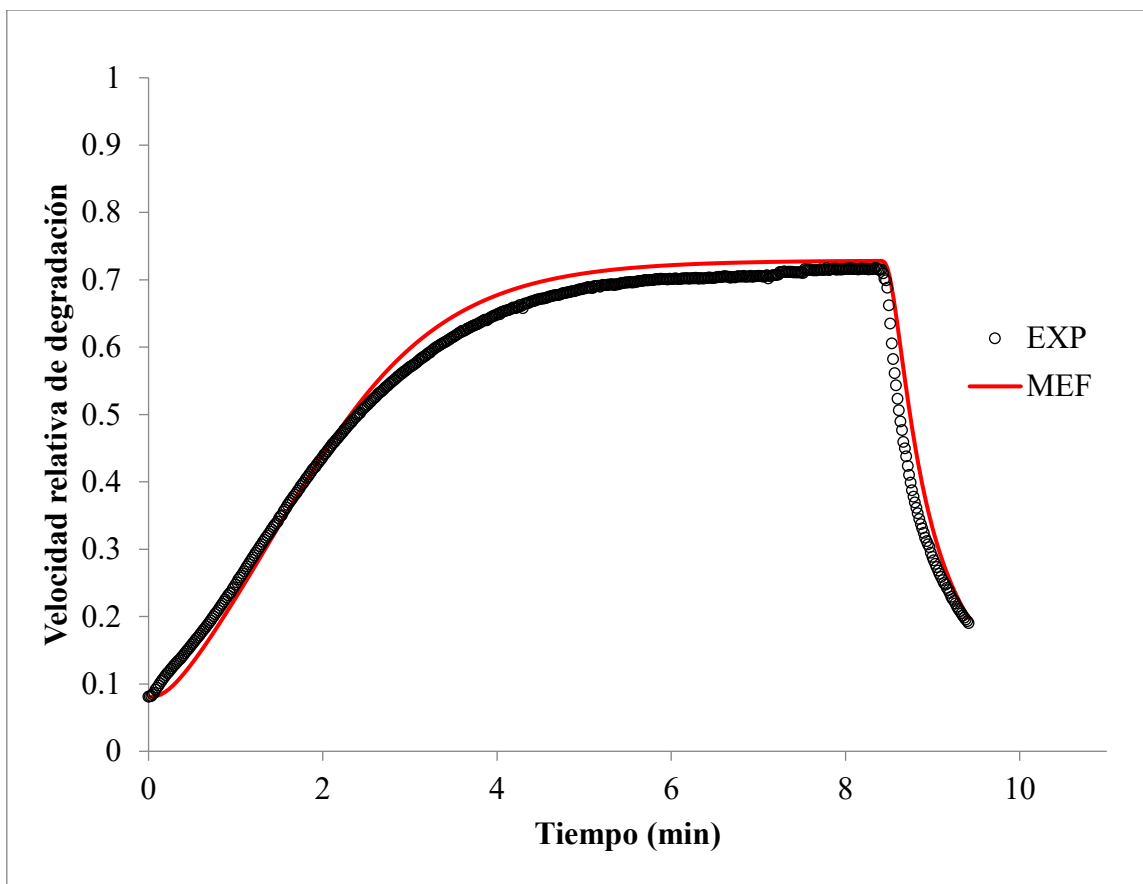


Figura 20. Gráfico de la velocidad de degradación de vitamina C para rebanadas de carambola escaldadas, calculada mediante la historia de temperatura simulada por el método de elemento finito (HTMEF) y con historia de temperatura experimental (HTE).

calculada con la historia de temperatura obtenida con el método de elemento finito y con la media de 3 réplicas de historias de temperatura experimental durante el escaldado de rebanadas de carambola. Bañuelos-Navarro (2020) reportó un tiempo de reducción decimal ($D_{90^{\circ}\text{C}}$) de 18.56 minutos y un parámetro de resistencia térmica (z) de 69.5°C para vitamina C en brócoli. En el presente estudio, se utilizaron dichos parámetros para predecir la retención de vitamina C durante el proceso de escaldado de rebanadas de carambola en agua a 80.6°C durante 8.4 minutos, seguido de un enfriamiento a 3.6°C durante 1 minuto. Al emplear la historia de temperatura experimental (HTE), la predicción de la retención de vitamina C fue de $52.3 \pm 1.13\%$, mientras que al utilizar la media de 3 réplicas de la historia de temperatura simulada con el método de elemento finito (HTMEF) fue de $51.4 \pm 0.46\%$.

M. PREDICCIÓN DE LA RETENCIÓN DE VITAMINA C

2. Predicción de retención de vitamina C

En la **Figura 20** se muestra el gráfico de la velocidad de degradación de la vitamina C, calculada con la historia de temperatura obtenida con el método de elemento finito y con la media de 3 réplicas de historias de temperatura experimental durante el escaldado de rebanadas de carambola. Bañuelos-Navarro (2020) reportó un tiempo de reducción decimal ($D_{90^{\circ}\text{C}}$) de 18.56 minutos y un parámetro de resistencia térmica (z) de 69.5°C para vitamina C en brócoli. En el presente estudio, se utilizaron dichos parámetros para predecir la retención de vitamina C durante el proceso de escaldado de rebanadas de carambola en agua a 80.6°C durante 8.4 minutos, seguido de un enfriamiento a 3.6°C durante 1 minuto. Al emplear la historia de temperatura experimental (HTE), la predicción de la retención de vitamina C fue de $52.3 \pm 1.13\%$, mientras que al utilizar la media de 3 réplicas de la historia de temperatura simulada con el método de elemento finito (HTMEF) fue de $51.4 \pm 0.46\%$.

