



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

**Análisis de la transferencia simultánea de calor y masa
durante el horneado de rebanadas de zanahoria
(*Daucus carota* L.)**

TESIS

Que presenta

IBQ. EDOARDO GASTELUM CHAIREZ

Para obtener el Grado de

MAESTRO EN CIENCIA

Y

TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

Directores

DR. JOSÉ DE JESÚS CARO CORRALES

DRA. ROSALINA IRIBE SALAZAR



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

UAS-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 Atribución-No Comercial
Compartir Igual, 4.0 Internacional



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. Rosalina Iribe Salazar y la asesoría del Dr. Roberto Gutiérrez Dorado. Edoardo Gastelum Chairez recibió beca de CONAHCYT.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la **Universidad Autónoma de Sinaloa**, en especial a la **Facultad de Ciencias Químico Biológicas** por haberme permitido continuar con mis estudios y seguir formándome tanto académica, profesional y personalmente.

De igual manera, agradezco a mis **papás** por haberme apoyado en todo momento y estar presentes cuando los necesito. A mi **mamá, Yolanda Chairez Chavarín**, por haber confiado en mi en todo momento y siempre apoyarme en mis proyectos personales; a mi **papá, Ricardo Gastelum Zazueta**, por siempre haber guiado a nuestra familia de la mejor manera posible.

A **mis hermanos**, por haberme acompañado en la mayor parte de mi formación y ayudarme siempre en lo que necesité.

A mi director de tesis, **Dr. José de Jesús Caro Corrales**, quien me aceptó en su equipo de trabajo y siempre tuvo la paciencia y disposición de enseñarme diferentes temas, no solo de lo académico, sino también del tono humano. Por siempre recordarme las virtudes de mi ser y por todo lo aprendido durante el desarrollo de este proyecto.

A mi directora de tesis, **Dra. Rosalina Iribe Salazar**, quien estuvo dispuesta a apoyarme en todo momento y que siempre resolvía mis dudas de forma clara y amable. Agradezco la calidez de su trato para todos los integrantes del laboratorio y su pasión por la enseñanza. Agradezco también por todo el conocimiento compartido conmigo durante el desarrollo de este trabajo.

A mi asesor, **Dr. Roberto Gutiérrez Dorado**, con quien me tocó compartir bastante durante nuestra función como consejeros universitarios. Gracias doctor por siempre estar

dispuesto a escuchar cualquier situación que le planteara, así como a aclarar dudas acerca del proyecto.

A la **Dra. Yessica Viridiana Vázquez López** y al **Dr. Marco César Carrazco Escalante** por todo el apoyo brindado desde la licenciatura, por los consejos dados en todo momento y por hacer la estadía en el laboratorio aún más amena. Por estar siempre pendientes de mis avances en el proyecto y estar atentos a las necesidades que pudieran surgir durante su realización.

A mis amigos del laboratorio: **Ale, Benjamín, Feli, Jhair, Maday, Meli, Miriamsita, Oli, Reyna, Sofi y Vida**, quienes siempre me apoyaron durante mis estudios de posgrado. Agradezco su disposición para apoyarme en las dudas que surgían durante la realización del proyecto, el compartir conmigo sus conocimientos y, sin duda, hacer más llevaderas las horas de trabajo con buenas pláticas y risas.

A mi amiga **Greysel**, con quien tuve la oportunidad de compartir los estudios de la licenciatura y ahora también coincidir en el posgrado. Gracias por todos los intercambios de conocimiento, pláticas amenas y risas que nunca hicieron falta.

A mis amigos: **Alex, José Miguel, Key, Eduardo, Ken, Manuel, Daniel, Denisse y los Bros**, quienes siempre me han demostrado su cariño y apoyo en todo momento. Por siempre escucharme y animarme a seguir mis anhelos. Por hacerme saber lo importante que soy para ellos y alentarme a seguir creciendo. Los quiero mucho.

A **Emilio, Yanko, Guillermo, Sayra, Brisa, Mariana y Adriana**, con quienes coincidí nuevamente después de algunos años y, que sin duda, siempre me han mostrado que ellos ven al Edo que vale por quién es y no por sus éxitos ni por sus fracasos. Quienes siempre me han

dado un lugar donde puedo abrir mi corazón y han validado mi sentir. No cabe duda de que las buenas amistades no cambian aun con el pasar del tiempo. Gracias por siempre ser luz y hacerme ver que estoy rodeado de gente que me quiere y aprecia. Los quiero siempre.

A mis compañeros de generación, en especial a **Gamaliel, Pau y Karens**, gracias por hacer de estos dos años de estudio algo más suave con nuestras pláticas, sushis y por todo el apoyo brindado. Que seamos capaces de seguir creciendo en nuestros propios caminos y reencontrarnos para compartir nuevamente experiencias.

A los laboratorios amigos, por siempre tener la disposición de prestar los equipos y compartir técnicas que fueran necesarias para la realización del proyecto

A **Dios**, porque sin Él nada soy, por haberme prestado vida, salud y todo lo necesario para sacar adelante este proyecto que finalmente también es suyo.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE CUADROS	x
I RESUMEN.....	1
ABSTRACT	3
II INTRODUCCIÓN	5
III REVISIÓN DE LITERATURA	7
A ZANAHORIA.....	7
1 Generalidades	7
a Taxonomía	8
b Características botánicas.....	8
2 Importancia económica.....	11
a Producción mundial	11
b Producción nacional	11
3 Contenido nutrimental	11
a Vitamina C.....	13
b Carotenoides	16
4 Procesamiento de la zanahoria	19
B HORNEADO	19
C TRANSFERENCIA DE MASA.....	20

1 Difusión molecular en sólidos	20
a Difusión en sólidos porosos	20
2 Transferencia de masa en estado transitorio	21
a Transferencia de masa cuando la resistencia externa es despreciable	23
3 Cinética de transferencia de masa durante el horneado	25
D TRANSFERENCIA DE CALOR.....	25
1 Mecanismos de transferencia de calor	26
a Conducción	26
b Convección	27
c Radiación	27
2 Transferencia de calor en estado no estacionario	27
a Transferencia de calor al considerar las resistencias interna y externa	28
1) Placa infinita.....	28
b Transferencia de calor con resistencia interna despreciable.....	29
1) Método de parámetros concentrados.....	29
c Fuente lineal de calor	31
3 Propiedades termofísicas	32
a Difusividad térmica (α).....	32
b Conductividad térmica (k).....	32
c Densidad (ρ).....	33

d Capacidad calorífica específica (C_p).....	33
E TRANSFERENCIA SIMULTÁNEA DE CALOR Y MASA.....	34
F SIMULACIÓN.....	34
IV JUSTIFICACIÓN.....	37
V OBJETIVOS.....	38
A OBJETIVO GENERAL.....	38
B OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	38
VI MATERIALES Y MÉTODOS.....	40
A MATERIALES.....	40
1 Materia prima.....	40
B MÉTODOS.....	40
1 Variables fisicoquímicas.....	40
a Fracturabilidad.....	40
b Color y diferencia total de color.....	40
c Humedad.....	41
d pH.....	42
e Acidez titulable.....	42
f Sólidos solubles totales.....	42
2 Variable nutrimental.....	43
a Vitamina C.....	43

3	Variable nutracéutica.....	46
	a Carotenoides totales.....	46
4	Variable enzimática.....	48
	a Actividad de peroxidasa.....	48
5	Cinéticas de horneado.....	49
6	Variables ingenieriles de transferencia de masa.....	50
	a Contenido de humedad crítico.....	50
	b Densidad de flujo de masa y coeficiente local de transferencia de masa.....	50
	c Contenido de humedad en el equilibrio.....	51
	d Difusividad efectiva variable.....	51
	1) Función cuadrática del tiempo.....	51
	2) Función de la temperatura.....	54
7	Variables ingenieriles de transferencia de calor.....	55
	a Difusividad (α) y conductividad térmica (k).....	55
	b Densidad aparente (ρ).....	56
	c Capacidad calorífica específica (C_p).....	56
	d Coeficiente convectivo de transferencia de calor (h).....	56
8	Simulación de la transferencia simultánea de calor y masa.....	58
9	Validación de la predicción del contenido de humedad promedio.....	59
10	Métodos estadísticos.....	60

a	Contraste de variables de calidad de zanahoria horneada.....	60
b	Contraste de variables de calidad de zanahoria horneada respecto al fresco	60
c	Variables ingenieriles de transferencia de masa y transferencia de calor.....	60
VII RESULTADOS Y DISCUSIÓN		62
A Variables fisicoquímicas, nutrimental, nutracéutica y enzimática de zanahoria fresca		62
1	Variables fisicoquímicas.....	62
a	Fracturabilidad.....	62
b	Color	62
c	Humedad.....	62
d	pH	62
e	Acidez titulable	63
f	Sólidos solubles totales	63
2	Variable nutrimental	63
a	Vitamina C.....	63
3	Variable nutracéutica.....	63
a	Carotenoides totales.....	63
4	Variable enzimática	64
a	Actividad de peroxidasa.....	64
B Variables ingenieriles de transferencia de masa		64
1	Cinéticas de horneado de rebanadas de zanahoria.....	64

a	Contenido de humedad crítico (X_c).....	66
b	Densidad de flujo de masa (N_c)	67
c	Coefficiente local de transferencia de masa (k_Y)	70
2	Periodo de velocidad decreciente	73
a	Difusividad efectiva variable (D_e)	73
C	Variables ingenieriles de transferencia de calor	79
1	Propiedades termofísicas de zanahoria.....	79
a	Difusividad térmica (α)	79
b	Conductividad térmica (k)	79
c	Densidad aparente (ρ).....	82
d	Capacidad calorífica específica (C_p).....	84
2	Coefficiente convectivo de transferencia de calor (h)	84
D	Contraste de variables fisicoquímicas, nutrimental, nutracéutica y enzimática de zanahoria horneada respecto al fresco	86
a	Fracturabilidad	86
b	Color y diferencia total de color	89
2	Variable nutrimental	91
a	Vitamina C.....	91
3	Variable nutracéutica.....	91
a	Carotenoides totales.....	91

4 Variable enzimática	94
a Actividad de peroxidasa.....	94
E TRANSFERENCIA SIMULTÁNEA DE CALOR Y MASA	94
1 Validación de la transferencia simultánea de calor y masa	99
VIII CONCLUSIONES	100
IX BIBLIOGRAFÍA.....	102
ABREVIATURAS	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Descripción	Página
1	Diversidad de formas de zanahoria (<i>Daucus carota</i> L.).	10
2	Estructura química de la vitamina C.	15
3	Ruta de degradación de la vitamina C.	17
4	Principales carotenoides presentes en órganos y tejidos humanos.	18
5	Placa infinita con espesor $2L$ rodeada por una película de fluido.	24
6	Diagrama de los fenómenos de transporte durante el horneado de alimentos.	35
7	Efecto de la temperatura de trabajo sobre la cinética de horneado de zanahoria.	65
8	Densidad de flujo de masa (N_c) durante el horneado de rebanadas de zanahoria en función de la temperatura.	69
9	Coefficiente local de transferencia de masa (k_Y) durante el horneado de rebanadas de zanahoria en función de la temperatura.	71
10	Difusividad efectiva estimada y cinética de zanahoria experimental y simulada con D_e variable a 120 °C.	74
11	Difusividad efectiva estimada y cinética de zanahoria experimental y simulada con D_e variable a 130 °C.	75
12	Difusividad efectiva estimada y cinética de zanahoria experimental y simulada con D_e variable a 140 °C.	77
13	Difusividad térmica de zanahoria en función de la temperatura.	80

14	Conductividad térmica de zanahoria en función de la temperatura.	81
15	Densidad aparente de zanahoria en función de la temperatura.	83
16	Capacidad calorífica específica de zanahoria en función de la temperatura.	85
17	Gráfico de $\ln(FTNA)$ contra tiempo empleado para estimar el coeficiente convectivo de transferencia de calor.	87
18	Fuerza máxima de fractura para rebanadas de zanahoria fresca y horneadas a 120, 130 y 140 °C.	88
19	Gráfico de Arrhenius utilizado para estimar la D_e en función de la temperatura promedio del alimento y cinética de horneado experimental y predicha a 120 °C.	95
20	Gráfico de Arrhenius utilizado para estimar la D_e en función de la temperatura promedio del alimento y cinética de horneado experimental y predicha a 130 °C.	96
21	Gráfico de Arrhenius utilizado para estimar la D_e en función de la temperatura promedio del alimento y cinética de horneado experimental y predicha a 140 °C.	97

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Descripción	Página
1	Clasificación taxonómica de la zanahoria.	9
2	Producción de zanahoria por continente en al año 2021.	12
3	Composición química de la zanahoria.	14
4	Contenido de humedad crítico a diferentes temperaturas de horneado.	68
5	Variables ingenieriles de transferencia de masa durante el horneado de zanahoria.	72
6	Variables de color y diferencia total de color de zanahoria horneada.	90
7	Variable nutrimental de zanahoria horneada respecto al fresco.	92
8	Variable nutracéutica de zanahoria horneada.	93

I RESUMEN

El consumo de zanahoria y sus productos derivados han cobrado importancia ya que es reconocida como una fuente natural de antioxidantes. Por lo que se ha optado por la generación de botanas saludables al emplear la técnica de horneado; durante este proceso ocurren de manera simultánea los fenómenos de transferencia de calor y masa. El objetivo de este estudio fue simular la transferencia simultánea de calor y masa durante el horneado de rebanadas de zanahoria (*Daucus carota* L.) y evaluar el impacto del proceso en las variables de calidad. Se evaluó fracturabilidad (punción), color (colorimetría), humedad, pH (potenciometría), acidez titulable (titulación), sólidos solubles totales (refractometría), vitamina C, carotenoides totales y actividad de peroxidasa (espectrofotometría). Para la simulación de la transferencia de masa se determinó el contenido de humedad inicial (X_0 , gravimetría), contenido de humedad crítico (X_c , regresión lineal) y de equilibrio (X_∞), densidad de flujo de masa y coeficiente local de transferencia de masa (N_c y k_Y , calculado), semiespesor (L , vernier digital) y difusividad efectiva variable (D_e , función cuadrática del tiempo y función de la temperatura). Para analizar la transferencia de calor se determinaron las propiedades termofísicas: difusividad y conductividad térmica (α y k , fuente lineal de calor), densidad aparente (ρ , desplazamiento de volumen) y capacidad calorífica (C_p , calculada); además, se evaluó el coeficiente convectivo de transferencia de calor (h , parámetros concentrados). Se realizó el contraste de variables de calidad, al emplear un diseño completamente al azar con el factor temperatura (120, 130 y 140 °C) para las variables de respuesta: fracturabilidad, color, diferencia total de color, carotenoides totales y actividad de peroxidasa. Para la comparación de medias se aplicó la prueba de Fisher (*LSD*) con un $\alpha = 0.05$. Para el contraste con el fresco se empleó una prueba t de student con $\alpha = 0.05$, teniendo

como factor la condición de la hortaliza (fresca y horneada). Asimismo, se utilizó estadística descriptiva para las variables ingenieriles de transferencia de calor y masa. El X_0 varió de 7.8 a 8.4 kg H₂O/kg s.s., mientras que el X_c estuvo en el rango de 3.75 a 4.20 kg H₂O/kg s.s. La N_c se encontró entre 8.3×10^{-3} y 1.1×10^{-2} kg H₂O/m² s, variable que incrementó conforme se aumentó la temperatura de horneado. De igual manera, el k_Y aumentó de 2.36×10^{-1} a 2.6×10^{-1} kg H₂O/m² s ΔY al incrementar la temperatura de estudio. Al evaluar la D_e como función cuadrática del tiempo se encontró en los rangos de 7.67×10^{-12} a 2.23×10^{-9} , 7.92×10^{-11} a 2.71×10^{-9} y 9.07×10^{-11} a 3.62×10^{-9} m²/s, para 120, 130 y 140 °C, respectivamente. La α estuvo en un intervalo de 1.44×10^{-7} a 1.86×10^{-7} m²/s; k se encontró en un intervalo de 0.591 a 0.867 W/m K; ρ fue encontrada en un rango de 956 a 1105 kg/m³ y la C_p se obtuvo en un rango de 3710 a 3865 J/kg K. El h estimado fue de 37.1 W/m² K. Las variables de calidad presentaron diferencias entre las rebanadas frescas y horneadas. La energía de activación (E_a) estimada por subperiodos se encontró en los rangos de 6713 a 8, 4678 a 8 y 1806 a 7 kJ/mol, para el horneado de zanahoria a 120, 130 y 140 °C, respectivamente. Con la E_a calculada para cada subperiodo a las diferentes temperaturas de estudio se estimó la difusividad efectiva en función de la temperatura promedio del alimento al emplear la ecuación de Arrhenius, se obtuvieron los rangos entre 3.3×10^{-11} a 1.5×10^{-9} , 8.1×10^{-11} a 1.6×10^{-9} y 7.5×10^{-11} a 2.11×10^{-9} m²/s, a 120, 130 y 140 °C, respectivamente. Con dichas difusividades se estimó el contenido de humedad promedio para cada cinética de horneado y se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) mayor a 0.999 en todos los casos analizados. Esto permite estimar el contenido de humedad a diferentes tiempos de horneado, o bien, conocer el tiempo necesario para alcanzar un cierto contenido de humedad durante el horneado de rebanadas de zanahoria sin la necesidad de realizar la evaluación experimental.

ABSTRACT

The carrot consumption and derived products have gained importance since it is recognized as a natural antioxidant source. Therefore, an alternative for the generation of healthy snacks is the baking technique; during this process, heat and mass transfer occur simultaneously, which have an impact on the quality variables of the processed food. The objective of this study was to simulate the simultaneous heat and mass transfer during the baking of carrot (*Daucus carota* L.) slices and evaluate the impact of the process on quality variables. Fracturability (puncture), color (colorimetry), humidity, pH (potentiometry), titratable acidity (titration), total soluble solids (refractometry), vitamin C, total carotenoids, and peroxidase activity (spectrophotometry) were evaluated. For mass transfer simulation, the initial moisture content (X_0 , gravimetry), critical moisture content (X_c , linear regression), equilibrium moisture content (X_∞), the mass flux density and local mass transfer coefficient (N_c and k_Y , calculated), half-thickness (L , digital vernier) and variable effective diffusivity (D_e , quadratic function of time and function of temperature) were evaluated. To analyze the heat transfer, the thermophysical properties were determined: thermal diffusivity and thermal conductivity (α and k , linear heat source), apparent density (ρ , volume displacement), and heat capacity (C_p , calculated); in addition, the convective heat transfer coefficient (h , lumped capacity method) was evaluated. The contrast of quality variables was performed, using a completely randomized design with the temperature as factor (120, 130, and 140 °C) for the response variables: fracturability, color, total color difference, total carotenoids, and peroxidase activity. For the mean comparison, the Fisher test (*LSD*) was applied with an $\alpha = 0.05$. The contrast between the fresh and baked carrot slices was performed using a student's t test with $\alpha = 0.05$. Furthermore, descriptive statistic was used for the engineering variables of

heat and mass transfer. The X_0 ranged from 7.8 to 8.4 kg H₂O/kg d.s., while the X_c oscillated from 3.75 a 4.20 kg H₂O/kg d.s. The N_c changed from 8.3×10^{-3} and 1.1×10^{-2} kg H₂O/m²s, variable that increased as the baking temperature increased. Similarly, the k_Y varied from 2.36×10^{-1} to 2.6×10^{-1} kg H₂O/m² s ΔY while increasing the working temperature. When the D_e was evaluated as a quadratic function of time, it ranged from 7.67×10^{-12} to 2.23×10^{-9} , 7.92×10^{-11} to 2.71×10^{-9} , and 9.07×10^{-11} to 3.62×10^{-9} m²/s, for 120, 130, and 140 °C, respectively. The α varied from 1.44×10^{-7} to 1.86×10^{-7} m²/s; k ranged from 0.591 to 0.867 W/m K; ρ changed from 956 to 1105 kg/m³, and the C_p ranged from 3710 to 3865 J/kg K. The estimated h was 37.1 W/m² K. The quality variables showed differences between fresh and baked carrot slices. The activation energy estimated by subperiods fluctuated from 6713 to 8, 4678 to 8, and 1806 to 7 kJ/mol, for carrot baking at 120, 130, and 140 °C, respectively. With the calculated activation energy for each subperiod at the different studied temperatures, the effective diffusivity was estimated as a function of the food's average temperature by using the Arrhenius equation, obtaining the ranges from 3.3×10^{-11} to 1.5×10^{-9} , 8.1×10^{-11} to 1.6×10^{-9} , and 7.5×10^{-11} to 2.11×10^{-9} m²/s, for the baking temperatures of 120, 130, and 140 °C, respectively. With these diffusivities the average moisture content for each baking kinetics was estimated and a determination coefficient (R^2) above 0.999 was obtained in the three analyzed cases. This allows to estimate the moisture content at different baking times or to know the required time to reach a certain moisture content during the baking of carrot slices, without experimental evaluation.

II INTRODUCCIÓN

El consumo de zanahoria y productos derivados han incrementado en los últimos años, ya que en la actualidad es reconocida como una fuente natural de antioxidantes, lo que ha generado diversos beneficios para la salud. Además de poder ser consumida fresca en ensaladas, ésta puede ser transformada en productos con alto contenido nutrimental, como los son jugos, dulces o botanas (Sharma y col 2012).

En la actualidad, los consumidores buscan aperitivos que mantengan de mejor manera sus características de calidad, es decir, sean apetecibles para el público y que brinden beneficios para la salud (Álvarez 2018). Es por esto que se ha optado por buscar alternativas para la obtención de botanas saludables; más específicamente, se buscan procesos alternativos al freído, que a pesar de otorgar a los alimentos características especiales tanto de aroma como de sabor y además de alargar la vida de anaquel por la deshidratación y destrucción de microorganismos (Tirado y col 2015), presenta algunas desventajas como el aumento en contenido energético por la adición de grasas y propicia la rápida oxidación por las reacciones que ocurren entre la grasa y el oxígeno o la luz, lo que resulta en la generación de sabores desagradables para el consumidor (Fellows 2017). La técnica de horneado ha adquirido popularidad en los últimos años, ya que los alimentos horneados adquieren un buen sabor y desarrollan una corteza dorada por la deshidratación superficial del alimento, bondades que presenta de igual manera el freído; sin embargo, en el horneado no se necesita la adición de grasa, por consiguiente, es una alternativa saludable para la obtención de botanas (Nieto 2014).

Durante el horneado, así como en el secado, ocurre una transferencia simultánea de calor y de masa. Es por esto, que para la optimización de este tipo de procesos es preferible analizar tanto la transferencia de calor como la transferencia de masa (Kaya y col 2009).

Actualmente, no se ha analizado la transferencia simultánea de calor y masa durante el horneado de rebanadas de zanahoria, por lo tanto, es de interés analizar los resultados de este estudio y evaluar el impacto que tiene el proceso de horneado sobre las variables de calidad del alimento y de esta forma, comprender de mejor manera los cambios que ocasiona el proceso en el alimento. Es por ello que, el objetivo de este estudio es simular la transferencia simultánea de calor y masa durante el horneado de rebanadas de zanahoria (*Daucus carota* L.) y evaluar el impacto del proceso en las variables de calidad.

III REVISIÓN DE LITERATURA

A ZANAHORIA

1 Generalidades

La zanahoria (*Daucus carota* L.) es un cultivo con un amplio rango de variedades tanto fenotípicas como genotípicas, las cuales han empezado a ser estudiadas recientemente. De acuerdo con los registros de producción agrícola a nivel mundial, se considera uno de los 10 vegetales más producidos, es superado por el tomate, cebolla, calabaza, pepino y berenjena. En la actualidad, la zanahoria es cultivada a nivel mundial y ha mostrado una excelente adaptación a la producción en áreas templadas, entre estos lugares destacan Europa, Asia y América (Simon 2019).

Es una raíz vegetal de color naranja y textura leñosa. Se le considera una de las hortalizas con más beneficios para el organismo humano gracias al alto contenido de vitaminas y minerales. Se utiliza ampliamente en la preparación de diferentes platillos, entre los que se encuentran: guisados, sopas, ensaladas, también es empleado como guarnición para acompañar platillos con carne y pescado. Sus propiedades medicinales contribuyen al combate de dolores estomacales, problemas respiratorios y de riñón, anemia, estreñimiento, colesterol y cansancio. Posee de igual manera beneficios cosméticos, destacando: eliminación de signos de envejecimiento, piel grasa, acné y quemaduras solares (SADER 2016).

Actualmente, existe un gran número de variedades de zanahoria, presenta una gran diversidad de formas, colores y fecha de cultivo. Estas variedades se agrupan en diferentes tipos (Danvers, Imperator, Nantes, Touchon, Flakee, Amsterdam, París y Chantenay) (Simon y col 2008).

a Taxonomía

La zanahoria es una planta dicotiledónea perteneciente a la familia Apiaceae, la clasificación taxonómica se muestra en el **Cuadro 1**.

b Características botánicas

La zanahoria es una planta con temperatura de crecimiento óptima que se encuentra entre los 15 y 25 °C. La parte comestible es la raíz, compuesta por el floema y xilema, son de mayor calidad aquellas que poseen mayoritariamente floema, puesto que éste tiene una mayor capacidad de retención de carotenos y azúcares (Gaviola 2013).

Las primeras zanahorias fueron clasificadas en dos grupos basándose en el color de la raíz (morada o amarilla). Sin embargo, al introducirse la zanahoria naranja, se añadieron otras características para la clasificación, como la forma y el tamaño (Simon y col 2008). En la **Figura 1** se presentan algunas de las formas que puede adquirir la raíz de la zanahoria.

Para la clasificación de las zanahorias de acuerdo con la longitud pueden agruparse en largas, con longitudes mayores a 20 cm; medio largas, con un rango de longitud que abarca de 14 a 19 cm o cortas, con longitudes menores a los 14 cm. Si la división se efectúa de acuerdo con el espesor se obtienen tres grupos: chicas, con diámetros entre 10 a 19 mm; medianas, abarcan un rango entre 20 a 39 mm o grandes, con diámetros entre los 40 a 60 mm. Finalmente, si se clasifican en función de la forma se tienen cilíndricas, tronco cónicas o cónicas (Gaviola 2013).

Cuadro 1. Clasificación taxonómica de la zanahoria.

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	Apiales
Familia	Apiaceae
Género	<i>Daucus</i> L.
Especie	<i>carota</i> L.

Fuente: CONABIO s.f.

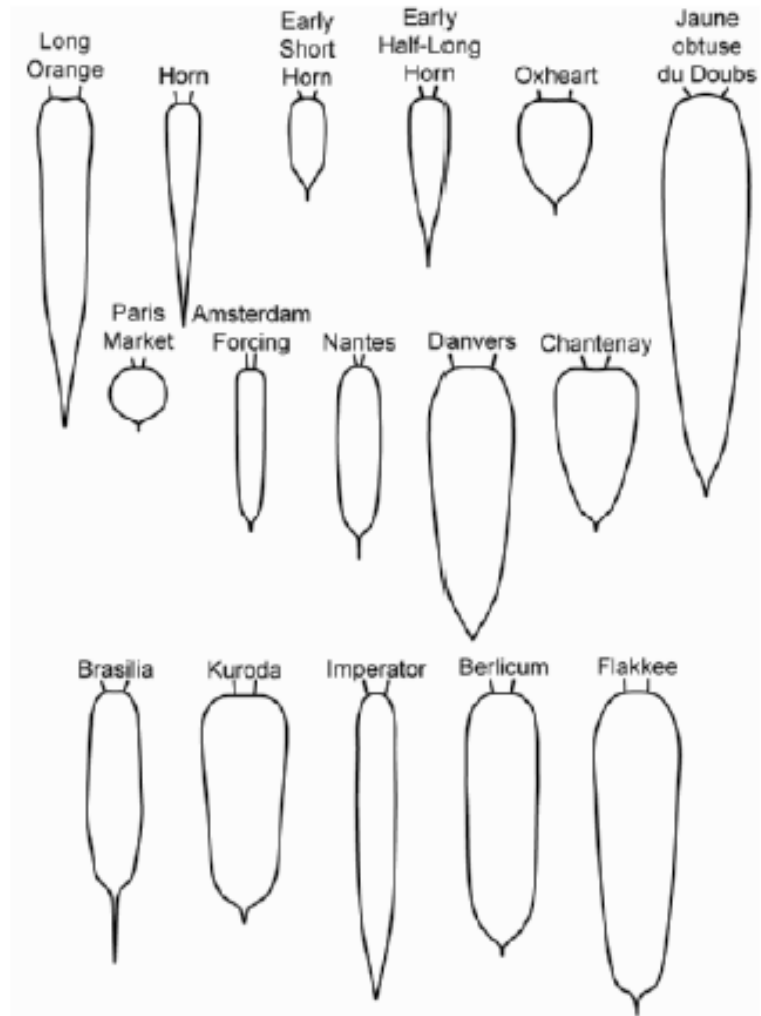


Figura 1. Diversidad de formas de zanahoria (*Daucus carota* L.) (Simon y col 2008).

2 Importancia económica

a Producción mundial

La producción mundial de zanahoria se ha elevado en los últimos años, por ende, ha aumentado el área de producción y el rendimiento, ha impactado a tal grado de lograr un incremento en producción total multiplicado por un factor de seis (Simon 2019).

En el año 2019, China obtuvo el primero lugar en producción, produjo el 55 % del total de zanahoria cultivada. Uzbekistán, obtuvo el segundo lugar (7 %) y Estados Unidos se posicionó en el tercer puesto (6 %) (FAOSTAT 2021). En el **Cuadro 2** se muestra la producción por continente del año 2021.

b Producción nacional

En el año 2020, México tuvo un incremento en la producción total de zanahoria con 361 080 toneladas de zanahoria, obtenidas de 12 112 hectáreas cosechadas, con un rendimiento de 29.8 toneladas por hectárea (SIAP 2020, FAOSTAT 2021).

En cuanto a la producción por estados, en el año 2020, Guanajuato encabezó la producción, aportó 88 782 toneladas, seguido de Puebla con 82 669 toneladas y en tercer puesto Zacatecas con 65 706 toneladas. Por otro lado, Sinaloa aportó 748 toneladas (SIAP 2020).

3 Contenido nutrimental

La zanahoria ocupa un lugar primordial cuando se refiere a la nutrición humana y en los últimos años ha incrementado el consumo gracias al alto contenido nutrimental y su bajo

Cuadro 2. Producción de zanahoria por continente en el año 2021.

Continente	Producción (t)
Asia	26 370 168
Europa	8 860 388
América	3 691 014
África	2 357 798
Oceanía	387 344

Fuente: FAOSTAT 2021

aporte energético. Entre estas propiedades destacan el alto contenido de antioxidantes, como lo son β -carotenos, α -carotenos y luteína (Wrzodak y col 2012). El β -caroteno es de gran importancia, pues la conversión a vitamina A se lleva a cabo con mayor rapidez, debido a esto, el consumo de zanahoria tiene importancia. Las zanahorias se consideran alimentos vitaminados por contener carotenos y vitamina C. También aportan proteínas, carbohidratos, azúcares y fibra (Raees-ul y Prasad 2015). En el **Cuadro 3** se presenta la composición química de la zanahoria.

a Vitamina C

La vitamina C es un compuesto soluble en agua que actúa como un potente antioxidante y protege contra las especies reactivas de oxígeno. También juega un papel importante en la unión de los aminoácidos que forman el colágeno. La ingesta diaria recomendada (*IDR*) es de 90 mg para hombres adultos y de 75 mg para mujeres adultas, que de no ser cumplida ocasiona la enfermedad conocida como escorbuto, implica consecuencias como desarrollo de lesiones en la piel y encías, debilitamiento de vasos sanguíneos (Mathews y col 2002).

Este nutrimento se encuentra en varios alimentos, principalmente los de origen vegetal. Usualmente se encuentra en un intervalo que va desde 10 a 100 mg A.A. / 100 g f.f., concentraciones que son mucho mayores que las de otras vitaminas (Linster y Schaftingen 2007). Algunas de las fuentes más conocidas de esta vitamina son: naranja, tomate y chiles (García-Closas 2004). Iribe-Salazar y col (2015) mencionan que el brócoli es una fuente importante de este nutrimento y diversos autores mencionan que la zanahoria, objeto de estudio de este estudio, es una hortaliza recomendada para el consumo de esta vitamina. En la **Figura 2** se muestra la estructura de la forma biológicamente activa de la vitamina C.

Cuadro 3. Composición química de la zanahoria (*Daucus carota* L.) por cada 100 g.

Componentes	Cantidad
Agua	88.3 g
Proteína	0.93 g
Grasa	0.24 g
Carbohidratos	9.58 g
Almidón	1.43 g
Calcio	33 mg
Hierro	0.3 mg
Fósforo	35 mg
Potasio	320 mg
Sodio	69 mg
Vitamina C	5.9 mg
Tiamina	0.066 mg
Riboflavina	0.058 mg
β -caroteno	8280 mg
α -caroteno	3480 mg
Vitamina A	16 700 UI

Fuente: USDA 2019

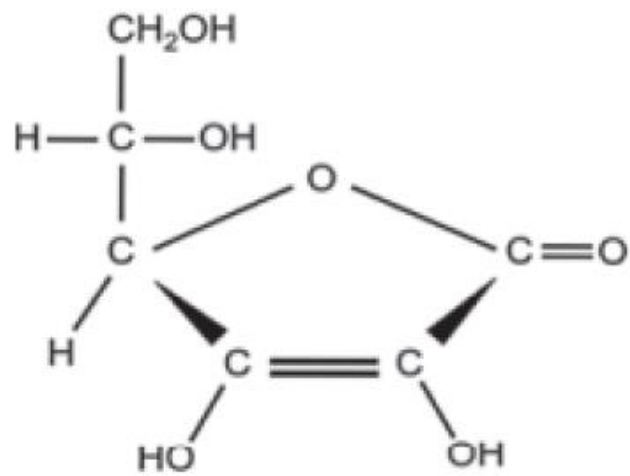


Figura 2. Estructura química de la vitamina C (Carpenter 2012).

La degradación de la vitamina C puede ocurrir en ambientes tanto aerobios como anaerobios. La degradación aerobia se caracteriza por la oxidación reversible del ácido ascórbico al ácido L-deshidroascórbico (*DHA*), seguido de una oxidación irreversible del *DHA* para generar ácido dicetogulónico (*DCG*), el cual no presenta actividad biológica. Este nutrimento también se ve afectado por el manejo postcosecha y las condiciones de almacenamiento que se les aplican a los frutos; estas pérdidas pueden incrementar por almacenamiento extendido, altas temperaturas, bajas humedades relativas, daños físicos y daño por frío (Mercali y col 2012). En la **Figura 3** se muestra la ruta de degradación de la vitamina C.

b Carotenoides

Carotenoides es un término general para englobar a los compuestos con base en el carbono que, por la presencia de dobles enlaces conjugados, aportan una coloración amarilla, roja o naranja. Estos pueden catalogarse como carotenoides hidrocarburos u oxigenados, depende de la presencia o ausencia de átomos de oxígeno en la estructura (Terao 2023).

Son considerados como nutrimentos exógenos para animales, ya que los animales no son capaces de sintetizarlos. Entre las principales fuentes de carotenoides se encuentran la zanahoria, calabaza, naranja y tomate (Terao 2023).

La importancia nutrimental radica en que, algunos carotenoides son precursores de la vitamina A, la cual provee beneficios para la salud del consumidor. Entre estos beneficios para la salud destacan las propiedades antioxidantes y antiinflamatorias, pues los carotenoides protegen ante la peroxidación de lípidos y el daño que pueden causar las especies reactivas de oxígeno (Eroglu y col 2023). En la **Figura 4** se muestran las estructuras de los seis principales carotenoides detectados en órganos del ser humano.

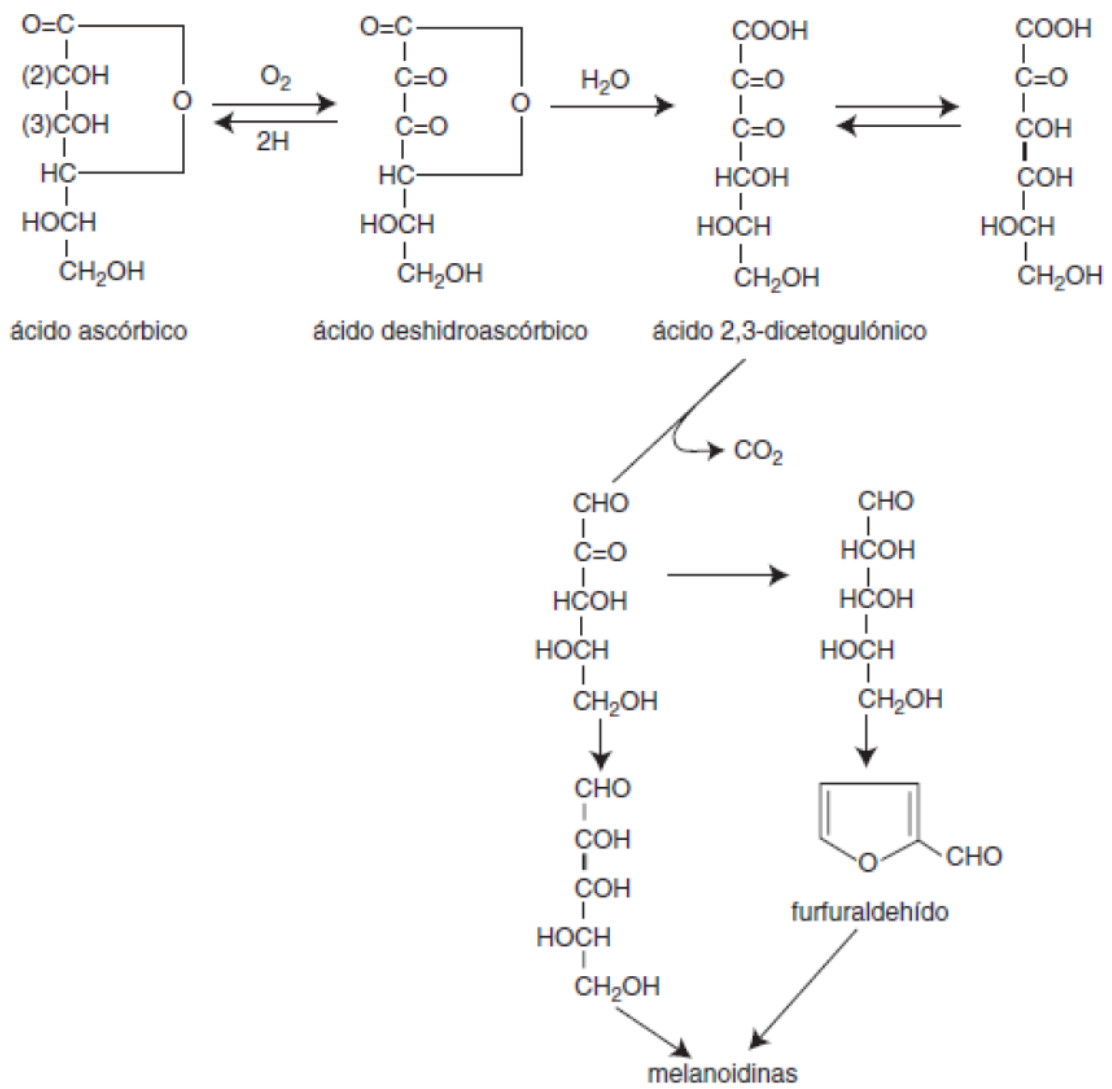


Figura 3. Ruta de degradación de la vitamina C (Badui 2006).

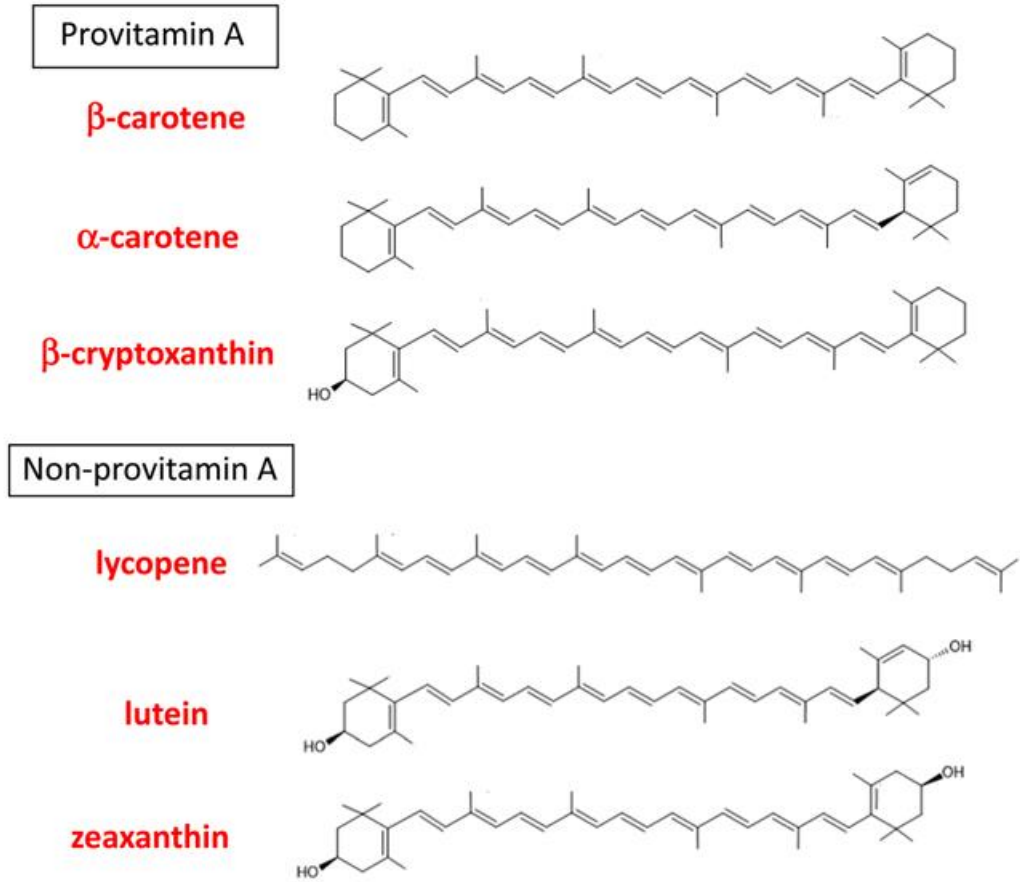


Figura 4. Principales carotenoides en órganos y tejidos humanos (Terao 2023).