1. Validación de la predicción de retención de vitamina C

El **Cuadro 8** presenta las predicciones de retención de vitamina C obtenidas a partir de la historia de temperatura experimental (HTE), la historia de temperatura simulada con el método de elemento finito (HTMEF) y la comparación con lo obtenido experimentalmente después del escaldado de rebanadas de carambola escaldadas a 80.6 °C por 8.4 minutos y enfriadas a 3.6 °C por 1 minuto. La retención de vitamina C experimental fue de 52.6 % $\pm$ 1.4 %.

Cuadro 8. Retención de vitamina C predicha mediante cálculos ingenieriles (HTE y HTMEF) y la obtenida experimentalmente para rebanadas de carambola escaldadas a 80.6 °C por 8.41 minutos.

Retención de vitamina C (%)		
Predicción con historia de temperatura experimental (HTE)	Predicción con historia de temperatura simulada con el método de elemento finito (HTMEF)	Experimental
52.3 ± 1.13	51.4 ± 0.46	52.6 ± 1.4

VIII. CONCLUSIONES

El proceso de escaldado tuvo un efecto significativo sobre la calidad química (reducción del contenido de oxalatos del 47 al 86%), nutrimental (RVC del 11 al 85 %), funcional (retención de *CA* del 10.6 al 94%) y enzimático (inactivar de la enzima polifenol oxidasa) de las rebanadas de carambola.

Las condiciones óptimas de escaldado fueron 80.6 °C y 8.4 min, lo que generó una reducción de 63 % en el contenido de oxalatos, una retención de 52.3 y 86.6 % de vitamina C y capacidad antioxidante, respectivamente; en dichas condiciones se mantienen características funcionales favorables del fruto. El tratamiento térmico optimizado logró la inactivación completa de la enzima polifenol oxidasa, lo que contribuye a disminuir las reacciones de pardeamiento enzimático y favorece la estabilidad de la calidad del producto durante su procesamiento y almacenamiento.

Las propiedades termofísicas determinadas experimentalmente permitieron describir adecuadamente el comportamiento térmico de la carambola durante el escaldado y constituyeron parámetros fundamentales para el desarrollo del modelo matemático. El modelo de transferencia de calor desarrollado mediante el Método de Elemento Finito representó satisfactoriamente la distribución e historia de temperatura en las rebanadas de carambola durante el tratamiento térmico.

La simulación térmica permitió predecir adecuadamente la retención de vitamina C, con una alta concordancia entre los resultados experimentales y los estimados por el modelo, ($R^2 = 0.988$).

Los resultados obtenidos demuestran que la simulación de transferencia de calor constituye una herramienta útil para predecir cambios nutrimentales durante el procesamiento térmico de alimentos, esto reduce la necesidad de realizar un elevado número de experimentos.

El proceso optimizado de escaldado representa una alternativa tecnológica viable para la industrialización de la carambola, al mejorar su calidad nutrimental mediante la reducción de compuestos potencialmente tóxicos y la conservación de compuestos bioactivos de interés.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- Abeysekera R., Wijetunge S., Nanayakkara N., Wazil A., Ratnatunga N., Jayalath T. y col. 2015. Star fruit toxicity: A cause of both acute kidney injury and chronic kidney disease: A report of two cases. BMC Research Notes 8:796. <https://doi.org/10.1186/s13104-015-1640-8>
- Andersson A., Gekas V., Lind I., Oliveira F., Oste R. 1994. Effect of preheating on potato texture. Food Science and Nutrition 34:229-251.
- Arapa P., Cahuana M. 2017. Efecto de la Temperatura y tiempo de escaldado en la capacidad antioxidante de la pulpa de cocona (*solanum sessiliflorum* dunal) y carambola (*averrhoa carambola*L.). [Tesis de licenciatura]. Perú: Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios. 91.
- Aristizabal J., Murillo E., Mendez J., Murillo W., Daza D. 2012. Composición química y cinética enzimática de la polifenol oxidasa de *Averrhoa carambola* L. en diferentes estados de maduración. Vitae, 19:S406-S408.
- Azarang M, García DF. 1996. Simulación y Análisis de Modelos Estocásticos. 1ª ed. Cd. de México, México: McGraw-Hill, 282p.
- Bañuelos-Navarro G. 2020. Determinación de los Parámetros Termocinéticos de Ácido Ascórbico en Brócoli (*Brassica oleracea* L.) [Tesis de licenciatura]. Culiacán, Sinaloa, México: Universidad Autónoma de Sinaloa.
- Pereira KB. 2011. Propriedades termofísicas e reológicas da polpa de carambola. (Relatório de Estágio Supervisionado) [Tesis de licenciatura]. Brasil: Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba. <https://dspace.sti.ufcg.edu.br/handle/riufcg/26415>

- Barman A., Goel R., Sharma M., Mahanta P. 2016. Acute kidney injury associated with ingestion of star fruit: Acute oxalate nephropathy. *Indian Journal of Nephrology*, 26:446–448. <https://doi.org/10.4103/0971-4065.175978>
- Bigelow W., Bohart G., Richardsdon, A., Ball C. 1920. Heat penetration in processing canned food. *Natl. Cannery Assoc. Bull*, No. 16 Washington DC: Lab Natl.
- Cengel Y. 2007. *Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico* 3ª ed. Nevada: McGraw Hill. 61-663 p.
- CEPAL. 2023. Economic survey of Latin America and the Caribbean: Financing a sustainable transition investment for growth and climate change action. <https://www.cepal.org/en/publications>
- Chai W., Liebman M. 2005. Effect of different cooking methods on vegetable oxalate content. *Journal of agricultural and food chemistry*, 53(8): 3027-3030. <https://doi.org/10.1021/jf048128d>
- Chang J., Hwang S., Kuo H., Tsai, J., Guh J., Chen H. 2000. Fatal outcome after ingestion of star fruit (*Averrhoa carambola*) in uremic patients. *American Journal of Kidney Diseases*, 35(2): 189–193. [https://doi.org/10.1016/S0272-6386\(00\)70325-8](https://doi.org/10.1016/S0272-6386(00)70325-8)
- Charley H. 2001. *Tecnología de alimentos*. 10ª reimpression. México: Edit. Limusa S. A. 123p
- Chen C., Fang H., Chou K., Wang J., Chung H. 2001. Acute oxalate nephropathy after ingestion of star fruit. *Am J Kidney Dis*. 37:418-22. doi:10.1053/ajkd.2001.21333.
- Crane J., y Balerdi C. 2015. *La carambola en Florida*. University of Florida. IFAS Extension
- Calderón G., Aguirre E. 2025. Determination of the enzymatic activity and the percentage of PPO inhibition in the carom sheets post-treated by blanching and osmodehydration. *Journal of Scientific and Technological Research Industrial*, 6(1):17-24. <https://doi.org/10.47422/jstri.v6i1.57>

- Calderón R. 2011. Determinación de la capacidad antioxidante total y concentración de fenoles totales en *Solanum americanum* sometida al proceso de escaldado, deshidratado y almacenamiento. [Tesis de Licenciatura] San Carlos Guatemala: Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad de San Carlos de Guatemala
- Cuastumal H., Valencia B., Ordóñez L. 2016. Efectos de los tratamientos térmicos en la concentración de vitamina C y color superficial en tres frutas tropicales. *Revista Lasallista de Investigación*. 13(1): 85 - 93.
- Derringer G., Suich R. 1980. Simultaneous optimization of several response variables. *Journal of Quality Technology*, 12:214-219.
- FAO. 2024. Principales frutas tropicales: Análisis del mercado. Resultados preliminares 2023. <https://www.fao.org/3/cb9034es/cb9034es.pdf>
- Ferrara L. 2018. *Averrhoa carambola* L: Is it really a toxic fruit? *International Journal of Medical Reviews*, 5(1), 2–5. <https://doi.org/10.29252/IJMR-050102>
- García C., Moyses-Neto M., Del Vecchio F., Oliveira J. A., dos Santos F. L., Castro O. W., y col. 2013. Elucidating the neurotoxicity of the star fruit. *Angewandte Chemie*, 52(49), 13067–13070. <https://doi.org/10.1002/anie.201305382>
- Gandhi K., Faldu P., Patel K., Solanki V., Kansara R., Singh S., Vyas T. 2018. Plant polyphenol oxidase: Biochemical properties and browning of fruits and vegetables. *Indian Journal of Agricultural Biochemistry*, 31(1), 1–8. <https://doi.org/10.5958/0974-4479.2018.00001.1>
- Geankoplis C., Hersel A., Lepek D. 2018. *Transport Processes and Separation Process Principles*. 5a edición. Estados Unidos de America: Prentice Hall 1248 p.

- Giannakourou M., Taoukis P. 2021. Effect of Alternative Preservation Steps and Storage on Vitamin C Stability in Fruit and Vegetable Products: Critical Review and Kinetic Modelling Approaches. *Foods* 10(11):n2630. <https://doi.org/10.3390/foods10112630>
- Gonzales W., Palacios M. 2003. Estudio farmacognóstico y actividad antiinflamatoria del fruto de *Averrhoa carambola* L. [Tesis de Licenciatura] Lima Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- González J., Hernández P., Gonzáles N., Maldonado N., Jiménez R. 2017. *Averrhoa carambola*: Recomendaciones de consumo y contraindicaciones. *Revista Iberoamericana de Ciencias* 4(5):29-38.
- Grajales L., Cardona W., Orrego C. 2005. Liofilización de la carambola (*Averrhoa carambola* L.) osmodeshidratada. *INGENIERIA Y COMPETITIVIDAD*. 7(2):19-26
https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/article/view/2514
- Góngora M. 2015. Secado osmo-convectivo con aire caliente de rodajas de carambolo (*Averrhoa Carambola* L.). [Tesis de Maestría] Santiago de Cali: UNIVERSIDAD DEL VALLE FACULTAD DE INGENIERÍA, ESCUELA DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS PROGRAMA ACADÉMICO DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA CON ÉNFASIS EN ALIMENTOS. 91 p. <https://hdl.handle.net/10893/8750>
- Gómez-Sánchez A., Cerón-Carrillo T., Rodríguez-Martínez V, Vázquez-Aguilar M. 2007. Aspectos tecnológicos de la congelación en alimentos. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 1:80-96.