4 Procesamiento de la zanahoria

La zanahoria es principalmente consumida de forma fresca, o bien, cocinada en diferentes platillos, entre los que se encuentran: guisados, sopas y ensaladas (SADER 2016). También es procesada en diferentes productos de valor agregado como lo son zanahorias enlatadas, jugo, dulces y botanas (Raees-ul y Prasad 2015).

B HORNEADO

El horneado es una técnica que consiste en someter un alimento a calor seco normalmente en un horno, pero puede realizarse con carbón o piedras calientes. Es utilizada mayormente para la preparación de panes, pasteles y galletas. Sin embargo, es empleado también para la preparación de botanas con base en diferentes frutas y hortalizas (Kaushik y col 2009).

Durante el horneado se emplea aire a alta temperatura con la finalidad de transferir calor, usualmente se utilizan temperaturas superiores a la temperatura de ebullición del agua, sin embargo, en ocasiones, el tiempo de horneado es mayor, pues la conductividad térmica del aire es pequeña. Los alimentos horneados adquieren un buen sabor y, en algunos casos, desarrollan una corteza dorada debido a la deshidratación superficial del alimento. Lo anterior también ocurre en el proceso de freído, sin embargo, en el horneado se tiene la ventaja de no incorporar grasa al alimento, es por ende más saludable (Nieto 2014).

En este proceso, al igual que en el secado, se ven involucradas la transferencia de calor y de masa, en estado inestable, de manera simultánea. Es por esto, que para la optimización de este tipo de procesos se recomienda analizar tanto la transferencia de calor como la de masa (Kaya y col 2009).

C TRANSFERENCIA DE MASA

La transferencia de masa se lleva a cabo cuando el componente de una mezcla migra en una misma fase o de una fase a otra, a consecuencia de la diferencia de concentración entre dos puntos (Geankoplis y col 2018).

1 Difusión molecular en sólidos

La difusión molecular, también conocida como transporte molecular, indica que ocurre una transferencia de moléculas individuales a través de un fluido por medio de los desplazamientos individuales y desordenados de las moléculas. Este fenómeno en sólidos puede clasificarse en dos tipos de difusión: la difusión que sigue la ley de Fick donde la estructura del sólido no tiene gran relevancia; y la difusión en sólidos porosos, que es aquella en la que la estructura real y los espacios vacíos del sólido revisten gran importancia (Geankoplis y col 2018).

a Difusión en sólidos porosos

Puesto que se trabaja con alimentos, los cuales son matrices complejas, interesan los sólidos porosos que tienen espacios vacíos interconectados que comprometen a la difusión. En caso de que los espacios vacíos estén totalmente llenos de agua en fase líquida, la concentración del soluto A en el agua en el punto 1 es X_{A_1} y en el punto 2 es X_{A_2} . Al difundirse en el agua por los conductos vacíos, el componente A sigue una trayectoria sinuosa desconocida que es mayor que $(x_2 - x_1)$ por un factor τ , llamado tortuosidad (Geankoplis y col 2018). Al emplear la ecuación para la difusión en estado estacionario del componente A en B, se obtiene (Iribe-Salazar 2018):

$$N_A = \frac{\varepsilon D_{AB} (X_{A_1} - X_{A_2})}{\tau (x_2 - x_1)} \quad (1)$$

donde ε representa la fracción de espacios vacíos, D_{AB} la difusividad de A en B y τ es la tortuosidad, un factor de corrección de la trayectoria, más larga que $(x_2 - x_1)$. En sólidos de tipo inerte, τ se encuentra en un rango de 1.5 a 5 (Geankoplis y col 2018). En algunos casos es conveniente combinar los términos en una expresión de difusividad efectiva (D_e , m²/s) (Iribesalazar 2018):

$$D_e = \frac{\varepsilon}{\tau} D_{AB} \quad (2)$$

2 Transferencia de masa en estado transitorio

Para alcanzar el estado estacionario, debe transcurrir un cierto tiempo una vez que da inicio el proceso de transferencia de masa para que desaparezcan las condiciones de estado no estacionario.

Para deducir la ecuación de difusión en estado estacionario en una dirección para la transferencia de masa se considera que la masa se difunde en dirección x en un cubo compuesto por un sólido cuyas dimensiones son Δx , Δy y Δz . La difusión en la dirección x se expresa en la siguiente ecuación:

$$N_A = -D_{AB} \frac{\partial X_A}{\partial x} \quad (3)$$

en donde el término $\partial X_A / \partial x$ es la velocidad de cambio de X_A con respecto a x cuando las otras variables (y y z) y tiempo t se mantienen constantes.

Al realizar un balance del componente A en términos molares sin considerar el término de generación, la velocidad de entrada ($N_A|_x \Delta y \Delta z$) y la velocidad de salida ($N_A|_{x+\Delta x} \Delta y \Delta z$) en mol s⁻¹ quedan representadas de la siguiente manera:

$$N_A|_x (\Delta y \Delta z) = -D_{AB} \frac{\partial X_A}{\partial x} \Big|_x (\Delta y \Delta z) \quad (4)$$

$$N_A|_{x+\Delta x} (\Delta y \Delta z) = -D_{AB} \frac{\partial X_A}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} (\Delta y \Delta z)$$

Por otro lado, la velocidad de acumulación para el volumen $(\Delta x \Delta y \Delta z)$ en m^3 es:

$$\text{Velocidad de acumulación} = (\Delta x \Delta y \Delta z) \frac{\partial X_A}{\partial t} \quad (5)$$

Al sustituir las Ecuaciones (5) y (6) en el balance del componente A antes mencionado y dividir entre el elemento volumen $(\Delta x \Delta y \Delta z)$, se obtiene:

$$D_{AB} \frac{\frac{\partial X_A}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} - \frac{\partial X_A}{\partial x} \Big|_x}{\Delta x} = \frac{\partial X_A}{\partial t} \quad (6)$$

Cuando Δx tiende a cero, se obtiene la segunda derivada parcial de la concentración del componente A con respecto a la posición $\partial^2 X_A / \partial x^2$. Al reacomodar la expresión, se obtiene la ley de la difusión de Fick con difusividad constante:

$$\frac{\partial X_A}{\partial t} = D_{AB} \frac{\partial^2 X_A}{\partial x^2} \quad (7)$$

Esta expresión relaciona la concentración con la posición (x) y el tiempo (t) (Geankoplis y col 2018). Sin embargo, el considerar una difusividad constante limita el modelo, ya que esta depende de diferentes factores, entre los que se encuentran: temperatura, contenido de humedad y estructura física (Farkas y col 1996).

Para una difusión al considerar las tres dimensiones, una deducción similar lleva a la expresión conocida como la segunda ley de Fick (Geankoplis y col 2018):

$$\frac{\partial X_A}{\partial t} = D_{AB} \left(\frac{\partial^2 X_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 X_A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 X_A}{\partial z^2} \right) \quad (8)$$

a Transferencia de masa cuando la resistencia externa es despreciable

Para que se considere que la resistencia interna es la que controla la velocidad de transferencia de masa en el periodo de velocidad decreciente, es necesario que la resistencia convectiva sea pequeña comparada con la resistencia total a la transferencia de masa ($Bi_m > 40$). Esto establece que la transferencia de masa en la película que rodea al sólido es rápida y, es por esto que todos los puntos dentro de la película se encuentran con el mismo contenido de humedad. Así, el contenido de humedad de la superficie X_s del sólido es constante y es igual al contenido de humedad del medio X_∞ en cualquier instante (Sakin y col 2007).

Cuando se trata de una placa infinita (**Figura 5**), es decir, cuando el espesor de la placa es pequeño comparado con el largo y ancho, la segunda ley de Fick para difusión en estado transitorio se describe por la siguiente ecuación (Sakin y col 2007):

$$\frac{\partial X_A}{\partial t} = D_{AB} \frac{\partial^2 X_A}{\partial x^2} \quad (9)$$

donde X_A corresponde al contenido de humedad (kg de agua/kg s.s.), D_{AB} es la difusividad de humedad (m^2/s), t es el tiempo (s) y x la distancia para la difusión (m).

Dicha ecuación se puede emplear para establecer el contenido de humedad de la placa en función de la posición y el tiempo, $X(x,t)$, siempre y cuando la condición inicial y las condiciones de frontera sean conocidas.

La variable x se obtiene al medirse desde el centro de la placa, se considera que tiene un espesor de $2L$ y la transferencia de masa es por ambas caras, por lo tanto, L representa la mitad del espesor de la placa. Se considera que el contenido de humedad X_0 es uniforme y que la placa se sumerge rápidamente en un fluido con contenido de humedad X_∞ constante. Puesto

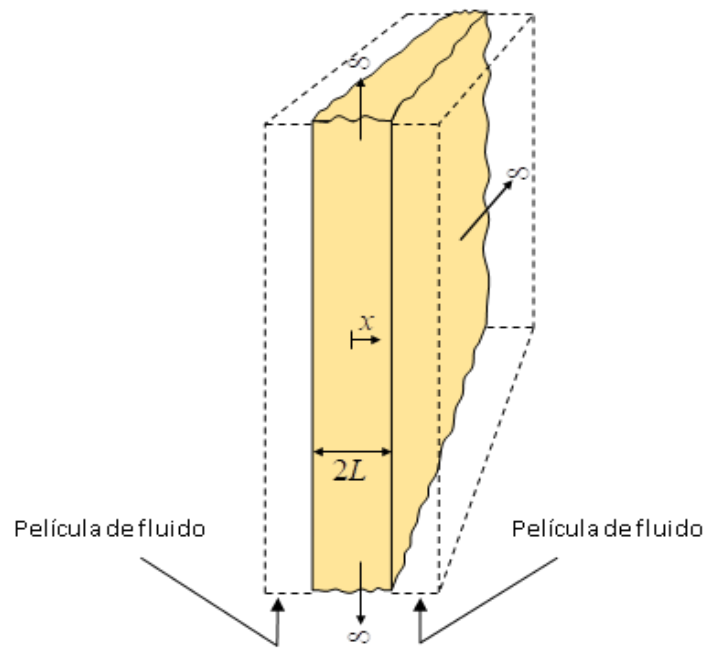


Figura 5. Placa infinita con espesor $2L$ rodeada por una película de fluido (Iribe-Salazar 2018).

que la resistencia convectiva es despreciable, la velocidad de transferencia de masa por convección en la película es elevada y el contenido de humedad X_s de la superficie será igual al contenido de humedad del medio X_∞ . La condición inicial y las de frontera son las siguientes:

$$\begin{aligned} X(x,0) &= X_0 \\ X(-L,t) &= X_\infty \\ X(L,t) &= X_\infty \end{aligned} \quad (10)$$

Por lo tanto, la solución a este sistema para el contenido de humedad promedio \bar{X} , es dada por la siguiente serie infinita (Crank 1975; Sakin y col 2007):

$$\frac{\bar{X} - X_\infty}{X_0 - X_\infty} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left[-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 D_e t}{4L^2}\right] \quad (11)$$

Esta ecuación supone que la difusividad efectiva (D_e) es constante, sin embargo, esto se presenta en raras ocasiones; además, ésta puede verse influenciada por el contenido de humedad y la temperatura (Sakin y col 2007).

3 Cinética de transferencia de masa durante el horneado

Durante el proceso de horneado es posible construir un gráfico del contenido de humedad respecto al tiempo, siempre y cuando se mantengan constantes las condiciones de proceso y se determine periódicamente el contenido de humedad en el alimento. Dicho gráfico permite establecer el tiempo necesario para hornear grandes lotes bajo las mismas condiciones de proceso (Treybal 2007; Iribe-Salazar 2018).

D TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor ocurre cuando dos objetos que están a temperaturas diferentes se ponen en contacto, el calor fluye desde el objeto de temperatura más elevada hacia el de

temperatura más baja. El flujo neto siempre se produce en el sentido de la temperatura decreciente. Existen diferentes mecanismos por los cuales puede tener lugar el fenómeno de la transferencia de calor: conducción, convección y radiación (McCabe y col 2007).

Durante cualquier proceso que involucre el calentamiento de alimentos es posible construir un gráfico de la temperatura en algún punto del alimento respecto al tiempo, siempre y cuando se mantengan constantes las condiciones de proceso y se determine periódicamente la temperatura del alimento. Dicho gráfico es conocido como historia de temperatura y permite comprender los cambios que ocurren en las variables de calidad del alimento durante el tratamiento térmico que se le aplique (Iribe-Salazar y col 2015).

1 Mecanismos de transferencia de calor

a Conducción

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes con menor energía, por las interacciones entre esas partículas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases (Cengel 2007). La conducción es representada por lo que hoy se conoce como ley de la conducción de calor de Fourier, cuya forma unidimensional es:

$$\dot{q}_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (12)$$

donde \dot{q}_x es la densidad de flujo de calor en la dirección x en W/m^2 , dT/dx es el gradiente de temperatura en la dirección x en K/m , y k es la conductividad térmica en W/m K .

b Convección

La convección es la transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que están en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección (Cengel 2007).

La ecuación que rige la transferencia de calor por convección fue expresada por Newton en 1701 y se le conoce como ley de enfriamiento o de calentamiento de Newton (Cengel 2007), la cual se muestra a continuación:

$$\dot{q} = h (T_s - T_\infty) \quad (13)$$

donde \dot{q} es la densidad de flujo de calor por convección en W/m^2 , T_s y T_∞ son las temperaturas de la superficie y el fluido, respectivamente, en K, y h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor en $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$.

c Radiación

Radiación es el término que se emplea para designar a la transferencia de energía a través del espacio por medio de ondas electromagnéticas (McCabe y col 2007). Ésta difiere de la conducción y la convección en cuanto a que no se requiere un medio físico para la transferencia. Los sólidos y los líquidos tienden a absorber la radiación que es transferida a través de ellos, por lo que la radiación es más importante en la transferencia a través del espacio o de gases (Geankoplis y col 2018).

2 Transferencia de calor en estado no estacionario

La transferencia de calor en estado no estacionario es importante debido al gran número de problemas de calentamiento y enfriamiento que existen en la industria (Geankoplis y col

2018). Durante la transferencia de calor transitoria, la temperatura normalmente varía tanto con el tiempo como con la posición (Cengel 2007).

a Transferencia de calor al considerar las resistencias interna y externa

Estos modelos se aplican para diferentes geometrías, entre las que se encuentran placa, esfera y cilindro infinito. En este estudio se trabajará con la geometría de placa plana.

1) Placa infinita

La ecuación de campo de Fourier para una placa infinita es:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (14)$$

donde $\alpha = k/(\rho C_p)$ es la difusividad térmica de la placa. Esta ecuación puede usarse para establecer la temperatura como una función de la posición dentro de la placa y el tiempo $T(x,t)$, una vez que la condición inicial y las condiciones de frontera sean conocidas. Se asume que, al inicio del proceso, la placa se encuentra a una temperatura uniforme T_0 y que la temperatura del medio se mantiene a T_∞ . En cualquier instante, la simetría del perfil de temperatura requiere que no haya gradiente de temperatura en el centro de la placa. La transferencia de calor por conducción que llegue desde el interior a la superficie de la placa debe ser igual a la transferencia de calor por convección desde esta superficie hacia el medio. El espesor de la placa es $2L$ y la variable x se mide desde el centro. Así, la condición inicial y las de frontera serán:

$$T(x,0) = T_0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = 0 \quad (16)$$

$$-k \frac{\partial T(L,t)}{\partial x} = h[T(L,t) - T_\infty] \quad (17)$$

El número de Biot es: $Bi = \frac{hL}{k}$. La solución analítica es:

$$\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \operatorname{sen} \lambda_n \cos\left(\lambda_n \frac{x}{L}\right)}{\left(\lambda_n + \operatorname{sen} \lambda_n \cos \lambda_n\right)} e^{-\lambda_n^2 \frac{\alpha t}{L^2}} \quad (18)$$

donde los valores propios λ_n satisfacen la ecuación $\lambda_n \tan \lambda_n = Bi$.

b Transferencia de calor con resistencia interna despreciable

1) Método de parámetros concentrados

En esta situación se considera un sólido que tiene una conductividad térmica muy elevada o una resistencia interna a la conducción muy baja, en comparación con la resistencia de la superficie externa, donde ocurre una transferencia por convección del fluido externo a la superficie del sólido. Puesto que la resistencia interna es muy baja, la temperatura dentro del sólido es esencialmente uniforme en cualquier tiempo del proceso (Geankoplis y col 2018).

Si se aplica la primera ley de la termodinámica a todo el cuerpo, el calor disipado por convección en cualquier instante se refleja en una disminución de la energía interna (Manrique 2002). En forma analítica se tiene que,

$$hA(T - T_\infty) = -\rho V C_p \frac{dT}{dt} \quad (19)$$

donde, h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor, en $\text{W/m}^2 \text{K}$; A es el área del cuerpo donde se intercambia calor por convección, en m^2 ; ρ es la densidad del material que constituye el sistema, en kg/m^3 ; V es el volumen del sistema, en m^3 ; C_p es la capacidad

calorífica específica del material que constituye el sistema, en J/kg K; T es la temperatura del sistema, en °C y T_∞ es la temperatura del fluido, en °C. Al integrar entre los límites $T = T_0$ cuando $t = 0$ y $T = T$ cuando $t = t$,

$$\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = e^{\left(-\frac{hA}{\rho V C_p} t\right)} \quad (20)$$

Esta expresión proporciona la temperatura en función del tiempo para un cuerpo que inicialmente se encuentra a una temperatura T_0 , situado en un ambiente convectivo a una temperatura constante.

El cociente entre las resistencias térmicas conductiva y convectiva puede escribirse como:

$$\frac{R_{conducción}}{R_{convección}} = \frac{\frac{L}{k}}{\frac{1}{h}} = \frac{hL}{k} \quad (21)$$

el parámetro adimensional hL/k lleva por nombre número de Biot. En este número adimensional, L es la longitud característica para la conducción de calor. De lo anterior se desprende que las diferencias de temperaturas en el interior del sistema son pequeñas en relación con la caída de la temperatura en la interfase cuando el número de Biot es pequeño. Por ello, se puede decir que si el número de Biot es menor a 0.1, aproximadamente, la temperatura en el interior de un cuerpo depende principalmente del tiempo (Manrique 2002). Se ha encontrado, para las formas geométricas más sencillas como placas, cilindros y esferas, que sí el $Bi < 0.1$, el error que se introduce al suponer que la temperatura es uniforme, es menor que 5 %, por lo tanto, se debe analizar el número de Biot al utilizar el método de parámetros concentrados (Cengel 2007).

c Fuente lineal de calor

La conducción de calor en estado no estacionario en el interior de un material sólido se puede determinar mediante el incremento de temperatura de una fuente lineal de calor sumergida en él. Para esto, se utiliza una sonda dual, la cual consiste en dos tubos delgados de acero, separados por 6 mm, cada uno con un sensor de temperatura en el interior (Gil-Gaxiola 2022). Esta técnica se conoce como método de la fuente lineal de calor o método de la sonda (Mohsenin 1980). Para utilizar este método se parte de dos condiciones: la primera, es que al inicio del proceso la temperatura del sólido es uniforme, por lo que no existe gradiente de temperatura dentro de él y la segunda, que la fuente de calor proporciona una transferencia de calor constante por unidad de longitud Q_L , la cual es también uniforme a lo largo de la sonda de prueba. Debido a que el sólido se considera infinito, el gradiente de temperatura en la parte exterior del sólido es cero, es decir, la transferencia de calor es tan lenta que el extremo del sólido no cambia de temperatura en ningún instante (Murakami y col 1996). En el método se emplean las siguientes ecuaciones y se realiza un análisis de regresión no lineal para conocer los parámetros b_0 , b_1 y b_2 .

$$\frac{4\pi(T - T_0)}{Q_L} = b_0 t + b_1 E_i \left(\frac{b_2}{t} \right) \quad (22)$$

$$\frac{4\pi(T - T_0)}{Q_L} = b_0 t + b_1 \left[E_i \left(\frac{b_2}{t} \right) - E_i \left(\frac{b_2}{t - t_h} \right) \right] \quad (23)$$

El método de la fuente lineal de calor se puede emplear para determinar la conductividad y difusividad térmica de materiales con k y α inferiores a 2.0 W/m K y 1×10^{-6} m²/s, respectivamente. Se puede trabajar con temperaturas de hasta 600 °C y la exactitud del método

es $\pm 5 \%$ (Davis 1980). El incremento de temperatura de la fuente lineal de calor en un lapso máximo de 20 min no debe exceder a $5 \text{ }^\circ\text{C}$.