- Herbland A., El Zein I., Valentino R., Cassinotto C., Meunier C., Rieux D., y col. 2009. Star fruit poisoning is potentially life-threatening in patients with moderate chronic renal failure. *Intensive Care Medicine*, 35(8): 1459. <https://doi.org/10.1007/s00134-009-1490-8>
- Herrera R., Paredes Y., Quispe-Paredes D., Zúñiga-Olaguibel M., Belizario-Ferrel J., Arapa-Puma A. 2022. Evaluación de la capacidad antioxidante en el escaldado de carambola (*Averrhoa carambola* L.). *Gentryana*, 1: 223. <https://doi.org/10.55873/gentryana.v1i2.223>
- Hillier FS, Lieberman GJ. 1989. Simulación, Cap. 23. En: *Introducción a la Investigación de Operaciones*. 2a ed, Cd. de México, México: McGraw-Hill. 312p
- Iribe-Salazar R., Caro-Corrales J., Hernández-Calderón O., Zazueta-Niebla J., Gutiérrez-Dorado R., Carrasco-Escalante M., Vázquez-López Y. 2015. Heat transfer during blanching and hydrocooling of broccoli florets. *Journal of Food Science*, 80(12):2774-2781.
- Iribe-Salazar R., Gutierrez-Dorado R., Ríos-Iribe E., Carrasco-Escalante M., Vázquez-López Y., Hernández-Calderón O., Caro-Corrales J. 2018. Modelado de la difusión efectiva de la cocción en tortilla de maíz. *Journal of Food Science*. 83:2167-2175.
- Ismail A., Marjan Z., Foong C. 2004. Total antioxidant activity and phenolic content in selected vegetables. *Food Chemistry*, 87(4):581–586. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.01.010>
- Jaiswal A., Gupta, S., Abu-Ghannam N. 2012. Kinetic evaluation of colour, texture, polyphenols and antioxidant capacity of Irish York cabbage after blanching treatment. *Food Chemistry*, 131(1):63–72. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.08.032>
- Kassie W., Washe A. P., Etsay H. 2019. Spectrophotometric determination of oxalic acid in dietary sources through catalytic titration with hexavalent chromium. *Food Science and Biotechnology*, 83:30-38.

- Kumar V., Irfan M., Datta A. 2019. Manipulation of oxalate metabolism in plants for improving food quality and productivity. *Phytochemistry*, 158:103-109.
- Kuskoski M., Asuro G., Troncoso A., Fett R., Mancini-Filho J. 2005. Aplicación de diversos métodos químicos para determinar capacidad antioxidante en pulpa de frutos. *Ciência e Tecnologia de Alimentos Campinas*, 25(4): 726-732.
- Laohasongkram K., Chaiwanichsiri S., Thunpithayakul C., Ruedeesarnt W. 1995. Thermal properties of mangoes. *Journal of the Science Society of Thailand*, 21(1):63-74.
https://www.researchgate.net/publication/263369893_Thermal_properties_of_mangoes#fullTextFileContent
- Libert B., Franceschi V. 1997. Oxalate in crop plants. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 35 (6): 926–938. <https://doi.org/10.1021/jf00078a019>
- Linn A., Lam Z. 2012. Antimicrobial and antioxidant activities of green and ripe fruits of *Averrhoa carambola*. *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*, 5(3):102-105.
- Liu F., Liao X., Wang Y. 2016. Effects of High-Pressure Processing with or without Blanching on the Antioxidant and Physicochemical Properties of Mango Pulp. *Food Bioprocess Technol* 9:1306–1316. <https://doi.org/10.1007/s11947-016-1718-x>
- Machado-Velasco K., Vélez-Ruiz J. 2008. Estudio de propiedades físicas de alimentos mexicanos durante la congelación y el almacenamiento congelado. *Revista mexicana de ingeniería química*, 7(1):41-54.
- Madera S., Ortega-Quintana F., López E., Pérez O. 2017. Determination of the Convective Heat Transfer Coefficient of the Blanching Process of Cucurbita maxima. *Información tecnológica*, 28(3):59-66. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642017000300007>