3 Propiedades termofísicas

a Difusividad térmica (α)

La difusividad térmica de un material se puede concebir como la razón entre el calor conducido a través del material y el calor almacenado por unidad de volumen. Un material que tiene una alta conductividad térmica o una baja capacidad calorífica tiene una gran difusividad térmica. Entre mayor sea la difusividad térmica, más rápida es la propagación del calor hacia el medio (Cengel 2007). Se puede definir mediante la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (24)$$

En materiales con difusividades térmicas inferiores a $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, esta propiedad se puede obtener con el método de la fuente lineal de calor (Davis 1980).

b Conductividad térmica (k)

La conductividad térmica de un material se puede definir como la razón de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura. La conductividad térmica de un material es una medida de la capacidad del material para conducir calor. Una elevada conductividad térmica indica que el material es un buen conductor del calor y una baja indica que es un mal conductor o que es un aislante (Cengel 2007).

c Densidad (ρ)

La densidad de los alimentos sólidos puede determinarse por un método de desplazamiento, ya sea en aire o líquido (Mohsenin 1986), cuando se emplea líquido solamente se requiere de material general de laboratorio. En este método, la muestra es sumergida en agua hasta cubrirla por completo, se puede medir la cantidad de agua desplazada por la muestra, o bien, el volumen. El medio de desplazamiento líquido puede ser agua; sin embargo, para materiales menos densos que el agua se recomienda usar líquidos como tolueno. También se puede recubrir las muestras con una capa delgada de parafina líquida, con lo que se impide la entrada de agua a los espacios vacíos del alimento (Rapusas y Driscoll 1995). Para alimentos sólidos porosos existen los conceptos de densidad real y densidad aparente. La densidad real es la relación de la masa de un material y el volumen real, se excluye el volumen de los poros internos. La densidad aparente se refiere al volumen del material, incluye los poros internos.

d Capacidad calorífica específica (C_p)

La capacidad calorífica específica representa la cantidad de calor necesaria para cambiar la temperatura de un material. Se utiliza el símbolo C_p para designar la capacidad calorífica específica a presión constante, aplica para la mayoría de los procesos de calentamiento o enfriamiento en alimentos. Al igual que la conductividad térmica, la C_p de alimentos depende de la composición de éste, principalmente de la humedad. Entre las metodologías existentes para determinar capacidad calorífica específica de alimentos, la técnica de calorimetría diferencial de barrido es la más empleada para evaluar el efecto de la temperatura, porque permite manejar un amplio intervalo de temperaturas en una sola determinación.

E TRANSFERENCIA SIMULTÁNEA DE CALOR Y MASA

En el procesamiento de alimentos es de vital importancia el transporte de energía y de masa a través de diferentes interfaces. Durante estos procesamientos la microestructura de los alimentos se ve modificada, lo que tiene como consecuencia un cambio en la manera en que el agua migra del interior del alimento hacia la superficie. Debido a que la manipulación de alimentos involucra tanto reacciones químicas como el transporte de diferentes especies, se dice que los diferentes procesos dependen de la temperatura, un ejemplo de lo anterior es que el calentamiento tiene una gran influencia en la velocidad de secado (Sablani y col 2006).

El intercambio de especies a nivel microestructural se ve controlado por los procesos de transferencia de masa. A la vez, las variables ingenieriles de transferencia de masa se ven afectadas por la temperatura. Cuando la evaporación ocurre a gran escala, los procesos de transferencia de masa se acoplan con la transferencia de calor, ocurren entonces de manera simultánea (Sablani y col 2006).

En la **Figura 6** se exhibe un diagrama acerca de los procesos de transferencia de calor y masa que ocurren durante el horneado de alimentos.

F SIMULACIÓN

La simulación hace referencia al uso de un modelo de sistemas, que busca acercarse a las características de la realidad, con el fin de reproducir las operaciones reales. Funge también como una representación de un proceso real, mediante el empleo de un modelo o sistema que reaccione de manera similar a la que reaccionaría uno real, en un conjunto de condiciones de proceso dadas (Bolaños 2014). La simulación consiste en el desarrollo de un modelo matemático de un sistema, por medio del cual se obtiene una reproducción de la operación de un proceso real a través del tiempo (Azarang y García 1996).

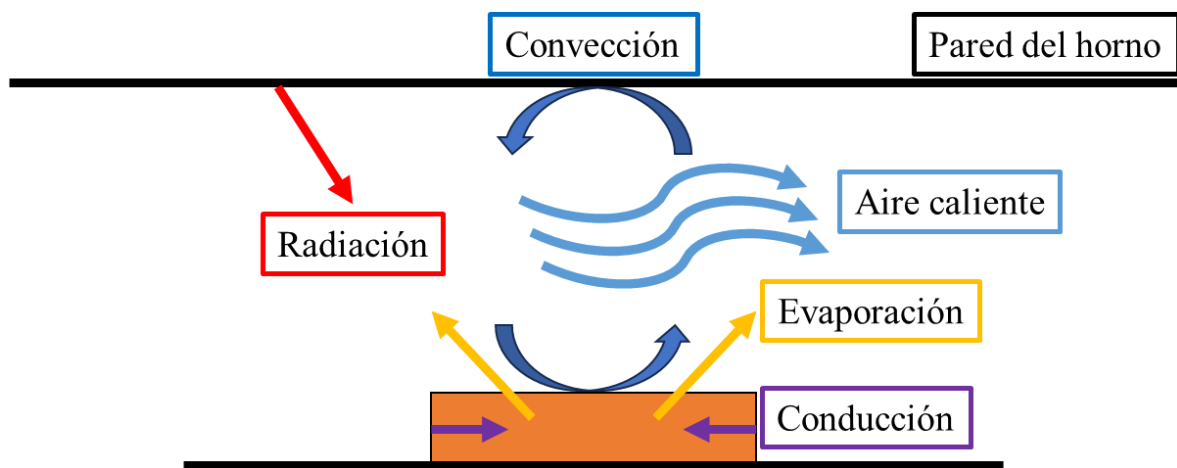


Figura 6. Diagrama de los fenómenos de transferencia de calor y masa que ocurren durante el horneado de un alimento.

El emplear esta metodología y simular la transferencia simultánea de calor y masa durante el horneado de zanahoria (*Daucus carota* L.) puede significar la obtención de información que permita conocer la manera en que se ven afectados las variables de calidad durante el proceso.

IV JUSTIFICACIÓN

La zanahoria es un vegetal reconocido a nivel mundial por los beneficios que aporta a los consumidores en sus diferentes presentaciones; ya sea de forma fresca, cocinada o procesada en diferentes productos de valor agregado como lo son zanahorias enlatadas, jugos, dulces y botanas. Algunas de las características nutrimentales que destacan de este alimento son: el alto contenido de β -caroteno (precursor de la vitamina A), α -caroteno, luteína, vitamina C y fibra. Por lo anterior se le atribuyen propiedades preventivas contra el cáncer y enfermedades cardiovasculares. Es por esto que se busca la manera de obtener productos derivados de ésta, que sean de fácil acceso y llamativos para los consumidores, hoy en día buscan productos de alta calidad y, de preferencia, que posean beneficios para la salud. Por lo que se desea obtener una botana horneada de rebanadas de zanahoria. Sin embargo, durante el proceso de horneado ocurren diferentes cambios en la composición y estructura del alimento, que pueden comprometer de esta manera la calidad y aceptación por parte de los consumidores.

En otras investigaciones se ha estudiado el fenómeno de transferencia de masa durante el secado de rebanadas de zanahoria y el impacto que tienen diferentes factores sobre el tiempo de secado; sin embargo, no se han encontrado estudios en los cuales se obtengan rebanadas de zanahoria horneadas y se analice la transferencia simultánea de calor y masa al considerar la difusividad efectiva en función de la temperatura del alimento. Por ello, es de interés simular la transferencia simultánea de calor y masa durante el horneado de rebanadas de zanahoria (*Daucus carota* L.) y evaluar el impacto del proceso en las variables de calidad.

V OBJETIVOS

A OBJETIVO GENERAL

Simular la transferencia simultánea de calor y masa durante el horneado de rebanadas de zanahoria (*Daucus carota* L.) y evaluar el impacto del proceso en las variables de calidad.

B OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar una caracterización fisicoquímica (fracturabilidad, color, humedad, pH, acidez titulable y sólidos solubles totales), nutrimental (vitamina C), nutracéutica (carotenoides totales) y enzimática (actividad de peroxidasa) en zanahoria fresca.

2. Construir cinéticas de horneado de rebanadas de zanahoria a diferentes condiciones de temperatura (120, 130 y 140 °C).

3. Determinar el contenido de humedad crítico (X_c) y evaluar las variables ingenieriles de transferencia de masa: densidad de flujo de masa (N_c) y coeficiente local de transferencia de masa (k_Y), en el periodo de velocidad constante.

4. Evaluar el contenido de humedad en equilibrio (X_∞) y calcular la difusividad efectiva (D_e) como función cuadrática del tiempo en el periodo de velocidad decreciente.

5. Evaluar las variables ingenieriles de transferencia de calor (difusividad térmica, α ; conductividad térmica, k ; densidad aparente, ρ ; capacidad calorífica específica, C_p ; y coeficiente convectivo de transferencia de calor, h) en el horneado de rebanadas de zanahoria.

6. Contrastar las variables fisicoquímicas, nutrimental, nutracéutica y enzimática de rebanadas de zanahoria horneadas respecto al fresco.

7. Simular la transferencia simultánea de calor y masa, mediante la segunda ley de Fourier y la segunda ley de Fick, al considerar la difusividad efectiva variable en función de la

temperatura promedio del alimento, al emplear el modelo de Arrhenius, durante el horneado de rebanadas de zanahoria.

8. Validar la transferencia simultánea de calor y masa al contrastar las cinéticas de horneado simuladas con las experimentales.

VI MATERIALES Y MÉTODOS

A MATERIALES

1 Materia prima

Se utilizó zanahoria (*Daucus carota* L.) como materia prima, la cual se adquirió en un mercado local de la ciudad de Culiacán. La selección se llevó a cabo con relación a un estado de madurez comercial, al considerar criterios de homogeneidad tanto de color, forma y tamaño, se cuidó que estuvieran libres de daños mecánicos y fitosanitarios visibles. La materia prima se lavó con una solución de NaClO a 100 ppm y se almacenó hasta el posterior uso.

B MÉTODOS

1 Variables fisicoquímicas

a Fracturabilidad

La fuerza de fractura se midió de acuerdo con la metodología reportada por Iribe-Salazar y col (2018). Se emplea un sistema universal de ensayo para materiales (Instron, 3342, EUA), equipado con una celda de carga de 500 N y se registra la fuerza de carga máxima (N) para agrietar las muestras. En la prueba se utiliza una sonda de acero inoxidable de 8 mm de diámetro. La velocidad de prueba fue de 1.0 mm/s, con una distancia de recorrido de 5 mm. Se utiliza el software Bluehill Lite (Versión 2.23) para analizar los datos y los resultados se expresan como fuerza máxima de fractura (N).

b Color y diferencia total de color

Para la medición de color se siguió la metodología descrita por Iribe-Salazar y col (2015). La determinación de las variables L^* , a^* y b^* de color en muestras en fresco (control), así como en las muestras horneadas, se realiza al emplear un colorímetro triestímulo (Minolta,

Chromameter CR-210, Japón). Para la calibración del equipo se realizan tres disparos en la carta de color blanco, donde el equipo registra los parámetros $Y = 93.5$, $x = 0.3139$ y $y = 0.3196$.

Los cálculos se realizan a partir de la siguiente ecuación:

$$\Delta E = \left[(L^* - L_f^*)^2 + (a^* - a_f^*)^2 + (b^* - b_f^*)^2 \right]^{1/2} \quad (25)$$

donde ΔE es la diferencia total de color en rebanadas de zanahoria, L_f^* , a_f^* y b_f^* son las variables de color para la muestra fresca y, L^* , a^* y b^* son las variables de color de las muestras después del horneado.

c Humedad

El contenido de humedad se determinó mediante el método termogravimétrico propuesto por la AOAC (2012). En el cual se somete la muestra a desecación en una estufa de aire forzado hasta conseguir masa constante. Mediante la cuantificación de la pérdida de masa, se determina el contenido de humedad en la muestra.

Se colocan cápsulas de porcelana en un horno de convección (redLINE, RF-115, Alemania) por 24 h a 105 °C para obtener masa constante (M_{c_c}). Se miden 1.5 g de muestra fresca (M_{m_f}) junto con una cápsula de porcelana en una balanza analítica (Sartorius, TE15025, EUA), posteriormente la muestra se seca en la estufa durante 24 h a 105 °C. Una vez pasado el tiempo de secado por convección, se deja enfriar a temperatura ambiente por 60 min en un desecador. Después, se determina la masa de la muestra seca (M_{m_s}) y se calcula el contenido de humedad con la siguiente ecuación:

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{M_{m_f} - (M_{m_s} - M_{c_c})}{M_{m_f}} (100) \quad (26)$$

donde Mm_f es la masa de la muestra fresca (g), Mc_c corresponde a la masa constante de la cápsula (g) y Mm_s a la masa de la cápsula con la muestra seca (g).

d pH

El pH se determinó mediante la técnica 981.12 de la AOAC (2012). Se homogeneizan 10 g de zanahoria con 50 mL de agua destilada neutra, la mezcla se filtra y se afora a 100 mL, la medición se efectúa al sumergir directamente el electrodo de vidrio de un potenciómetro (Hanna instruments, HI 2211, EUA) en un vaso de precipitado que contenga la muestra.

e Acidez titulable

La acidez titulable se determinó de acuerdo con el método 942.15 de la AOAC (2012). Del homogeneizado para la medición de pH se toma una alícuota de 20 mL y se titula con hidróxido de sodio 0.1 N hasta alcanzar un pH de 8.1 ± 0.2 . Los resultados se reportan como porcentaje de ácido cítrico.

$$AT(\%) = \frac{(V_{\text{NaOH}})(\text{MeqA})(N)(V_T)}{(m)(V_A)}(100) \quad (27)$$

Donde V_{NaOH} es el volumen utilizado en la titulación (mL), V_T es el volumen total de la disolución (mL), N corresponde a la Normalidad del NaOH (N), V_A es el volumen de la alícuota (mL), MeqA es la masa miliequivalente del ácido cítrico (g) y m corresponde a la masa de la muestra (g).

f Sólidos solubles totales

Se determinó el contenido de sólidos solubles totales (SST) mediante la metodología propuesta en la sección 932.12 de la AOAC (2012). Se coloca una gota de la muestra fresca en

un refractómetro tipo Abbe (Sper Scientific, 300001, China). El contenido de SST se reporta como porcentaje de azúcar (°Brix).

2 Variable nutrimental

a Vitamina C

El contenido de vitamina C se determinó espectrofotométricamente de acuerdo con la metodología descrita por Iribe-Salazar y col (2015), cuyo principio se basa en la reacción de la vitamina C con el 2,6 - diclorofenolindofenol (DCPI), en donde la vitamina C reduce al DCPI el cual absorbe a 520 nm. El extracto se obtiene al mezclar 0.5 g de muestra en 15 mL de ácido oxálico (0.4 % p/v) en un homogeneizador (Ultra-Turrax IKA, T18 basic S1, Alemania) durante 1 min, posteriormente se filtra a través de 4 capas de tela de organza. Para la determinación se utiliza un espectrofotómetro (Thermo Electron Corporation Genesys 10uv, Madison, EUA) que primero se ajusta a cero con agua desionizada.

Se elabora una curva de calibración al graficar la absorbancia que resulta de la reacción de reducción del DCPI con ácido ascórbico contra diferentes concentraciones de solución estándar de ácido ascórbico (1 - 50 ppm). La absorbancia debida a la reacción se calcula con la diferencia entre la lectura de absorbancia (L1) para el DCPI total y la lectura de absorbancia (L2) para el DCPI residual después de la reacción con el ácido ascórbico. La diferencia L1 – L2 representa la absorbancia correspondiente a la reacción. La absorbancia L1 para el DCPI total se obtiene de la mezcla de solución de ácido oxálico (1 mL) + solución buffer de acetato de sodio (1 mL) + solución DCPI (8 mL). El equipo se ajusta de nuevo a cero con la mezcla de solución estándar (1 mL) + solución buffer de acetato de sodio (1 mL) + agua desionizada (8 mL). La absorbancia L2 para el DCPI residual se obtiene de la mezcla de solución estándar (1 mL) + solución buffer de acetato de sodio (1 mL) + DCPI (8 mL). Se evalúa una sola vez la

absorbancia L1 para el DCPI total, mientras la absorbancia L2 para el DCPI residual se obtiene para cada estándar.

Para medir el contenido de vitamina C presente en los extractos, el espectrofotómetro se ajusta a cero al mezclar solución del extracto (1 mL) + solución buffer de acetato de sodio (1 mL) + agua desionizada (8 mL). La absorbancia L2 para el DCPI residual se obtiene de la mezcla de solución del extracto (1 mL) + buffer de acetato de sodio (1 mL) + DCPI (8 mL). La diferencia L1 – L2 representa la absorbancia que resulta de la reacción de reducción del DCPI con ácido ascórbico; al sustituir esta diferencia de absorbancia en la ecuación de la recta correspondiente a la curva de calibración (gráfico L1 – L2 contra concentración de ácido ascórbico) se obtiene la concentración de vitamina C presente en la muestra en partes por millón (ppm).

A partir de este resultado, se puede expresar la concentración en mg vitamina C/100 g s.s. a través de una serie de ecuaciones y el siguiente análisis dimensional:

Es posible convertir la concentración en ppm de vitamina C a mg vitamina C/g f.f. a través de la siguiente ecuación:

$$\{Vit\ C\} = ppm_{vit\ C} \hat{V} \quad (28)$$

donde $\{Vit\ C\}$ es la concentración de vitamina C en mg vitamina C/g f.f., $ppm_{vit\ C}$ es la concentración de vitamina C en mg vitamina C/L (o ppm), y \hat{V} corresponde al volumen específico de extracción (0.015 L de ácido oxálico/0.5 g f.f.).

Posteriormente, con la finalidad de expresar el contenido de vitamina C en una base de 100 gramos de fruto fresco, se emplea el factor de conversión:

$$[Vit C] = 100\{Vit C\} \quad (29)$$

donde $[Vit C]$ es la concentración de vitamina C en mg vitamina C/100 g f.f. y $\{Vit C\}$ es la concentración de vitamina C en mg vitamina C/g f.f. Por ejemplo, al considerar una $\{Vit C\} = 0.2$ mg vitamina C/g f.f:

$$[Vit C] = 0.2 \frac{\text{mg vitamina C}}{\cancel{\text{g f.f.}}} \frac{100 \cancel{\text{g f.f.}}}{100 \text{ g f.f.}} = 20 \frac{\text{mg vitamina C}}{100 \text{ g f.f.}}$$

Adicionalmente, es necesario conocer el porcentaje de humedad del fruto en base húmeda y posteriormente emplear la ecuación:

$$X_h = \frac{\% \text{ Humedad}}{100} \quad (30)$$

donde X_h corresponde al contenido de humedad en base húmeda (g H₂O/g f.f.), variable que se transforma a contenido de humedad en base seca al emplear la expresión:

$$X = \frac{X_h}{1 - X_h} \quad (31)$$

donde X es el contenido de humedad en base seca (g H₂O/g s.s.). Una vez obtenido X , se calcula el cociente de la masa de fruto fresco con respecto a la masa anhidra del mismo (g f.f./g s.s.), que resulta del siguiente factor de conversión:

$$1 + X (=) \frac{\text{g s.s.}}{\text{g s.s.}} + \frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{g s.s.}} (=) \frac{\text{g f.f.}}{\text{g s.s.}} \quad (32)$$

Finalmente, para expresar el contenido de vitamina C en mg vitamina C/100 g s.s. se utiliza la expresión:

$$C_{vit C} = [Vit C](1 + X) \quad (33)$$

donde $C_{Vit C}$ es el contenido de vitamina C/100 g s.s, [Vit C] corresponde a la concentración de vitamina C en mg vitamina C/100 g f.f.

3 Variable nutracéutica

a Carotenoides totales

El contenido de carotenoides totales se determinó mediante la metodología reportada por Olives-Barba y col (2006) con algunas modificaciones. Se miden 0.5 g de muestra, se homogeneiza con 20 mL de una solución de hexano:acetona:etanol, en una proporción 50:25:25 v/v/v, respectivamente, y se agita durante 30 min en oscuridad en un mezclador serológico de vaivén. Posteriormente, se adicionan 3 mL de agua destilada y se deja reposar hasta observar una separación de fases. Se centrifuga por 10 min a 4000×g a 4 °C, se recupera la fase orgánica (fase superior) y se coloca en tubos Falcon cuidando proteger de la luz. El proceso se lleva a cabo hasta observar decoloración en la muestra y las fases orgánicas recuperadas se depositan en el mismo tubo. Se registra el volumen total de fase orgánica recuperada, se determina la absorbancia de las muestras a 446 nm y se emplea la siguiente ecuación para conocer la concentración de los carotenoides totales:

$$[Eq. \beta - carot] = \frac{A}{\epsilon l} \hat{V}_{extracc} \quad (34)$$

donde [Eq. β -carot] es la concentración de carotenoides totales (g eq. de β -carotenos /g f.f.), A es la absorbancia a 446 nm, $\hat{V}_{extracc}$ corresponde al volumen específico de extracción (volumen recuperado de la fase orgánica en dL/0.5 g f.f.), ϵ es el coeficiente de extinción de masa para β -caroteno en hexano (2500 dL gEq. de β -carotenos⁻¹ cm⁻¹) y l es el espesor de la celda (1 cm).