- Madrid A., Madrid J. 2001. Nuevo Manual de Industrias Alimentarias 3ª Edición. España: Edit. Mundi-prensa.175-178p.
- Massey L. 2007. Food oxalate: factors affecting measurement, biological variation, and bioavailability. *Journal of the American Dietetic Association.*;107:1191–1194. doi: 10.1016/j.jada.2007.04.007.
- Mataix F. 2011. Tabla de composición de alimentos (5ª ed.). Granada: Editorial Universidad de Granada, 13p. <https://www.fisterra.com/ayuda-en-consulta/dietas/alimentos-que-destacan-por-su-contenido-oxalatos/>
- Manrique V. 2002. Transferencia de calor. 2ª ed. México: OXFORD. 304 p.
- Mazzeo T., Paciulli M., Chiavarro E., Visconti A., Fogliano V., Ganino T., Pellegrini N. 2015. Impact of the industrial freezing process on selected vegetables – Part II. Colour and Bioactive Compounds, 75:89-97.
- Medeiros G., Silva C. 2018. La carambola causa neuropatologías y nefropatías. *Revista de Trabajos Académicos-Universo Recife*, 5(1): 17
- Medina C. 2012. Efecto de la dosis de irradiación UV-C y tiempo de almacenamiento sobre las características fisicoquímicas, microbiológicas, y antioxidantes en rebanadas de carambola (*Averrhoa carambola* L.), variedad Golden Star mínimamente procesada. *Pueblo Continente* 23(2):353-369.
- Mendoza R., Herrera A. 2012. Cinética de inactivación de la enzima peroxidasa, color y textura en papa criolla (*Solanum tuberosum* grupo phureja) sometida a tres condiciones de escaldado. *Revista Información Tecnológica*. 23(4):73- 82p
- Mercado M., de la Rosa C., Wall M., López D., Álvarez P. 2013. Compuestos polifenólicos y capacidad antioxidante de especias típicas consumidas en México. *Nutrición Hospitalaria*, 28(1): 36-46.

- Moreno S. 2019. Determinación del coeficiente de transferencia de calor convectivo (h) durante el proceso de enfriamiento por inmersión asistido con ultrasonido de alta intensidad por medio del planteamiento de una solución analítica. [Tesis de Licenciatura] Puebla: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. 81 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12371/15555>
- Mohsenin, N. 1986. Physical properties of plant and animal materials: Structure, physical characteristics and mechanical properties (2^a ed.). Nueva York: Breach Science Publishers. 703p
- Montgomery D. 2012. Design and analysis of experiments. 8a ed. New Jersey: John Wiley y Sons Inc. 752 p.
- Muñoz A., Ramos-Escudero F., Alvarado-Ortiz C., Castañeda, B., Lizaraso F. 2009. Evaluación de compuestos con actividad biológica en cáscara de camu camu (*Myrciaria dubia*), guinda (*Prunus serotina*), tomate de árbol (*Cyphomandra betacea*) y carambola (*Averrhoa carambola* L.) cultivadas en Perú. Revista de la Sociedad química del Perú, 75(4):431-438. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UEPU_e911768238e22e5501bf073ed5e0c6f2
- Murador D., Braga A., da Cunha D., de Rosso V. 2018. Alterations in phenolic compound levels and antioxidant activity in response to cooking technique effects: A meta-analytic investigation. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 58(2):169–177. <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1148103>
- Murillo E., Aristizábal J., Murillo W., Ibarz Ribas A., Méndez J., Solanilla J. 2017. Caracterización preliminar de la enzima polifenol oxidasa y comportamiento reológico del jugo de *Averrhoa carambola*. Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín. 70(1): 8099-8114 <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/61769/60331>

- Murillo T., Dávila R., Ríos M. 2014. Evaluación del contenido de vitamina C, taninos condensados y capacidad antioxidante después de un tratamiento a tres temperaturas de los frutos de carambola (*Averrhoa carambola* L.). In Anales Científicos. 75(2):370-379. Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://doi.org/10.21704/ac.v75i2.977>
- Murillo E., Dávila R., Ríos E. 2014. Cuantificación de vitamina C, taninos condensados y capacidad antioxidante en frutos de carambola (*Averrhoa carambola* L.) Después de un prensado. Anales Científicos, 75(2):389-394. <https://doi.org/10.21704/ac.v75i2.979>
- Muthu N., Lee S., Phua K., Bhore S. 2016. Nutritional, Medicinal and Toxicological Attributes of Star-Fruits (*Averrhoa carambola* L.): A Review. Bioinformation, 12(12):420–424. <https://doi.org/10.6026/97320630012420>
- Noonan S., Savage G. 2022. Effects of processing on oxalate contents in plant foods: A review. Journal of Food Composition and Analysis, 112: 104685. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104685>
- Novillo G. 2009. Desarrollo y evaluación física, química y sensorial de jugo de dos variedades de carambola (*Averrhoa carambola*) [Tesis de Licenciatura] Zamorano, Honduras: Escuela Agrícola Panamericana.
- Onwude D., Hashim N., Abdan K., Janius R., Che G. 2018. Investigating the influence of novel drying methods on sweet potato (*Ipomoea batatas* L.): Kinetics, energy consumption, color, and microstructure. Journal of Food Process Engineering, 41(4):E12686–E12697. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2018.12.006>
- Ordóñez-Santos L., Portilla M., Rodríguez D. 2013. Cinética de degradación térmica de vitamina C en frutos de guayaba (*Psidium guajava* L.). Revista Lasallista de Investigación. 10(2):44-51.