Para convertir la concentración de carotenoides totales obtenida a mg eq. de β -carotenos/g f.f. se utiliza el factor de conversión:

$$[Eq. \beta - carot] \times \frac{1000 \text{ mg eq. } \beta\text{-carot}}{\text{g eq. } \beta\text{-carot}} \times 100$$

y se realiza el siguiente análisis dimensional; si se considera una $[Eq. \beta\text{-carot}] = 0.00016 \text{ g eq. de } \beta\text{-carotenos /g f.f.}$:

$$0.00016 \frac{\text{g eq. de } \beta\text{-caroteno}}{\text{g f.f.}} \times \frac{1000 \text{ mg eq. de } \beta\text{-caroteno}}{\text{g eq. de } \beta\text{-caroteno}} \times \frac{100 \text{ g f.f.}}{100 \text{ g f.f.}} = 16 \frac{\text{mg eq. de } \beta\text{-caroteno}}{100 \text{ g f.f.}}$$

Con la finalidad de reportar el contenido de carotenoides totales en mg eq. de β -carotenos/100 g s.s. es necesario conocer el contenido de humedad del fruto en base húmeda y base seca al emplear las ecuaciones (30) y (31), respectivamente. Una vez calculado X con la ecuación (31), se calcula el cociente de la masa de fruto fresco con respecto a la masa anhidra del mismo (g f.f./g s.s.), como se muestra en la ecuación (32).

Finalmente para expresar el contenido de carotenoides totales en mg eq. de β -carotenos/100 g s.s. se utiliza la expresión:

$$C_{Eq. \beta\text{-carot}} = [Eq. \beta - carot](1 + X) \quad (35)$$

donde $C_{Eq. \beta\text{-carot}}$ corresponde a la concentración de carotenoides totales en mg eq. de β -carotenos/100 g s.s., $[Eq. \beta\text{-carot}]$ es la concentración de carotenoides totales en mg eq. de β -carotenos /100 g f.f. y $(1 + X)$ representa el cociente de la masa de fruto fresco con respecto a la masa anhidra del mismo (g f.f./g s.s.).

4 Variable enzimática

a Actividad de peroxidasa

La actividad de la enzima peroxidasa (*POD*) se determinó según el método descrito por Iribe-Salazar y col (2015), basado en la reacción de oxidación de guayacol en presencia de dicha enzima y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y la enzima para formar un compuesto coloreado. La preparación del extracto consiste en medir 10 g de muestra, adicionar 2 g de PVPP [Poli(vinilpolipirrolidona)] y homogeneizar a 4 °C en 20 mL de buffer de fosfato de sodio (0.05 M, pH = 7). El extracto se mantiene durante 2 horas en oscuridad a 4 °C en un mezclador serológico de vaivén (UNICO, TTR-200, EUA), posteriormente se filtra y centrifuga a 11 000×g por 25 minutos a 4 °C, el sobrenadante se utiliza como el extracto enzimático.

La mezcla del ensayo consiste en 2.7 mL de buffer de fosfato de sodio (0.2 M, pH = 6.5), 0.1 mL de H_2O_2 (0.1 % v/v en agua), 0.15 mL de guayacol (4 % v/v en agua) y 0.15 mL de extracto enzimático. Se determinan los cambios de absorbancia a 470 nm y 25 °C durante 3 min en lapsos de 10 s en un espectrofotómetro (Thermo Electron Corporation Genesys 10uv, Madison, EUA).

La actividad volumétrica (a_v) de la enzima peroxidasa se calcula con base en la pendiente de la porción lineal de la curva determinada a través de la cinética de reacción del gráfico de absorbancia (A) contra tiempo de reacción (t).

$$a_v = \frac{\left(\frac{\Delta A}{t}\right) V_T}{\epsilon l V_{Extr.}} \quad (36)$$

Donde $\Delta A/t$ es la pendiente (min^{-1}) del gráfico absorbancia (A) contra tiempo (t), ε corresponde al coeficiente de extinción molar del guayacol ($25.5 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$, Thongsook y Barret 2005), V_T denota el volumen total (3.1 mL), $V_{\text{Extr.}}$ es el volumen del extracto enzimático (0.15 mL) y l corresponde al espesor de la celda, el cual es 1 cm.

5 Cinéticas de horneado

El horneado de rebanadas de zanahoria se llevó a cabo en un horno eléctrico comercial (Oster, 6081-013, México) a 120, 130 y 140 °C. Durante el proceso se registró cada 20 s la masa de las rebanadas de zanahoria, se empleó una balanza electrónica (Sartorius, TE1502S, EUA) y una interfaz (kit de interfaz Sartorius, modelo YDO 01 PT, EUA) conectada a una computadora. El espesor ($2L$) de las rebanadas de zanahoria se midió con un micrómetro digital (Insize, CD-8 “C, México). El contenido de humedad inicial de las rebanadas de zanahoria (X_0) se determinó con el método propuesto por la AOAC (2012), descrito anteriormente. El contenido de humedad en el equilibrio (X_∞) se determinó una vez que no se observaron cambios en el contenido de humedad promedio (Geankoplis y col 2018). El contenido de humedad promedio (\bar{X} , kg H₂O/kg s.s.) se calculó con la ecuación $\bar{X} = (m - m_{ss})/m_{ss}$ (Iribe-Salazar y col 2018), donde m es la masa de la muestra (kg) y m_{ss} es la masa del sólido seco (kg s.s.).

Las cinéticas de horneado se construyeron al graficar la razón de contenido de humedad de la muestra durante el horneado respecto al contenido de humedad inicial (X_0) de la muestra sin hornear en función del tiempo (t , min)

6 Variables ingenieriles de transferencia de masa

a Contenido de humedad crítico

El contenido de humedad crítico (X_c) se determinó al realizar un análisis de regresión en los datos obtenidos de las cinéticas de horneado, al encontrar en qué punto el término cuadrático del contenido de humedad en función del tiempo deja de ser significativo, se conoce el inicio del periodo de velocidad decreciente, por tanto, se conoce el contenido de humedad crítico (Castro-Beltrán 2022).

b Densidad de flujo de masa y coeficiente local de transferencia de masa

El cálculo de la densidad de flujo de masa (N_c) se realizó al emplear la siguiente ecuación (Geankoplis y col 2018):

$$N_c = \left(\frac{m_{ss}}{A} \right) \left(- \frac{dX}{dt} \right) \quad (37)$$

donde N_c corresponde a la densidad de flujo de masa ($\text{kg H}_2\text{O}/\text{m}^2\text{s}$), m_{ss} es la masa de sólidos secos (kg s.s.), A es el área superficial expuesta al horneado (m^2) y dX/dt es el gradiente de contenido de humedad ($\text{kg H}_2\text{O}/\text{kg s.s. s}$).

Una vez determinado N_c , la humedad del aire en la superficie líquida (Y_s), y la humedad en la corriente de aire (Y), se obtuvo en coeficiente local de transferencia de masa:

$$N_c = k_Y (Y_s - Y) \quad (38)$$

$$k_Y = \frac{N_c}{Y_s - Y} \quad (39)$$

donde k_Y es el coeficiente local de transferencia de masa ($\text{kg H}_2\text{O}/\text{m}^2\text{s } \Delta Y$), N_c es la densidad de flujo de masa ($\text{kg H}_2\text{O}/\text{m}^2\text{s}$), Y_s corresponde a la humedad de saturación del aire ($\text{kg H}_2\text{O}/\text{kg a.s.}$) y Y a la humedad del aire ($\text{kg H}_2\text{O}/\text{kg a.s.}$).

c Contenido de humedad en el equilibrio

El contenido de humedad en el equilibrio (X_∞) se definió cuando no se registraron cambios en la masa de la muestra (Geankoplis y col 2018).

d Difusividad efectiva variable

El coeficiente de difusión se puede ver influenciado por el efecto de diferentes factores, como el contenido de humedad, la temperatura y la estructura del alimento (Sakin y col 2007). Por ello, no es adecuado considerar la difusividad efectiva constante al realizar un análisis de transferencia de masa. Es posible considerar la difusividad efectiva como función cuadrática del tiempo (Iribe-Salazar y col 2018) o en función de la temperatura.

1) Función cuadrática del tiempo

Los cambios en el contenido de humedad se pueden expresar mediante la segunda ley de Fick para la difusión unidimensional al considerar la difusividad efectiva como una función cuadrática del tiempo ($D_e = D_0 + D_1t + D_2t^2$),

$$\frac{\partial X}{\partial t} = (D_0 + D_1t + D_2t^2) \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (40)$$

misma que se puede resolver con el método de separación de variables al definir dT como:

$$dT = (D_0 + D_1t + D_2t^2) dt \quad (41)$$

En la expresión anterior, la difusividad efectiva inicial se indica mediante D_0 , por otra parte, la rapidez de cambio de la difusividad varía linealmente ($D'_e = D_1 + 2D_2t$) conforme avanza el horneado y la velocidad inicial de cambio se representa por D_1 . El incremento ($D_2 > 0$) o disminución ($D_2 < 0$) en la rapidez de cambio ($D''_e = 2D_2$) para el coeficiente de difusión depende de D_2 , mismo que se relaciona con la distribución del tamaño de poro y la dilatación de estos.

En la segunda ley de Fick, la condición inicial y las de frontera se normalizan al utilizar la Fracción de Humedad No Alcanzada, $\psi = (X - X_\infty)/(X_c - X_\infty)$, la coordenada espacial adimensional, $\xi = x/L$ y el tiempo adimensional, $\tau = T/L^2$, con T dado por la ecuación (41), para obtener la siguiente expresión:

$$\frac{\partial \psi}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi^2} \quad \begin{array}{l} \psi(\xi, 0) = 1 \\ \psi(-1, \tau) = 0 \\ \psi(1, \tau) = 0 \end{array} \quad (42)$$

al aplicar el método de separación de variables, se obtiene la solución $\psi = (A \cos \lambda \xi + B \sin \lambda \xi) e^{-\lambda^2 \tau}$. Una vez aplicadas las condiciones de frontera, se tiene $B = 0$, y esta última ecuación se satisface cuando:

$$\lambda_n = (2n - 1) \frac{\pi}{2} \text{ para } n = 1, 2, 3, \dots \quad (43)$$

Debido a que la ley de difusión de Fick es una ecuación diferencial parcial lineal, al utilizar el principio de superposición, se obtiene como solución general $\psi = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \lambda_n \xi \exp(-\lambda_n^2 \tau)$. Al considerar la condición inicial, los coeficientes A_n se evalúan en forma similar a los coeficientes de Fourier:

$$\int_{-1}^1 \cos \lambda_m \xi d\xi = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \int_{-1}^1 \cos \lambda_m \xi \cos \lambda_n \xi d\xi \quad (44)$$

Se utiliza la ecuación (43) y debido a la ortonormalidad, el único término distinto de cero en el segundo miembro se obtiene cuando $m = n$, es decir, es igual a la delta de Kronecker δ_{mn} .

Por lo tanto,

$$\psi = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{2n-1} \cos(2n-1) \frac{\pi}{2} \xi \exp\left[-\frac{\pi^2(2n-1)^2}{4} \tau\right] \quad (45)$$

después de realizar la integración de la ecuación (41), se tiene que:

$$T = \left(D_0 + \frac{1}{2} D_1 t + \frac{1}{3} D_2 t^2\right) t \quad (46)$$

En términos de las variables originales, el contenido de humedad como una función de la dimensión espacial y el tiempo se obtiene para una difusividad variable con un comportamiento cuadrático del tiempo:

$$\frac{X - X_{\infty}}{X_c - X_{\infty}} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \cos \frac{(2n-1)\pi x}{2L} \exp\left[-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 (D_0 + \frac{1}{2} D_1 t + \frac{1}{3} D_2 t^2) t}{4L^2}\right] \quad (47)$$

El contenido de humedad promedio adimensional $\bar{\psi} = \int_{-1}^1 \psi d\xi / \int_{-1}^1 d\xi$ es el siguiente:

$$\bar{\psi} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left[-\frac{(2n-1)^2 \pi^2}{4} \tau\right] \quad (48)$$

En términos de las variables originales, la solución analítica para el contenido de humedad promedio en función del tiempo, para una difusividad variable con un comportamiento cuadrático del tiempo es:

$$\frac{\bar{X} - X_{\infty}}{X_c - X_{\infty}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left[-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 (D_0 + \frac{1}{2} D_1 t + \frac{1}{3} D_2 t^2) t}{4L^2}\right] \quad (49)$$

De la ecuación (49), el tiempo adimensional, $\tau = T/L^2$ se escribe como:

$$\tau = \frac{\left(D_0 + \frac{1}{2}D_1t + \frac{1}{3}D_2t^2\right)t}{L^2} \quad (50)$$

Para cada tiempo t , τ se resuelve a partir de la ecuación (49) se utiliza el método de Newton de segundo orden, se consideran 10 términos en la serie infinita. Una vez conocido el tiempo adimensional, la ecuación (50) se reordena a:

$$\frac{\tau L^2}{t} = D_0 + \frac{1}{2}D_1t + \frac{1}{3}D_2t^2 \quad (51)$$

y los parámetros D_0 , D_1 y D_2 se estiman al aplicar una regresión lineal.

2) Función de la temperatura

Para evaluar la difusividad efectiva como una función de la temperatura se utilizó la ecuación de Arrhenius, según lo descrito por Mohan y col (2010), con algunas modificaciones. A partir de la ecuación de Arrhenius:

$$D_T = Ae^{-\frac{Ea}{RT}} \quad (52)$$

donde D_T es la difusividad efectiva en función de la temperatura del alimento (m^2/s), A el factor pre-exponencial (m^2/s), Ea la energía de activación (J/mol), R la constante de los gases (J/mol K) y T la temperatura del alimento (K).

Al considerar una difusividad efectiva inicial, D_{T_0} , a la temperatura inicial del alimento:

$$D_{T_0} = Ae^{-\frac{Ea}{RT_0}} \quad (53)$$

Al dividir la ecuación (52) entre la expresión (53) y reordenar los términos se obtiene:

$$D_T = D_{T_0} e^{-\frac{Ea}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (54)$$

Ecuación que se utiliza para obtener la difusividad mediante subperiodos en función de la temperatura, al considerar la energía de activación como un parámetro de ajuste.

7 Variables ingenieriles de transferencia de calor

a Difusividad (α) y conductividad térmica (k)

La difusividad térmica (α) y conductividad térmica (k) se determinaron al seguir el método de la fuente lineal de calor (Iribe-Salazar y col 2015) se empleó un analizador de propiedades térmicas (Decagon, KD2 Pro, EUA). La fuente lineal de calor (sonda dual) se inserta en el centro de la muestra, hasta cubrir totalmente la sonda. Se aísla la muestra con película plástica, para evitar penetración de humedad o lixiviación durante las determinaciones y se sumerge en agua a 25, 55 y 85 °C.

La sonda dual consiste en dos tubos delgados de acero (separados 6 mm), cada uno con un sensor de temperatura en el interior; uno de ellos también contiene un alambre calefactor. Una corriente pasa por el alambre y se registra la temperatura de los sensores durante el calentamiento y posterior enfriamiento de la sonda. En el método se utilizan las ecuaciones (22) y (23) para realizar un análisis de regresión no lineal para conocer los parámetros b_0 , b_1 y b_2 .

Las ecuaciones (22) y (23) se aplican durante el calentamiento y el enfriamiento, respectivamente. La difusividad y conductividad térmica se calculan con $\alpha = r^2 / (4b_2)$ y $k = 1 / b_1$.

b Densidad aparente (ρ)

La densidad aparente (ρ) se obtuvo mediante el método de desplazamiento de volumen (Gil-Gaxiola 2022), se utiliza tolueno como líquido desplazante. Para registrar la masa se emplea una balanza analítica (Sartorius, TE15025, EUA), las muestras se ambientan previamente al sumergirlas en agua a 25, 55 y 85 °C cubiertas con película plástica. Se determina el volumen del líquido desplazado al sumergir las muestras en una probeta que contiene 50 mL de líquido desplazante y mediante la siguiente expresión se determina la densidad aparente.

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{V_2 - V_1} \quad (55)$$

ρ es la densidad de la muestra (kg/m^3), m la masa de la muestra (kg), V el volumen de la muestra (m^3), V_1 el volumen inicial del tolueno en la probeta (m^3) y V_2 el volumen final del tolueno en la probeta (m^3).

c Capacidad calorífica específica (C_p)

La capacidad calorífica específica (C_p) se calculó a partir de la ecuación de la difusividad térmica:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (56)$$

d Coeficiente convectivo de transferencia de calor (h)

Para la determinación del coeficiente convectivo de transferencia de calor (h) se siguió la metodología de la capacitancia global, descrita por Iribe-Salazar y col (2015). Se emplea un cuerpo de aluminio con la geometría del alimento a procesar, al cual se le introducen

termopares a una profundidad determinada. Primeramente, se obtiene la historia de temperatura del cuerpo de aluminio durante el proceso de horneado. El procedimiento inicia al equilibrar la temperatura del cuerpo de aluminio a la temperatura inicial, para posteriormente ser sometido al procesamiento junto a las piezas del alimento que poseen la misma forma, se asegura así que las condiciones a las que se expone el cuerpo de aluminio sean las mismas que las del alimento procesado. Para este método se tiene que:

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = e^{\left(\frac{-hA}{\rho VC_p} t\right)} \quad (57)$$

Al linealizar dicha ecuación se obtiene:

$$\ln\left(\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}}\right) = -\frac{hA}{\rho VC_p} t \quad (58)$$

donde T_0 es la temperatura inicial del sólido ($^{\circ}\text{C}$), T_{∞} es la temperatura del fluido ($^{\circ}\text{C}$), A es el área del sólido (m^2), V es el volumen del sólido (m^3), ρ es la densidad del sólido (kg/m^3), C_p es la capacidad calorífica específica del sólido ($\text{J}/\text{kg K}$) y h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$).

El cociente $\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}}$ se denomina Fracción de Temperatura No Alcanzada (*FTNA*).

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

$$h = \frac{(\text{pend}) \rho VC_p}{A} \quad (59)$$

donde el criterio necesario para la aplicación de este método es que $Bi < 0.1$.

8 Simulación de la transferencia simultánea de calor y masa

Se empleó la solución analítica encontrada al utilizar la serie infinita propuesta por Carslaw y Jaeger (1959) para analizar la transferencia de calor, se consideró a las rebanadas de zanahoria como una placa infinita al incluir las resistencias interna y externa (Caro-Hernández 2019), para este estudio se consideró la temperatura promedio del alimento. La cual se obtiene a partir de la ecuación de la temperatura en función de la posición y el tiempo para placa infinita al considerar las resistencias interna y externa:

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \operatorname{sen} \lambda_n \cos(\lambda_n x / L)}{\lambda_n + \operatorname{sen} \lambda_n \cos \lambda_n} e^{-\lambda_n^2 \frac{\alpha t}{L^2}} \quad (60)$$

La ecuación (60) se normaliza al utilizar la Fracción de Temperatura no Alcanzada, $\psi = (T - T_{\infty}) / (T_0 - T_{\infty})$, la coordenada espacial adimensional, $\xi = x / L$ y el tiempo adimensional $\tau = \alpha t / L^2$, para obtener la expresión:

$$\psi = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \operatorname{sen} \lambda_n \cos(\lambda_n \xi)}{\lambda_n + \operatorname{sen} \lambda_n \cos \lambda_n} e^{-\lambda_n^2 \tau} \quad (61)$$

Por lo que, la temperatura promedio adimensional $\bar{\psi} = \int_{-1}^1 \psi d\xi / \int_{-1}^1 d\xi$ es la siguiente:

$$\bar{\psi} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \operatorname{sen}^2 \lambda_n}{\lambda_n (\lambda_n + \operatorname{sen} \lambda_n \cos \lambda_n)} e^{-\lambda_n^2 \tau} \quad (62)$$

En términos de las variables originales, la solución analítica para la temperatura promedio en función del tiempo es:

$$\frac{\bar{T} - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \operatorname{sen}^2 \lambda_n}{\lambda_n (\lambda_n + \operatorname{sen} \lambda_n \cos \lambda_n)} e^{-\lambda_n^2 \frac{\alpha t}{L^2}} \quad (63)$$

Para llevar a cabo la simulación se necesitan las variables ingenieriles previamente obtenidas, así como la temperatura inicial del alimento (T_0) y la temperatura del fluido (T_∞). Para obtener los eigenvalores (λ_n) se elabora un código mediante el cual se da solución a la ecuación trascendental:

$$\lambda_n \tan \lambda_n = Bi \quad (64)$$

donde el número de Biot es: $Bi = \frac{hL}{k}$.

El código empleado para la obtención de los eigenvalores (λ_n), estimó la temperatura promedio para diferentes tiempos durante el proceso y se calculó la difusividad efectiva variable en función de la temperatura promedio del alimento a partir de la ecuación (63), para posteriormente, utilizar la solución analítica de la segunda ley de Fick para obtener el contenido de humedad promedio en función del tiempo:

$$\frac{\bar{X} - X_\infty}{X_0 - X_\infty} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left[-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 D_T t}{4L^2}\right] \quad (65)$$

9 Validación de la predicción del contenido de humedad promedio

Para la validación de los resultados de la transferencia simultánea de calor y masa se realizó una comparación de las historias del contenido de humedad promedio de rebanadas de zanahoria predichas mediante la solución analítica para la segunda ley de Fick al considerar la difusividad efectiva variable como función de la temperatura promedio del alimento, contra los resultados experimentales de las cinéticas de horneado.

10 Métodos estadísticos

a Contraste de variables de calidad de zanahoria horneada

Para realizar el contraste de las variables de calidad se empleó un diseño completamente al azar con el factor temperatura (120, 130 y 140 °C). Las variables de respuesta a evaluar fueron: fracturabilidad, color y diferencia total de color, vitamina C, carotenoides totales y actividad de peroxidasa. Se llevaron a cabo 3 réplicas (vitamina C, carotenoides totales y actividad de peroxidasa) y 5 réplicas (fracturabilidad, color y diferencia total de color). Para la comparación de medias se aplicó la prueba de Fisher (*LSD*) con un $\alpha = 0.05$ en el software estadístico STATGRAPHICS Centurion XVI (Pellegrini-Zurita 2017).

b Contraste de variables de calidad de zanahoria horneada respecto al fresco

Para realizar el contraste de las variables de calidad respecto al fresco se empleó un diseño completamente al azar con el factor condición de la hortaliza (fresca y horneada). Las variables de respuesta a evaluar fueron: fracturabilidad, color, vitamina C y carotenoides totales. Se llevaron a cabo 3 réplicas (vitamina C, carotenoides totales) y 5 réplicas (fracturabilidad, color y diferencia total de color). Para la comparación de medias se aplicó la prueba *t* student con un $\alpha = 0.05$ en el software estadístico STATGRAPHICS Centurion XVI (Montgomery 2012).

c Variables ingenieriles de transferencia de masa y transferencia de calor

Se llevó a cabo un análisis de estadística descriptiva para las variables ingenieriles de transferencia de masa y calor. Se reportan las medias de 3 réplicas y la desviación estándar. Para el contraste de las variables ingenieriles se empleó un diseño completamente al azar con el factor temperatura con los niveles 120, 130 y 140 °C, para las variables ingenieriles de

transferencia de masa, y con los niveles 25, 55 y 85 °C, para las variables ingenieriles de transferencia de calor. Para realizar la comparación de medias se utilizó la prueba de Fisher (*LSD*) con un $\alpha = 0.05$ en el software estadístico STATGRAPHICS Centurion XVI (Pellegrini-Zurita 2017).

VII RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A Variables fisicoquímicas, nutrimental, nutracéutica y enzimática de zanahoria fresca

1 Variables fisicoquímicas

a Fracturabilidad

La fracturabilidad obtenida para rebanadas de zanahoria fresca fue 16.90 ± 0.69 N. Nunes y col (2011) reportan una fracturabilidad de 16.85 ± 1.44 N para zanahoria fresca, similar a lo obtenido en este estudio.

b Color

Las variables de color obtenidos para zanahoria fresca fueron $L^* = 67.5 \pm 0.23$, $a^* = 26.9 \pm 0.99$, $b^* = 58.6 \pm 0.84$, representan una coloración naranja de acuerdo con el diagrama de cromaticidad $L^*a^*b^*$.

c Humedad

La humedad encontrada en este estudio para zanahoria fresca fue 85.8 ± 1.1 %, concuerda con lo reportado por Rashidi y col (2010), quienes obtuvieron 83.6 ± 3.23 % para zanahoria, mientras que More y Khodke (2023) encontraron 86.7 % para la misma hortaliza.

d pH

El pH obtenido para zanahoria fresca fue 6.51 ± 0.10 , resultado que se encuentra en el rango reportado para zanahoria, Bastidas-Cadpata y Valencia-Chamorro (2015) obtuvieron un rango de pH para zanahoria fresca de 4.64 a 6.92.

e Acidez titulable

La acidez titulable fue 0.15 ± 0.01 % de ácido cítrico para zanahoria fresca, es superior a lo reportado por Jabbar y col (2015), quienes encontraron una acidez titulable para zanahoria fresca de 0.11 ± 0.01 %, las diferencias en esta variable pueden deberse principalmente al suelo y el agua de riego empleada durante el cultivo de la hortaliza.

f Sólidos solubles totales

El contenido de sólidos solubles totales obtenido en zanahoria fresca fue 10.3 ± 0.6 °Brix, el cual se encuentra en el rango reportado para esta hortaliza; Rashidi y col (2010) encontraron para zanahoria un contenido de sólidos solubles totales de 9.83 ± 1.05 °Brix, mientras que Jabbar y col (2015) reportaron 8.00 ± 0.10 °Brix para la misma hortaliza.

2 Variable nutrimental

a Vitamina C

En zanahoria fresca se obtuvieron 17.3 ± 0.43 mg vitamina C / 100 g f.f., resultó superior a los 13.2 ± 3.21 mg vitamina C / 100 g f.f. publicados por Matejková y Petříková (2010), a los 12.46 ± 0.26 mg vitamina C / 100 g f.f. encontrados por Chen y col (2016) y a los 5.9 mg vitamina C / 100 g f.f. reportados por la USDA (2019); estas variaciones pueden deberse al manejo, cuidado de la cosecha y cultivar de la hortaliza estudiada.

3 Variable nutracéutica

a Carotenoides totales

El contenido de carotenoides totales en zanahoria fresca fue 113.7 ± 2.2 mg eq de β -caroteno/100 g s.s., se puede considerar un alimento con un contenido de carotenoides totales aceptable, necesario para la dieta humana. Se encontró cercano al rango reportado, superior a

los 73.0 mg eq. de β -caroteno/100 g s.s. publicados por López-Gómez y col (2021) y similar a los 100.0 mg eq. de β -caroteno/100 g s.s. reportados por Matejková y Petříková (2010).

4 Variable enzimática

a Actividad de peroxidasa

La actividad volumétrica de peroxidasa obtenida en zanahoria fresca fue 1.24 ± 0.09 U/mL, superior a las 0.72 ± 0.21 U/mL encontradas por Tijskens y col (1997) para zanahoria y similar a las 1.22 U/mL obtenidas por Suha y col (2013) para la misma hortaliza. Por otro lado, resultó mayor a la actividad volumétrica mencionada para otras hortalizas, como lo es la papa con 0.53 U/mL, obtenida por Tijskens y col (1997).

B Variables ingenieriles de transferencia de masa

1 Cinéticas de horneado de rebanadas de zanahoria

El contenido de humedad inicial (X_0) encontrado en las zanahorias empleadas para elaborar las cinéticas de horneado fue 8.4 ± 0.4 , 8.0 ± 0.5 y 7.8 ± 0.3 kg H₂O/kg s.s. para 120, 130 y 140 °C, respectivamente. Lo que concuerda con lo reportado para zanahoria; AghbAshlo y col (2011) obtuvieron un contenido de humedad inicial en zanahoria de 8.3 ± 0.36 kg H₂O/kg s.s., mientras que Doymaz (2017) encontró para la misma hortaliza un contenido de humedad inicial de 8.0 kg H₂O/kg s.s.

En la **Figura 7**, se presenta una de las réplicas de las cinéticas de horneado experimentales a 120, 130 y 140 °C. En todos los casos es posible observar que al inicio del proceso existe una pérdida de agua constante con respecto al tiempo; etapa conocida como el periodo de velocidad constante (PVC). Posteriormente, la rapidez con la que el agua es retirada del

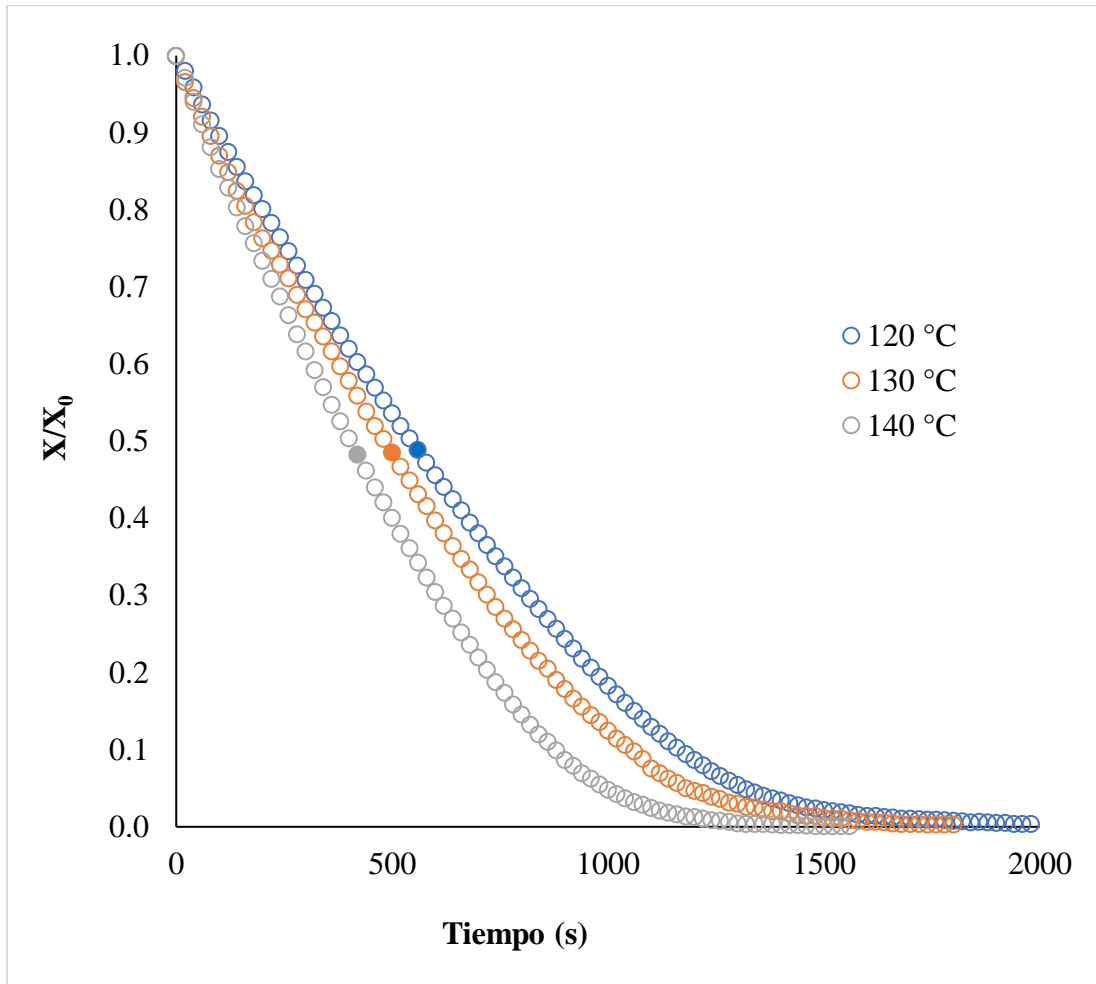


Figura 7. Efecto de la temperatura sobre las cinéticas de horneado de zanahoria.

alimento comienza a disminuir hasta alcanzar un contenido de humedad constante; esta etapa es llamada periodo de velocidad decreciente (PVD), comportamiento que coincide con lo reportado por Botelho y col (2011) para el secado de hortalizas. Asimismo, se aprecia que las curvas de horneado obtenidas corresponden a la forma típica reportadas para frutas y hortalizas.

Por otro lado, se observa que al incrementar la temperatura de horneado se retira humedad del alimento más rápidamente, por lo que el tiempo necesario para completar el horneado del alimento es menor, concuerda con lo reportado por Botelho y col (2011). El tiempo de horneado obtenido a 120, 130 y 140 °C fue de 33, 30 y 26 min, respectivamente.

a Contenido de humedad crítico (X_c)

El contenido de humedad crítico es definido como el punto donde termina el periodo de velocidad constante y da inicio el periodo de velocidad decreciente, es decir, el punto en el que la resistencia interna es la que domina el proceso de pérdida de humedad. En el presente estudio el contenido de humedad crítico durante el horneado de zanahoria se encontró dentro del rango de 3.75 a 4.20 kg H₂O/kg s.s., el cual es cercano a lo reportado por Botelho y col (2011) encontraron un contenido de humedad crítico en secado de zanahoria (100 °C) de 4.2 kg H₂O/kg s.s. En la **Figura 7** se señala el X_c para cada temperatura de estudio; el menor se encontró a 140 °C, mientras que el mayor se obtuvo a 120 °C, esto puede atribuirse a que al aumentar la temperatura se proporciona una mayor cantidad de energía, lo que facilita la pérdida del agua de la superficie del alimento (Caro-Corrales y col 2005) o a las diferencias entre X_0 de cada temperatura. El comportamiento observado es similar a lo reportado por Castro-Beltrán (2022) en un estudio de optimización de la deshidratación de trozos de nopal en un secador convectivo con diferentes condiciones de temperatura y velocidad de aire.

En el **Cuadro 4** se muestran los contenidos de humedad críticos a las diferentes temperaturas de horneado de rebanadas de zanahoria, así como el tiempo necesario para alcanzarlo.

b Densidad de flujo de masa (N_c)

La densidad de flujo de masa durante el horneado de rebanadas de zanahoria se encontró entre 8.3×10^{-3} y 1.1×10^{-2} kg H₂O/m²s. En la **Figura 8** se muestra un gráfico de la densidad de flujo de masa en función de la temperatura, donde es posible observar un aumento lineal a medida que incrementa la temperatura del proceso de horneado.

Variable que incrementó conforme se aumentó la temperatura de horneado; a 140 °C se obtuvo la N_c más alta, mientras que la menor se encontró a 120 °C. El comportamiento observado en este estudio puede atribuirse a que al aumentar la temperatura de estudio aumenta la fuerza impulsora y la capacidad del aire para absorber de humedad (Treybal 2007), por lo que se observa un aumento en esta variable al incrementar la temperatura.

Los resultados obtenidos en este estudio son de orden similar a lo reportado por Sáez-Ceniceros (2019), quien obtuvo densidades de flujo entre 2.27×10^{-4} y 3.86×10^{-4} kg H₂O/m²s al deshidratar rodajas de pera en un secador convectivo, mientras que Castro-Beltrán (2022) encontró una N_c entre 1.84×10^{-4} y 4.98×10^{-4} kg H₂O/m²s al deshidratar trozos de nopal en un secador de túnel. Las diferencias se pueden deber a que en el horneado de alimentos se emplean temperaturas más altas que en la deshidratación, de esta manera el flujo de calor hacia la superficie del alimento sería mayor, finalmente, se tiene una mayor cantidad de energía disponible para la remoción de agua en la superficie de la muestra.

Cuadro 4. Contenido de humedad crítico a diferentes temperaturas de horneado de zanahoria.

Temperatura	Contenido de humedad crítico	Tiempo crítico
(°C)	(kg H ₂ O / kg s.s.)	(s)
120	4.20 ^c	580
130	3.97 ^b	500
140	3.75 ^a	440

Letras diferentes en una misma columna indican diferencias significativas. $\alpha = 0.05$, *LSD*
= 0.172 kg H₂O / kg s.s.

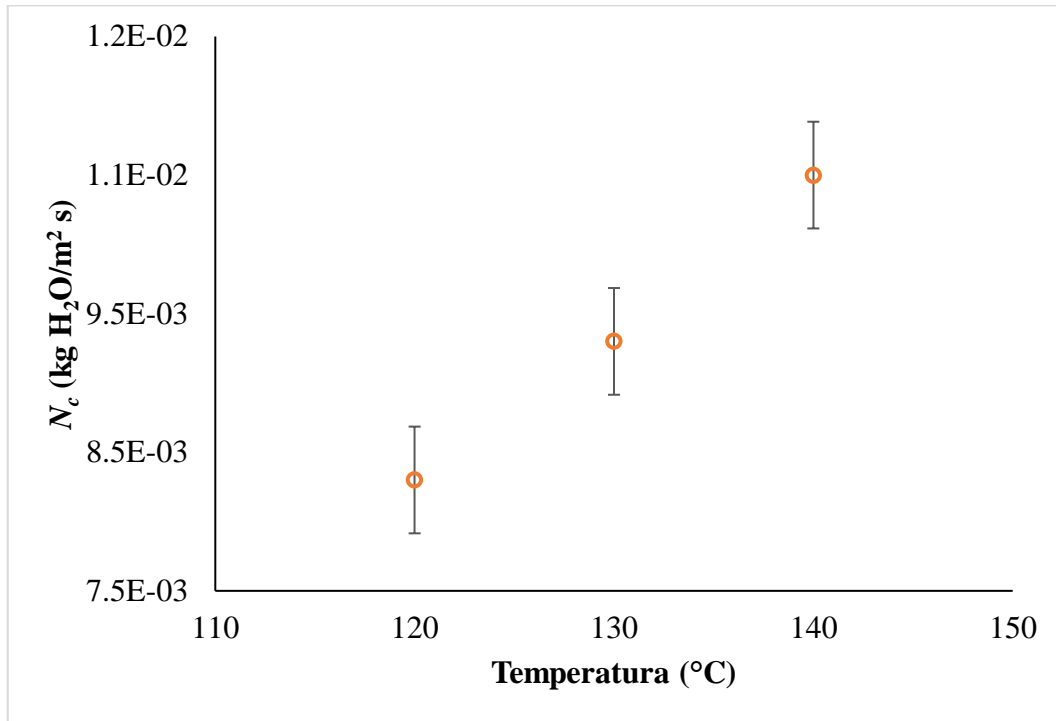


Figura 8. Densidad de flujo de masa (N_c) durante el proceso de horneado de zanahoria en función de la temperatura de horneado ($LSD = 7.7 \times 10^{-4}$ kg H₂O/m² s, $\alpha = 0.05$).

c Coeficiente local de transferencia de masa (k_Y)

El coeficiente local de transferencia de masa en este estudio se encontró en el rango de 2.37×10^{-1} a 2.60×10^{-1} kg H₂O / m²sΔY. En la **Figura 9** se muestra un gráfico del coeficiente local de transferencia de masa en función de la temperatura. Se observa un aumento del coeficiente k_Y al incrementar la temperatura de horneado. Esto se puede atribuir a que, al aumentar la temperatura de estudio existe un mayor suministro de energía, de esta manera se otorga una mayor movilidad a las moléculas de agua, esto facilita la eliminación de agua del alimento.

Los resultados obtenidos en este estudio son de orden similar a lo reportado por Allier-González (2012), quien obtuvo un coeficiente k_Y entre 4.87×10^{-3} y 7.24×10^{-3} kg H₂O/m² s ΔY al deshidratar rodajas de papa en un secador convectivo. Por otro lado, Castro-Beltrán (2022) encontró un coeficiente k_Y entre 9.3×10^{-3} y 2.5×10^{-2} kg H₂O/m² s ΔY al deshidratar trozos de nopal en un secador de túnel, se observó también una tendencia de aumento de esta variable al incrementar la temperatura de secado. Las diferencias entre los resultados obtenidos pueden deberse a que en la técnica de horneado de alimentos se utilizan altas temperaturas, mayores a los 100 °C, debido a esto se dispone de una mayor cantidad de energía para la remoción de agua en la superficie de la muestra.

Por otro lado, en el **Cuadro 5** se muestran de forma resumida las variables ingenieriles de transferencia de masa evaluadas a diferentes temperaturas, posteriormente, se utilizaron para realizar la simulación de la transferencia de masa durante el horneado de rebanadas de zanahoria, específicamente en el periodo de velocidad decreciente de dicho proceso.

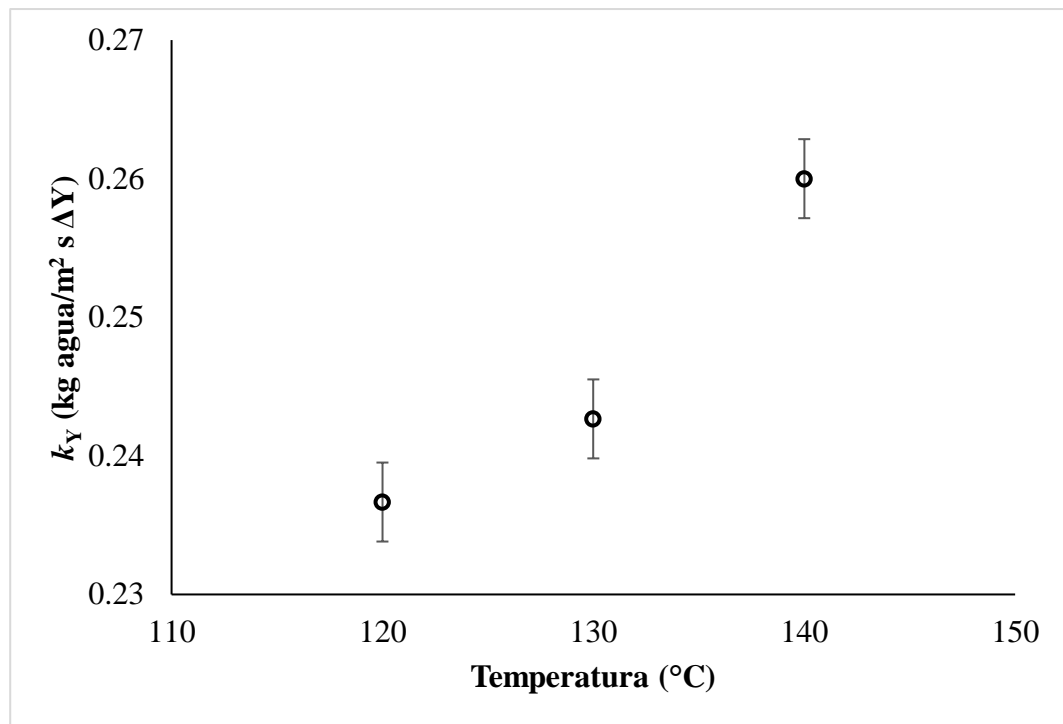


Figura 9. Coeficiente local de transferencia de masa (k_Y) durante el proceso de horneado de zanahoria en función de la temperatura de horneado ($LSD = 5.7 \times 10^{-3}$ kg H₂O/m² s ΔY, $\alpha = 0.05$).