- Ordóñez-Santos L., Ospina M., Rodríguez D. 2013. Cinética de degradación térmica de vitamina C en frutos de guayaba (*Psidium guajava* L.). Revista Lasallista de Investigación, 10(2): 44-51. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-44492013000200006&lng=en&tlng=es.
- Pande R., Tyagi S., Vishwakarma S., Mandliya S. 2025. Dry microwave and hot water blanching of underutilized star fruit (*Averrhoa carambola*): A comparative assessment of quality attributes and sensory evaluation using chemometric approach. Food Physics, 2:100056.
- Peng J., Tang J., Barrett D., Sablani S., Anderson N., Powers J. 2017. Thermal pasteurization of ready-to-eat foods and vegetables: Critical factors for process design and effects on quality. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 57(14): 2970-2995.
- Perales-Sánchez X., Reyes-Moreno C., Gómez-Favela M., Gutiérrez-Dorado R. 2014. Incremento de la actividad antioxidante y del contenido total de fenoles y flavonoids mediante la optimización de las condiciones de germinación de las semillas de amaranto. Plant Food Human Nutrition 69:196-202.
- Petroski W., Minich D. 2024. Management Strategies for the Anti-nutrient Oxalic Acid in Foods: A Comprehensive Overview of Its Dietary Sources, Roles, Metabolism, and Processing. Food and Bioprocess Technology. 18:4280-4300. <https://doi.org/10.1007/s11947-024-03726-0>
- Pinchao Y., Andrade J., Osorio O. 2016. Procesamiento de Arvejas (*Pisum sativum*L.). Parte 4: Optimización del proceso de escaldado de Arvejas (*Pisum sativum* L.) variedades sureña y andina en base a la inactivación de peroxidasa. Información Tecnológica. 24(4): 43-52.

- Queiroz C., Lopes M., Fialho E., Valente-Mesquita V. 2008. Polyphenol oxidase: Characteristics and mechanisms of browning control. *Food Reviews International*, 24(4):361–375. <https://doi.org/10.1080/87559120802089332>
- Quispe-Herrera R., Paredes-Valverde Y., Quispe-Paredes D., Zúñiga-Olaguibel M., Belizario-Ferrel J., Arapa-Puma A. 2022. Evaluación de la capacidad antioxidante en el escaldado de carambola (*Averrhoa carambola* L.). *Gentryana*, 1(2):223. <https://doi.org/10.55873/gentryana.v1i2.223>
- Rahman, M., Chen X., Perera C. 1997. An improved thermal conductivity prediction model for fruits and vegetables as a function of temperature, water content and porosity. *Journal of Food Engineering* 31(2):163–170. Doi:10.1016/s0260-8774(96)00060-x
- Rapusas R., Driscoll R. 1995. Thermophysical properties of fresh and dried white onions slices. *Journal of Food Engineering*, 24:149-174. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(94\)P2640-Q](https://doi.org/10.1016/0260-8774(94)P2640-Q)
- Regier M., Knoerzer K., Schubert H. 2017. Introducing microwave-assisted processing of food. En M. Regier, K. Knoerzer, y H. Schubert (Eds.), *The Microwave Processing of Foods*. 2ª ed. Oxford: Elsevier. 1-22.. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100528-6.00001-2>
- Ríos D., Ríos S., Jiménez J. 2000. Simulación: métodos y aplicaciones 2ª ed. México: Alfaomega. 2005 p.
- Robertson G., Samaniego C. 1986. Effect of initial dissolved oxygen levels on the degradation of ascorbic acid and the browning of lemon juice during storage. *Journal of Food Science*, 51:184-187.
- Robles-Ozuna L., Goycoolea F., Silveira M., Montoya L. 2007. Uso del quitosano durante el escalado del nopal (*Opuntia ficus indica*) y efecto sobre su calidad. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 6(2):193-201.

- Rodríguez-Ramírez J., Méndez-Lagunas L., López-Ortiz A., Torres S. 2012. Densidad real y densidad aparente durante el proceso de secado de hortalizas y frutas: una revisión. *Revista de ciencia de los alimentos*. 77: R146-R154. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2012.02990.x>
- Sablani S., Rahman M. 2003. Uso de redes neuronales para predecir la conductividad térmica de los alimentos en función del contenido de humedad, la temperatura y porosidad aparente. *Food Research International*, 36:617-623.
- Saikia S., Mahnot N., Mahanta C. 2015. Optimisation of phenolic extraction from *Averrhoa carambola* pomace by response surface methodology and its microencapsulation by spray and freeze drying. *Food Chemistry*, 171:144–152. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.08.064>
- Samad T., ul Haque W., Rahim M., Iqbal S., Mitra P. 2017. The open urology & nephrology. *Open Urology & Nephrology Journal*, 10: 20–28. <https://doi.org/10.2174/1874303X01710010020>
- Sánchez M. 2019. Efecto hipoglucemiante del zumo del fruto de *Averrhoa carambola* (carambola) en *Rattus norvegicus* var. *Albinus* con diabetes mellitus inducida. [Tesis de Licenciatura] Perú: UNIVERSIDAD CATOLICA LOS ANGELES CHIMBOTE FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD ESCUELA PROFESIONAL DE FARMACIA Y BIOQUIMICA. 52 p. <https://hdl.handle.net/20.500.13032/11011>
- Schoeninger V., Coelho R., Crist D., Sampaio S. 2014. Processing parameter optimization for obtaining dry beans with reduced cooking time. *Food Science and Technology* 56:49-57.
- Shah A., Raut A., Baheti A., Kuchekar B. 2011. In vitro anthelmintic activity of leaf extract of *Averrhoa carambola* against *Pheretima posthuma*. *Pharmacologyonline*, 1:524–527.
- Singh, R. (1982). Thermal diffusivity in food processing. *Food Technology* 36(2):86-91.
- Singh R. y Heldman D. (2013). Introduction to food engineering. 5 a ed. New York: Elsevier. 892 p.