Cuadro 5. Variables ingenieriles de transferencia de masa durante el horneado de zanahoria.

Variable	120 °C	130 °C	140 °C
X_C (kg H ₂ O/kg s.s.)	4.20 ^c	3.97 ^b	3.75 ^a
N_c (kg H ₂ O/m ² s)	8.3×10 ^{-3a}	9.3×10 ^{-3b}	1.1×10 ^{-2c}
k_Y (kg H ₂ O/m ² sΔY)	2.36×10 ^{-1a}	2.4×10 ^{-1b}	2.6×10 ^{-1c}

Letras diferentes en una misma fila indican diferencias significativas. Para X_C , N_c y k_Y , el $LSD = 0.172$ kg H₂O/kg s.s., 7.7×10^{-4} kg H₂O/m² s y 5.7×10^{-3} kg H₂O/m² s ΔY, respectivamente $\alpha = 0.05$.

2 Periodo de velocidad decreciente

a Difusividad efectiva variable (D_e)

La difusividad efectiva variable se calculó al considerar una función cuadrática del tiempo, se realizó un análisis de regresión y se obtuvieron los coeficientes de difusividad efectiva inicial (D_0), velocidad de cambio inicial (D_1) y disminución de la velocidad inicial (D_2). De igual manera, se obtuvo una difusividad con un comportamiento del tiempo lineal ($D_2 = 0$) y, finalmente, se examinó una difusividad constante ($D_1 = D_2 = 0$).

En la **Figura 10** se muestra el comportamiento de la difusividad efectiva variable (**Figura 10A**) y la cinética de horneado experimental y estimada durante el periodo de velocidad decreciente (**Figura 10B**) para el horneado de zanahoria a 120 °C.

Para el horneado de zanahoria a 120 °C, se encontró una difusividad efectiva variable de 7.67×10^{-12} a 2.23×10^{-9} m²/s, lo que se encuentra en el rango reportado para la difusividad efectiva de la humedad en alimentos. Para este caso, la difusividad efectiva inicial fue $D_0 = 7.67 \times 10^{-12}$ m²/s, la velocidad inicial de cambio fue $D_1 = 3.24 \times 10^{-12}$ m²/s² y la disminución de la velocidad inicial fue $D_2 = -1.17 \times 10^{-15}$ m²/s³. Al analizar la difusividad con un comportamiento lineal del tiempo se obtuvo en un rango de 1.19×10^{-10} a 2.96×10^{-9} m²/s, se tiene como parámetros $D_0 = 1.19 \times 10^{-10}$ m²/s y $D_1 = 2.22 \times 10^{-12}$ m²/s². Finalmente, al examinar la difusividad constante a lo largo del periodo de velocidad decreciente, el parámetro D_0 encontrado fue 8.41×10^{-10} m²/s.

En la **Figura 11** se muestra el comportamiento de la difusividad efectiva variable (**Figura 11A**) y la cinética de horneado tanto experimental como estimada durante el periodo de velocidad decreciente (**Figura 11B**) para el horneado de zanahoria a 130 °C.

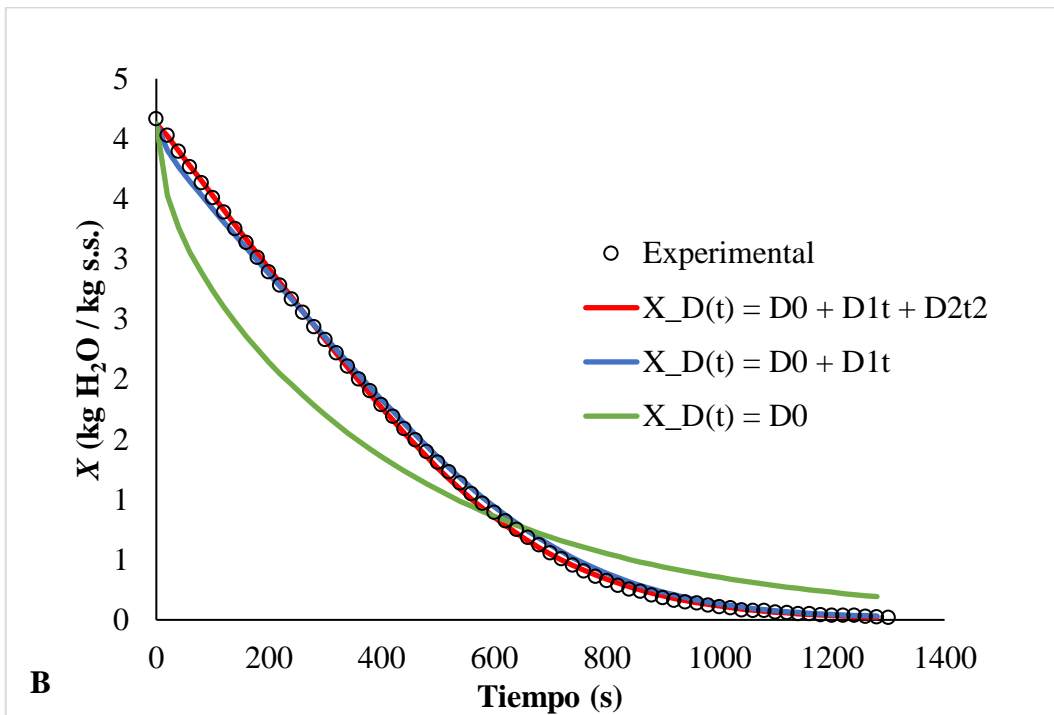
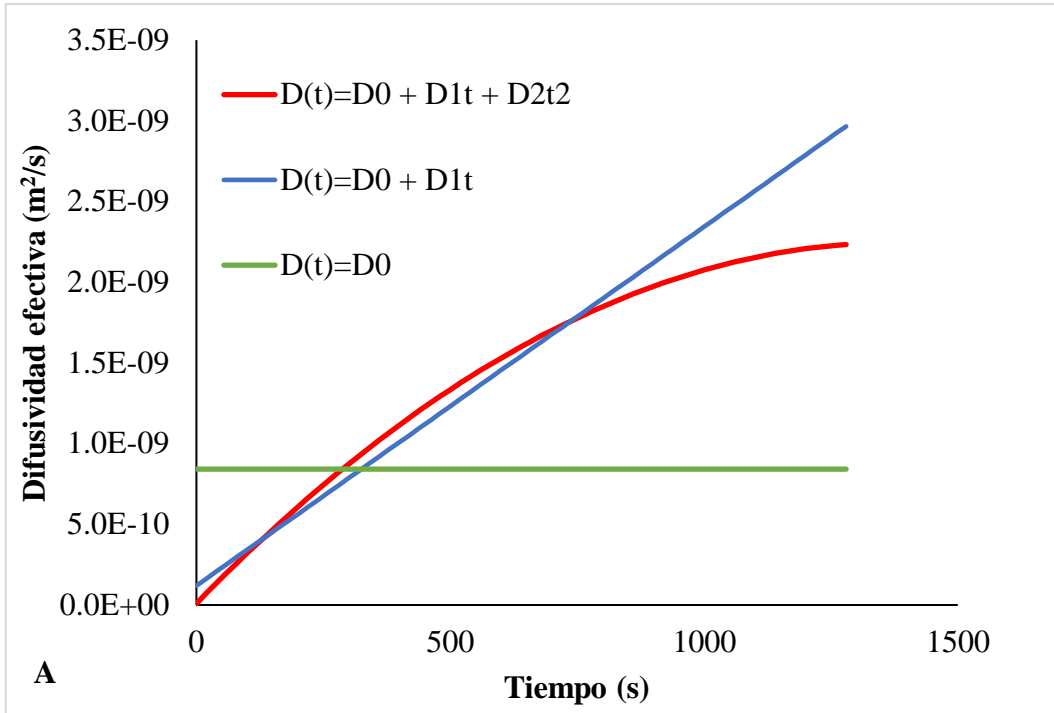


Figura 10. A) Difusividades efectivas estimadas y B) cinéticas de horneado experimental y estimadas al considerar una D_e variable como función cuadrática, lineal y constante del tiempo para el horneado de zanahoria a $120\text{ }^\circ\text{C}$.

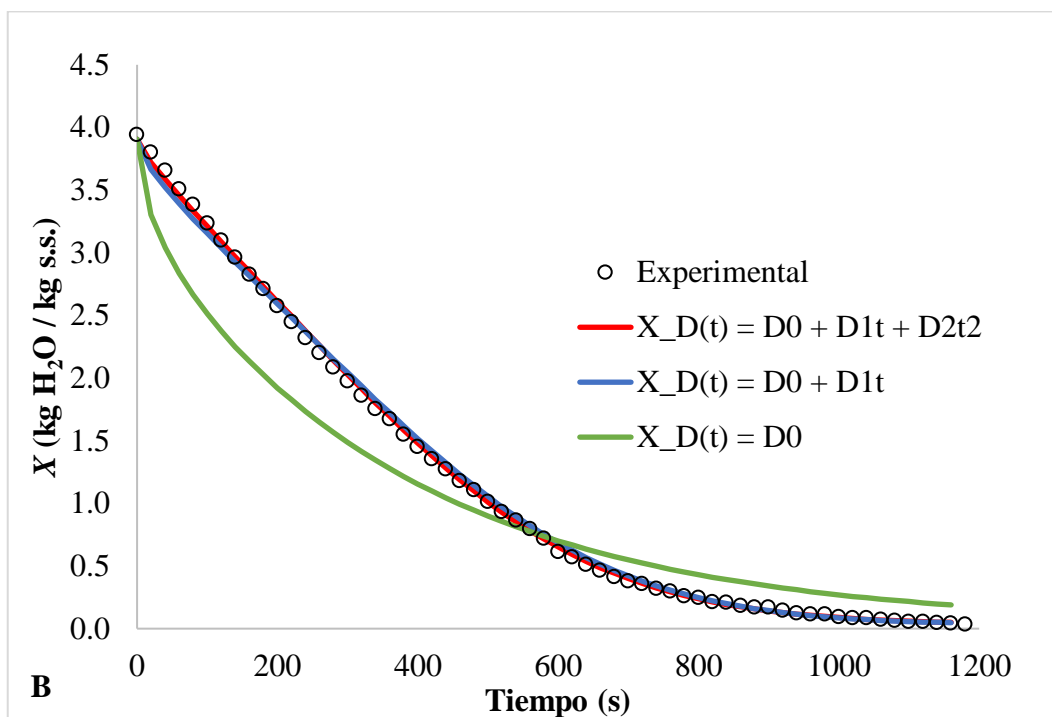
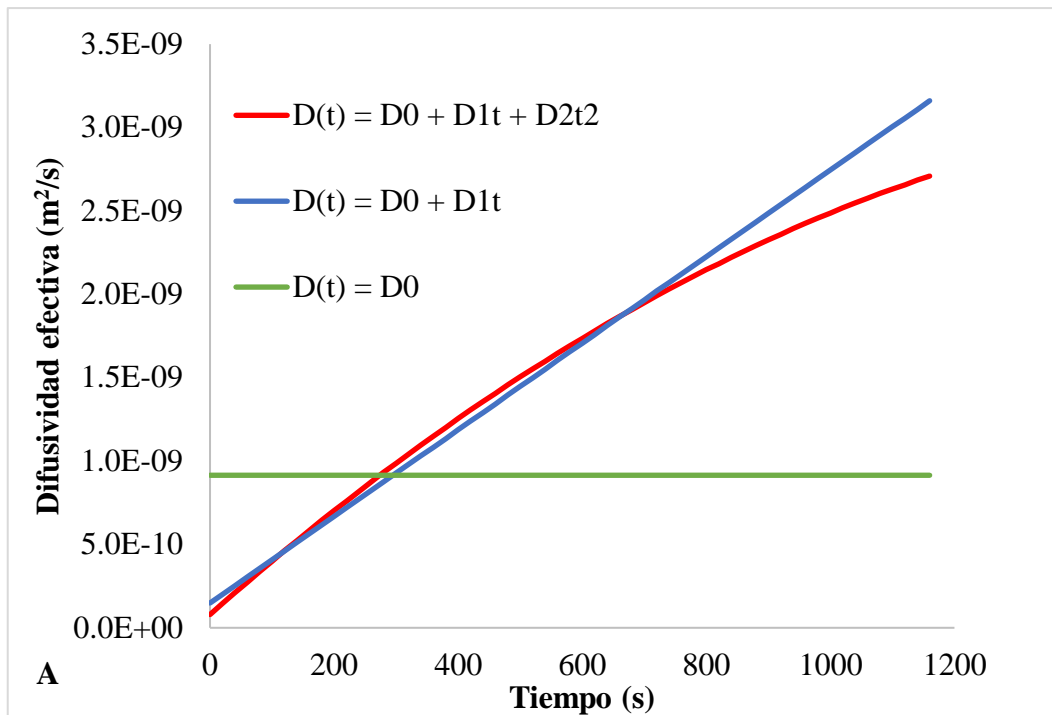


Figura 11. A) Difusividades efectivas estimadas y B) cinéticas de horneado experimental y estimadas al considerar una D_e variable como función cuadrática, lineal y constante del tiempo para el horneado de zanahoria a 130 °C.

Para el horneado de zanahoria a 130 °C, se obtuvo una difusividad efectiva variable de 7.92×10^{-11} a 2.71×10^{-9} m²/s. La difusividad efectiva inicial que se encontró fue $D_0 = 7.92 \times 10^{-12}$ m²/s; por otra parte, la velocidad inicial de cambio obtenida fue $D_1 = 3.29 \times 10^{-12}$ m²/s² y la disminución de la velocidad inicial fue $D_2 = -8.83 \times 10^{-16}$ m²/s³. Al analizar la difusividad con un comportamiento lineal del tiempo se obtuvo en un rango de 1.49×10^{-10} a 3.16×10^{-9} m²/s, se tiene como parámetros D_0 y D_1 , 1.49×10^{-10} m²/s y 2.59×10^{-12} m²/s², respectivamente. Finalmente, al examinar la difusividad constante a lo largo del periodo de velocidad decreciente, el parámetro D_0 encontrado fue 9.15×10^{-10} m²/s.

Por último, en la **Figura 12** se muestra el comportamiento de la difusividad efectiva variable (**Figura 12A**) y la cinética de horneado experimental y estimada durante el periodo de velocidad decreciente (**Figura 12B**) para el horneado de zanahoria a 140 °C.

Para el horneado de zanahoria a 140 °C se encontró una difusividad efectiva variable en el rango de 9.07×10^{-11} a 3.62×10^{-9} m²/s. Para este caso, la difusividad efectiva inicial fue $D_0 = 9.07 \times 10^{-11}$ m²/s, la velocidad inicial de cambio fue $D_1 = 4.65 \times 10^{-12}$ m²/s² y la disminución de la velocidad inicial fue $D_2 = -1.20 \times 10^{-15}$ m²/s³. Al examinar la difusividad con un comportamiento lineal del tiempo se obtuvo en un intervalo de 1.67×10^{-10} a 4.12×10^{-9} m²/s, se tiene como parámetros $D_0 = 1.67 \times 10^{-10}$ m²/s y $D_1 = 3.79 \times 10^{-12}$ m²/s². Finalmente, al probar la difusividad constante a lo largo del periodo de velocidad decreciente, el parámetro D_0 encontrado fue 1.17×10^{-9} m²/s.

Al emplear la difusividad constante en la solución analítica para la estimación del contenido de humedad promedio se obtuvieron predicciones inicialmente menores al contenido de humedad obtenido experimentalmente y, posteriormente mayores al contenido de humedad, comportamiento observado por Xu y Kerr (2012) e Iribe-Salazar y col (2018), por lo

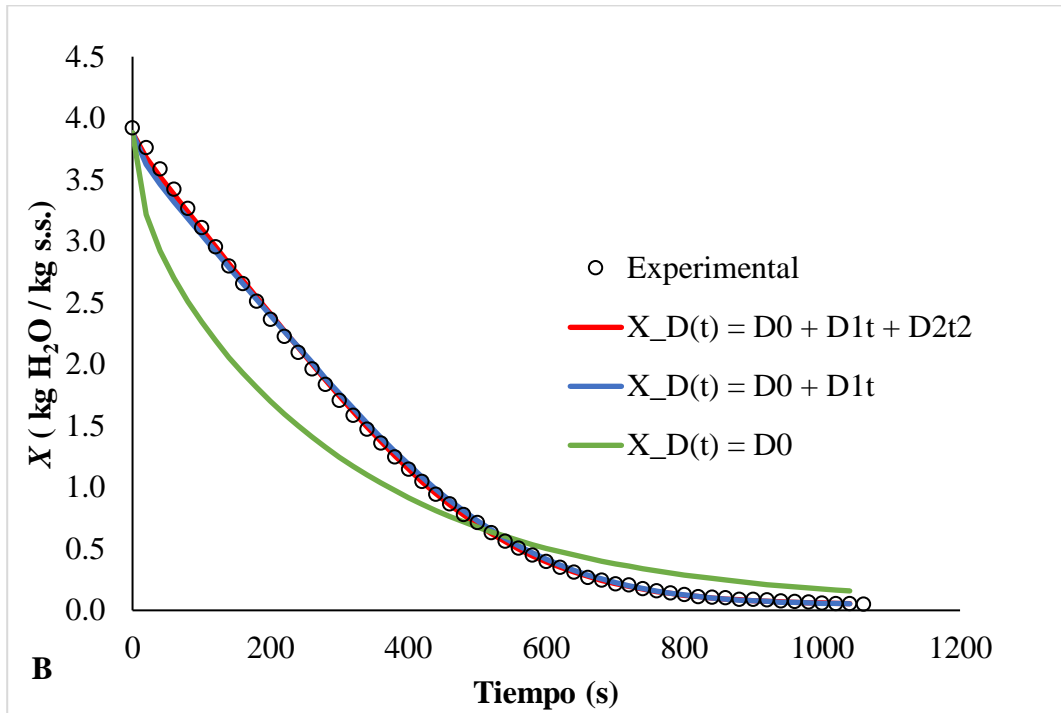
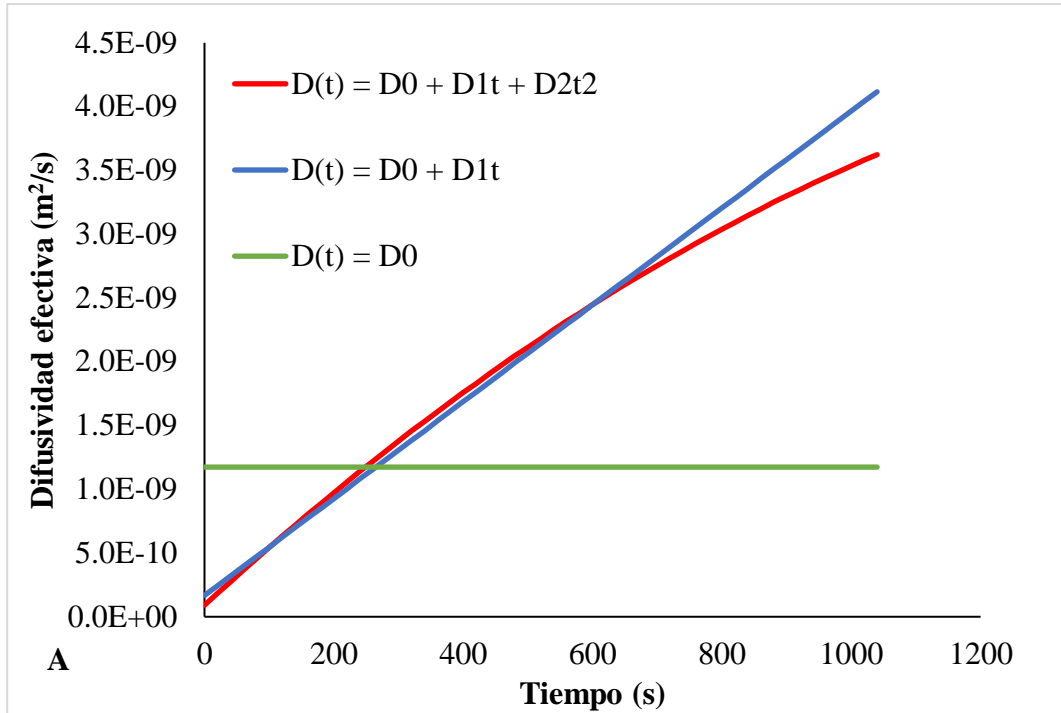


Figura 12. A) Difusividades efectivas estimadas y B) cinéticas de horneado experimental y estimadas al considerar una D_e variable como función cuadrática, lineal y constante del tiempo para el horneado de zanahoria a 140 °C.

que no son consideradas predicciones adecuadas. Por otro lado, al sustituir las difusividades con un comportamiento lineal en la solución analítica se obtuvieron ajustes adecuados para las tres temperaturas ($R^2 > 0.9$ para 120, 130 y 140 °C). Mientras que, al emplear la difusividad con un comportamiento del tiempo cuadrático se obtuvieron las mejores predicciones del contenido de humedad promedio ya que se encontró un mejor ajuste a los datos experimentales ($R^2 = 0.999$, para las tres temperaturas estudiadas), esto puede atribuirse a que la difusividad de la humedad en alimentos tiene un comportamiento variable durante el proceso.