- Siller J., Muy R., Báez S., Garcia E., Araiza, L. 2004. CALIDAD EN FRUTOS DE CARAMBOLA (*Averrhoa carambola* L.). Revista Chapingo: Serie: Horticultura, 10(1):23-29. <https://hdl.handle.net/20.500.14330/PER01000231693>
- Sweat V. 1974. Experimental values of thermal conductivities of selected fruits and vegetables. Journal of Food Science, 39:1080–1083.
- Tavares R., Assis C., Lima P., Lima P. D., Lima, R., Damasceno K. 2022. Blanching Effect on the Quality and Shelf-Life Characteristics of Fresh Cowpea Grains (*Vigna unguiculata* L.). *Foods* (Basel, Switzerland), 11(9):1295. <https://doi.org/10.3390/foods11091295>
- Tse K., Yip P., Lam M., Choy B., Li F., Lui S., y col. 2003. Star fruit intoxication in uraemic patients: Case series and review of the literature. Internal Medicine Journal, 33(7):314–316. <https://doi.org/10.1046/j.1445-5994.2003.00402.x>
- Valero Y., Ineichen E. 2012. Efecto del procesamiento sobre la capacidad antioxidante de la ciruela criolla (*Prunus domestica*). Archivos Latinoamericanos de Nutrición, 62(4): 363-369. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-06222012000400007&lng=es&tlng=es.
- Verma S., Dhaneshwar S., Ramana M. V., Rawat A. K. 2018. Gas chromatography–mass spectrometry and high-performance thin-layer chromatography quantifications of some physiologically active secondary metabolites in *Averrhoa carambola* L. fruits. Journal of Planar Chromatography - Modern TLC, 31(3):207-212. <https://doi.org/10.1556/1006.2018.31.3.5>
- Wang H., Meng J., Raghavan G., Orsat V., Yu X., Liu Z. y col. 2022. Vacuum-steam pulsed blanching (VSPB) enhances drying quality, shortens the drying time of gingers by inactivating enzymes,

altering texture, microstructure and ultrastructure. LWT, 154:112714.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112714>

Wijaya S., Farida N., A0snar E. 2012. Sweet star fruit reduces blood pressure in normotensive subjects. Folia Medica Indonesiana, 48(4):198.

Wijayaratne D., Bavanthan V., de Silva M., Nazar, A., Wijewickrama E. 2018. Star fruit nephrotoxicity: A case series and literature review. Boston Medical Center Nephrology, 19(1), 288.
<https://doi.org/10.1186/s12882-018-1084-1>

Xiao H., Pan Z., Deng L., El-Mashad H., Yang X., Mujumdar A., y col. 2017. Recent developments and trends in thermal blanching. A comprehensive review. Information Processing in Agriculture, 4(2):101-127. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2017.02.001>

Yap H., Chen Y., Fang J., Huang C. 2002. Star fruit: A neglected but serious fruit intoxicant in chronic renal failure. DIALYSIS & TRANSPLANTATION, 31(8): 564-567
<https://www.researchgate.net/publication/289293070>

Yasawardene P., Jayarajah U., Zoysa I., Suranjit L. 2020. Mecanismos de toxicidad de la carambola (*Averrhoa carambola*): Toxicon, 187:198-202. <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2020.09.010>

Zambrano E., Yupanqui C. 2016. Diseño y construcción de un equipo para la determinación de la conductividad térmica de alimentos sólidos mediante el Método de Fitch modificado. [Tesis de Licenciatura] Huancayo, Perú: UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ FACULTAD DE INGENIERÍA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS. 100p.
<http://hdl.handle.net/20.500.12894/2127>

Zhang S. 2023. Recent advances of polyphenol oxidases in plants. International Journal of Molecular Sciences, 24(6):5476. <https://doi.org/10.3390/ijms24065476>

ABREVIATURAS

α	Difusividad térmica
ABTS	Ácido 2,2'-azinobis-(3-etilbenzotiazolin-6-sulfónico)
ABTS ⁺	Radical catiónico ABTS
AKI	Lesión renal aguda (Acute Kidney Injury)
AMPA	Ácido α -amino-3-hidroxi-5-metil-4-isoxazolepropiónico
AMPA-R	Receptor AMPA
AMPK	Proteína quinasa activada por monofosfato de adenosina
ANOVA	Análisis de varianza
β_0	Intercepto del modelo
β_i	Coefficiente lineal
β_{ii}	Coefficiente cuadrático
β_{ij}	Coefficiente de interacción
CA	Capacidad antioxidante
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
C ₂ H ₂ O ₄	Ácido oxálico
C ₂ O ₄ ²⁻	Ion oxalato
CKD	Enfermedad renal crónica (Chronic Kidney Disease)
CO	Contenido de oxalatos
CO ₂	Dióxido de carbono
SECIHTI	Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación
C_p	Capacidad calorífica específica
Cr ³⁺	Ión cromo (III)

$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$	Ion dicromato
DCPI	2,6-diclorofenolindofenol
DSC	Calorimetría diferencial de barrido
ΔE	Diferencia total de color
EDTA	Ácido etilendiaminotetraacético
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FTNA	Fracción de temperatura no alcanzada
GABA	Ácido γ -aminobutírico
H^+	Ion hidrógeno
h	Coefficiente convectivo de transferencia de calor
HCl	Ácido clorhídrico
HT	Historia de temperatura
HTMEF	Historia de temperatura mediante método de elemento finito
H_2SO_4	Ácido sulfúrico
ICM	Banda industrial, científica y médica
KAR	Receptor de kainato
k	Conductividad térmica
$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	Dicromato de potasio
KD2 Pro	Analizador de propiedades térmicas
K_2HPO_4	Fosfato dipotásico
LSD	Diferencia mínima significativa (Least Significant Difference)
MEF	Método de elemento finito
MHz	Megahertz
MnCl_2	Cloruro de manganeso

MSR	Metodología de superficie de respuesta
NMDA	N-metil-D-aspartato
PBS	Buffer fosfato salino
p_{LOF}	Significancia de falta de ajuste
PPO	Polifenol oxidasa
PVPP	Polivinilpolipirrolidona
q	Flujo de calor
q_x	Flujo de calor en dirección x
R^2	Coefficiente de determinación
ROS	Especies reactivas de oxígeno
rpm	Revoluciones por minuto
ρ	Densidad
RVC	Retención de vitamina C
SST	Sólidos solubles totales
TEAC	Capacidad antioxidante equivalente a Trolox
T_{∞}	Temperatura del fluido
T_s	Temperatura superficial
U	Unidad de actividad enzimática
UI	Unidades internacionales
UPR	Respuesta de proteínas desplegadas
UV-Vis	Ultravioleta-visible
VSPB	Vacuum Steam Pulse Blanching (Escaldado por pulsos de vapor al vacío)
x_1, x_2	Variables independientes
y	Variable respuesta

ANEXOS

ANEXO 1. Resultados experimentales de parámetros nutrimental, químico y funcional en el escaldado de rebanadas de carambola en las diferentes temperaturas y tiempos descritos en la metodología.

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	% RVC	CO	CA
73.7	3.9	85.3	4420	1807
91.3	3.9	49.9	3605	1421
73.7	13.1	52.0	2826	960
91.3	13.1	11.3	1157	246
70.0	8.5	85.1	3753	1296
95.0	8.5	16.7	1676	720
82.5	2.0	75.6	4346	2185
82.5	15.0	30.9	2047	592
82.5	8.5	46.7	2863	1983
82.5	8.5	49.1	2640	1903
82.5	8.5	49.0	2640	1876
82.5	8.5	47.7	3085	2095
82.5	8.5	51.8	2863	2065

ANEXO 2. Coordenadas de los puntos para modelar la rebanada de carambola en el programa de ANSYS, para el método de elemento finito.

Punto	x (m)	y (m)	Punto	x (m)	y (m)
1	0.002	0.023	29	0.045	0.0535
2	0.003	0.0225	30	0.0445	0.0565
3	0.005	0.022	31	0.044	0.057
4	0.007	0.022	32	0.0425	0.0585
5	0.009	0.021	33	0.041	0.057
6	0.012	0.021	34	0.038	0.055
7	0.015	0.02	35	0.0345	0.053
8	0.0175	0.019	36	0.031	0.051
9	0.019	0.0175	37	0.028	0.0495
10	0.023	0.013	38	0.0255	0.048
11	0.026	0.0095	39	0.023	0.049
12	0.03	0.005	40	0.021	0.049
13	0.032	0.01	41	0.018	0.051
14	0.0335	0.0145	42	0.014	0.052
15	0.035	0.019	43	0.0115	0.0525
16	0.0355	0.0205	44	0.01	0.053
17	0.0385	0.0205	45	0.008	0.0525
18	0.041	0.021	46	0.007	0.051
19	0.0465	0.021	47	0.008	0.0485
20	0.05	0.0205	48	0.0095	0.046
21	0.0545	0.021	49	0.0105	0.0425
22	0.051	0.026	50	0.0115	0.04
23	0.0475	0.03	51	0.013	0.0365
24	0.045	0.034	52	0.012	0.034
25	0.0415	0.039	53	0.01	0.032
26	0.042	0.043	54	0.0075	0.0295
27	0.044	0.048	55	0.005	0.027
28	0.045	0.05	56	0.003	0.025