La difusividad efectiva obtenida para rebanadas de zanahoria horneadas es similar a lo reportado por Sáez-Ceniceros (2019) quien encontró difusividades en el rango de 4.8×10^{-11} a 1.1×10^{-9} m²/s durante el secado de pera. También es similar a lo reportado por Iribe-Salazar y col (2018), reportaron para tortilla horneada difusividades en el rango de 4.3×10^{-11} a 1.38×10^{-9} m²/s y obtuvieron predicciones similares a las encontradas en este estudio.

De igual manera, se observó un aumento en la difusividad efectiva al incrementar la temperatura del aire de horneado; lo que puede atribuirse a que, al aumentar el calor suministrado al material, se logra que la humedad migre desde el interior a la superficie de la muestra de una manera más rápida. La difusividad también se ve afectada por la porosidad y la estructura del alimento, la cual se modifica durante el proceso de horneado lo que ocasiona que la difusión varíe con respecto al tiempo (Sáez-Ceniceros 2019).

C Variables ingenieriles de transferencia de calor

1 Propiedades termofísicas de zanahoria

a Difusividad térmica (α)

En la **Figura 13** se observa el comportamiento de la difusividad térmica de zanahoria en función de la temperatura. Se encontró una tendencia de aumento lineal conforme se incrementa la temperatura del alimento, concuerda con lo reportado por Iribe-Salazar y col (2015) para brócoli. Esta variable se encontró en un intervalo de 1.44×10^{-7} a 1.86×10^{-7} m²/s, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.97, el modelo de predicción fue:

$$\alpha = 7 \times 10^{-10} T + 1 \times 10^{-7}$$

La difusividad térmica obtenida a 25 °C es similar a la reportada por Murakami (1997), reporta una difusividad térmica para zanahoria a temperatura ambiente de 1.44×10^{-7} m²/s. El mismo autor encontró para papa, valores de difusividad térmica de 1.44×10^{-7} m²/s.

Las difusividades térmicas obtenidas en este estudio indican que la transferencia de calor en estado no estacionario ocurrirá de manera lenta. De acuerdo con lo reportado por Vidaurre-Ruiz y Castañeda-Muñoz (2014), la difusividad térmica en alimentos se encuentra entre 1.0×10^{-7} y 2.36×10^{-7} m²/s, difusividades típicas encontradas a temperatura ambiente y durante el procesamiento de alimentos.

b Conductividad térmica (k)

En la **Figura 14** se presenta la conductividad térmica de zanahoria en función de la temperatura. Se observa que esta propiedad aumenta de manera lineal a medida que incrementa la temperatura. En alimentos, el contenido de humedad y la temperatura son factores con gran influencia sobre la conductividad térmica (Alvarado 2014). La

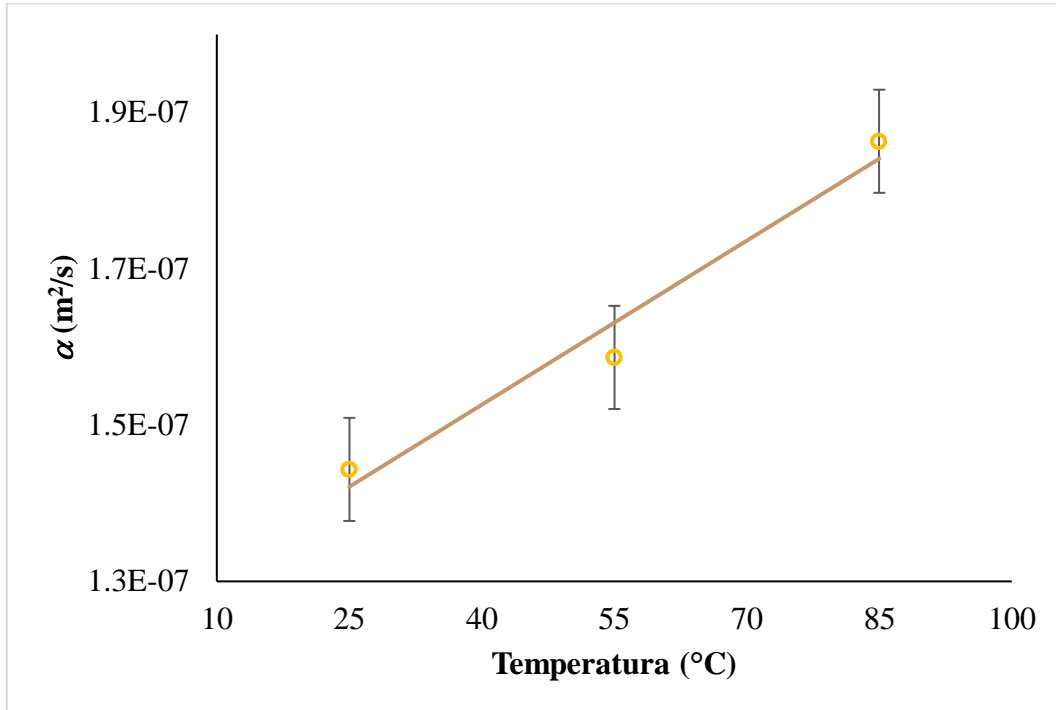


Figura 13. Difusividad térmica (α) para zanahoria en función de la temperatura ($LSD = 1.32 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, $\alpha = 0.05$).

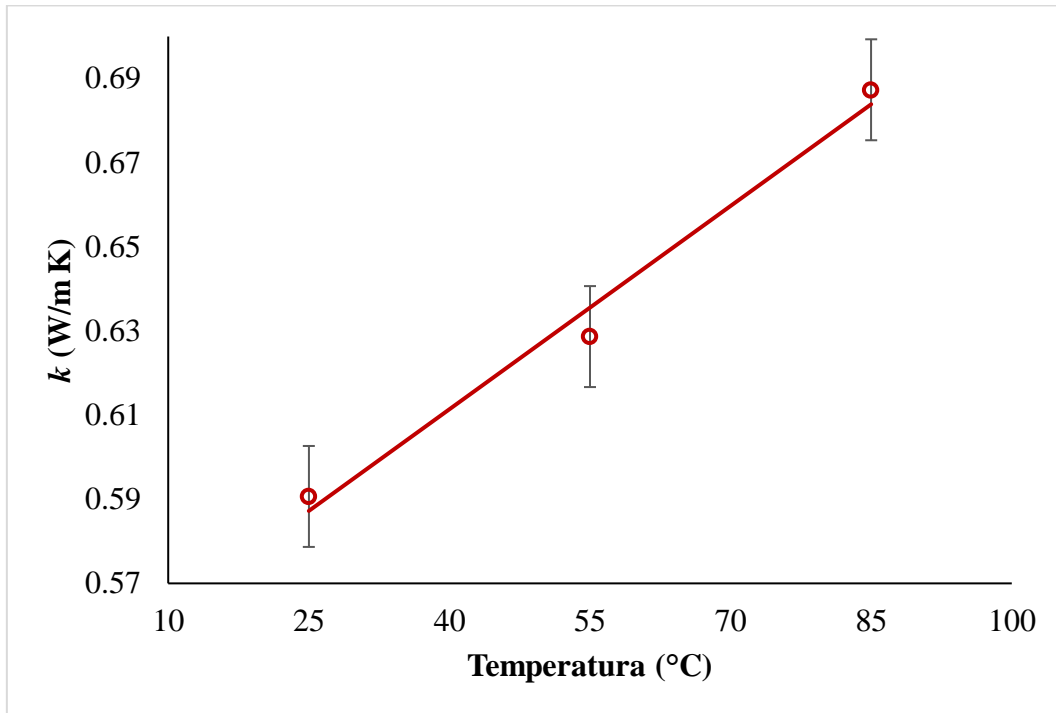


Figura 14. Conductividad térmica (k) para zanahoria en función de la temperatura ($LSD = 0.024$ W/m K, $\alpha = 0.05$).

conductividad térmica se encontró en un intervalo de 0.591 W/m K a 25 °C hasta 0.687 W/m K a 85 °C, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.99, indica un buen ajuste lineal, el modelo de predicción para esta variable fue:

$$k = 0.0016T + 0.547$$

La conductividad térmica obtenida a temperatura ambiente es similar a lo reportado por Sweat (1974), encontró para zanahoria a temperatura ambiente una k de 0.605 W/m K. Por otro lado, Murakami (1997) encontró, para la misma hortaliza, una conductividad térmica de 0.569 W/m K y para papa de 0.563 W/m K.

Las conductividades térmicas encontradas en el presente estudio indican que la zanahoria no es un buen material conductor de calor, lo que indica que la transferencia de calor en dicha hortaliza en procesos de secado, refrigeración o cocción se llevará a cabo de manera lenta.

Iribe-Salazar y col (2015) observaron una tendencia de aumento lineal en la conductividad térmica de brócoli al incrementar la temperatura de estudio, concuerda con la tendencia observada en este estudio.

c Densidad aparente (ρ)

El comportamiento de la densidad aparente de zanahoria frente a las diferentes temperaturas de estudio se observa en la **Figura 15**, se puede apreciar que la densidad tuvo una disminución lineal a medida que se incrementó la temperatura de estudio. El rango encontrado para zanahoria fue de 956 a 1105 kg/m³, con un coeficiente de determinación(R^2) de 0.99 y el modelo de predicción para esta propiedad fue:

$$\rho = -2.4965T + 1172.4$$

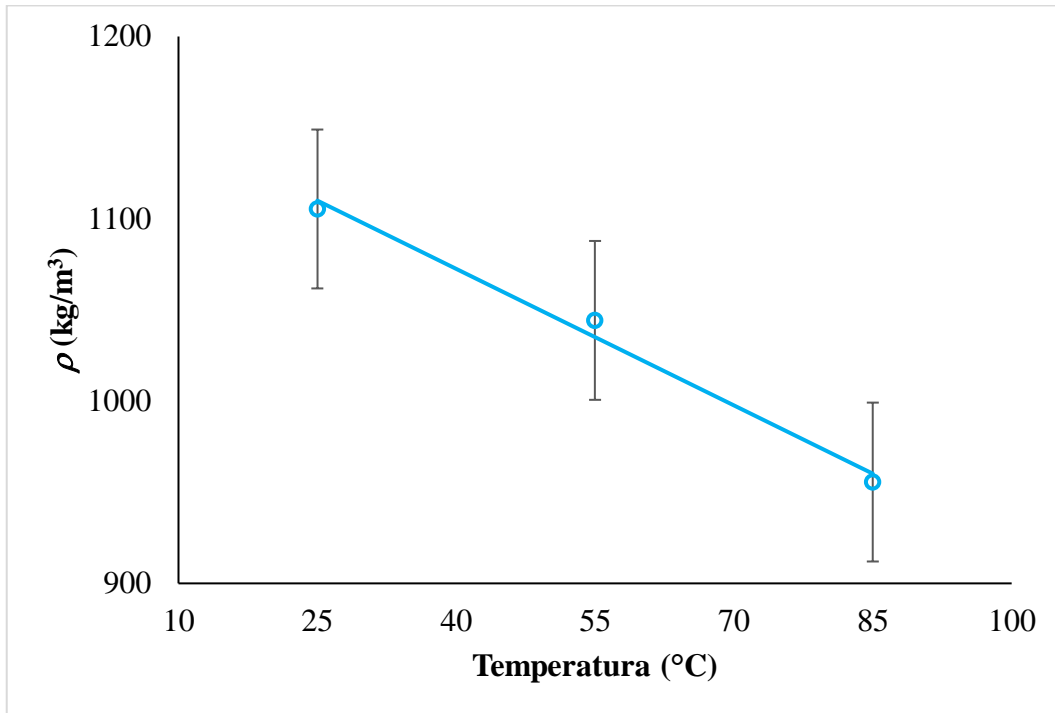


Figura 15. Densidad aparente (ρ) para zanahoria en función de la temperatura ($LSD = 87.1$ kg/m³, $\alpha = 0.05$).

La densidad aparente obtenida en este estudio es similar a lo reportado para alimentos de origen vegetal; Murakami (1997) encontró para zanahoria fresca una densidad aparente de 1029 kg/m^3 y para papa 1089 kg/m^3 , mientras que Alzate (2003) encontró para esta misma hortaliza una densidad de 1040 kg/m^3 . La densidad es una propiedad de suma importancia, ya que ayuda en la separación entre frutos intactos y aquellos que se encuentran con algún tipo de daño, por ende, es una propiedad que ayuda a evaluar la calidad del fruto (Ikegwu y Ekwu 2009).

d Capacidad calorífica específica (C_p)

La capacidad calorífica específica de zanahoria a diferentes temperaturas se muestra en la **Figura 16**. En la C_p no se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) a medida que aumentó la temperatura de la muestra en los niveles estudiados. La capacidad calorífica específica se obtuvo en un rango de 3710 a 3865 J/kg K.

La capacidad calorífica específica encontrada para zanahoria a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ fue similar a los 3849 J/kg K reportado por Murakami (1997) para zanahoria, dicho autor encontró en papa una C_p de 3603 J/kg K , mientras que Alzate (2003) reportó una C_p para zanahoria de 3700 J/kg K .

Las altas capacidades caloríficas obtenidas indican que se requieren grandes cantidades de energía para calentar las muestras de zanahoria, lo que puede atribuirse al alto contenido de humedad de la hortaliza y a la composición química (Ikegwu y Ekwu 2009).

2 Coeficiente convectivo de transferencia de calor (h)

El coeficiente convectivo de transferencia de calor (h) estimado durante el proceso de horneado de zanahoria a $120 \text{ }^\circ\text{C}$ fue $37.1 \pm 0.2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, calculado con el método de

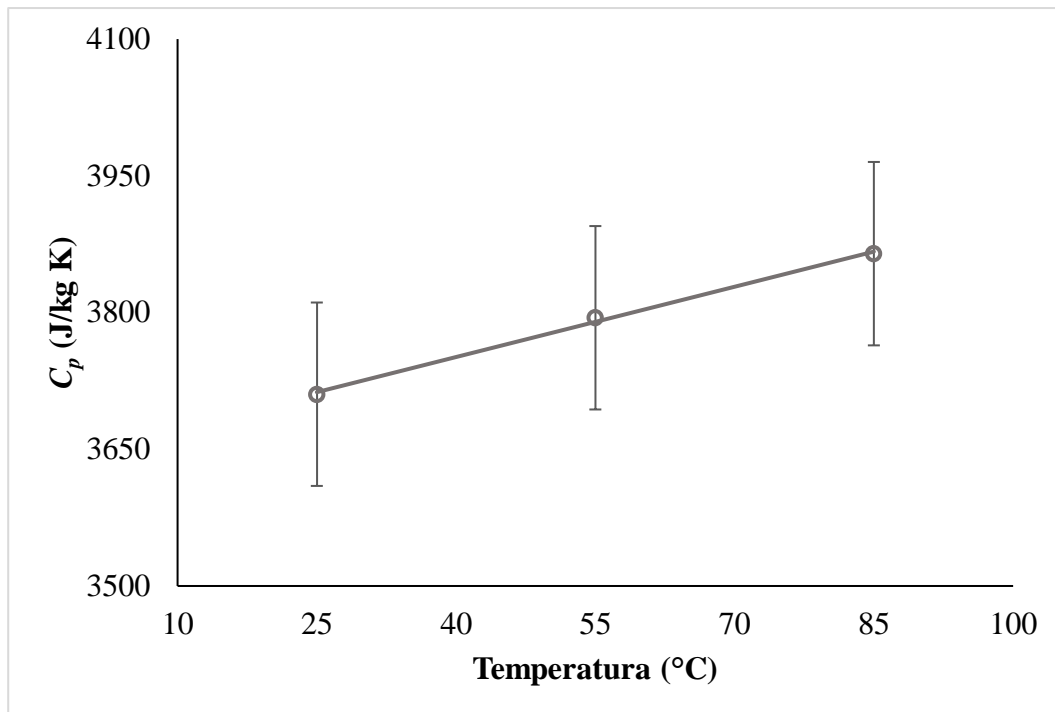


Figura 16. Capacidad calorífica específica (C_p) para zanahoria en función de la temperatura ($LSD = 201.2$ J/kg K, $\alpha = 0.05$).

parámetros concentrados. En la **Figura 17** se muestra el gráfico empleado para la determinación del coeficiente convectivo de transferencia de calor (h).

Manrique (2002) reportó coeficientes típicos h en un intervalo de 2 a 250 W/m² K para procesos de convección en gases, mismo rango que reporta Cengel (2007), rangos en los que se encuentra el coeficiente convectivo de transferencia de calor obtenido en el este estudio.

Sakin y col (2009) estimaron el coeficiente convectivo de transferencia de calor durante el proceso de horneado a temperaturas de 70 hasta 220 °C y reportan coeficientes convectivos de transferencia de calor de 10 a 34 W/m² K, utilizaron un cilindro de aluminio como modelo. El coeficiente h obtenido en este estudio es cercano al rango reportado por dichos investigadores.

Las variaciones del coeficiente convectivo de transferencia de calor pueden atribuirse principalmente a la geometría del alimento, velocidad del fluido, a la diferencia de temperatura empleada durante las determinaciones y a las propiedades del fluido utilizado para el calentamiento o enfriamiento del alimento.

D Contraste de variables fisicoquímicas, nutrimental, nutracéutica y enzimática de zanahoria horneada respecto al fresco

a Fracturabilidad

En la **Figura 18** se presenta la fuerza máxima de fractura para rebanadas de zanahoria fresca y horneada a 120, 130 y 140 °C.

Para rebanadas de zanahoria horneada a 120, 130 y 140 °C se obtuvo una fracturabilidad de 6.61 ± 0.60 , 5.30 ± 0.30 y 4.02 ± 1.20 N, respectivamente; fracturabilidad similar a lo reportado por Sulaeman y col (2003), encontraron fuerzas máximas de fractura para chips de zanahoria en un rango de 4.90 a 6.73 N. Por otro lado, para rebanadas de zanahoria fresca se

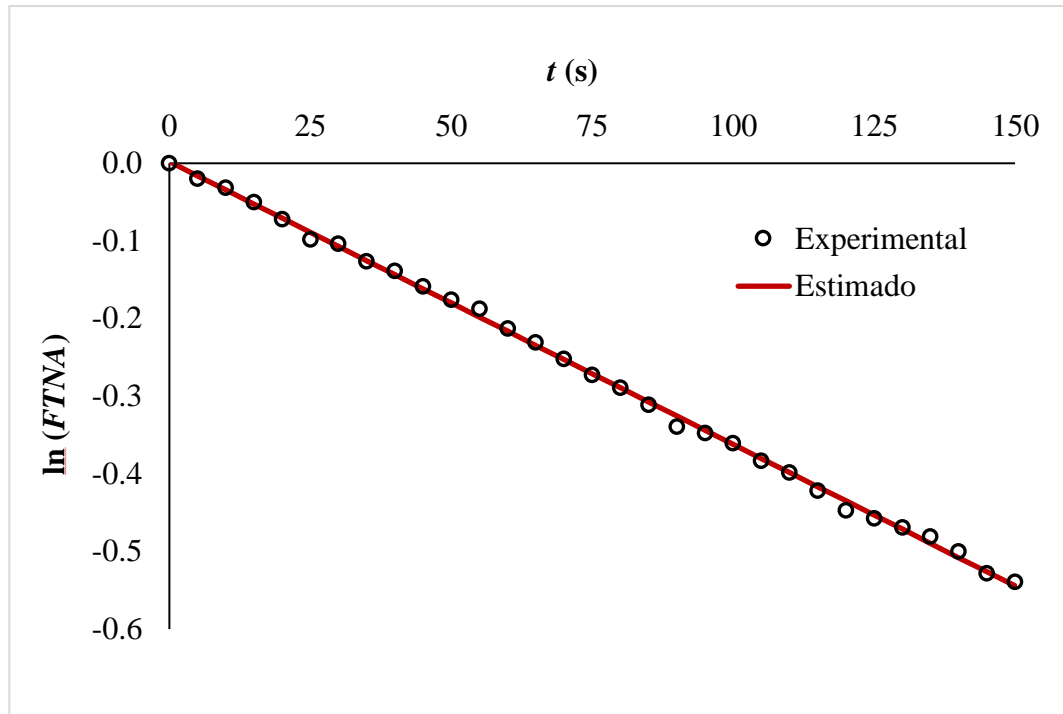


Figura 17. Gráfico de logaritmo natural de la fracción de temperatura no alcanzada contra tiempo durante el proceso de horneado de zanahoria a 120 °C.

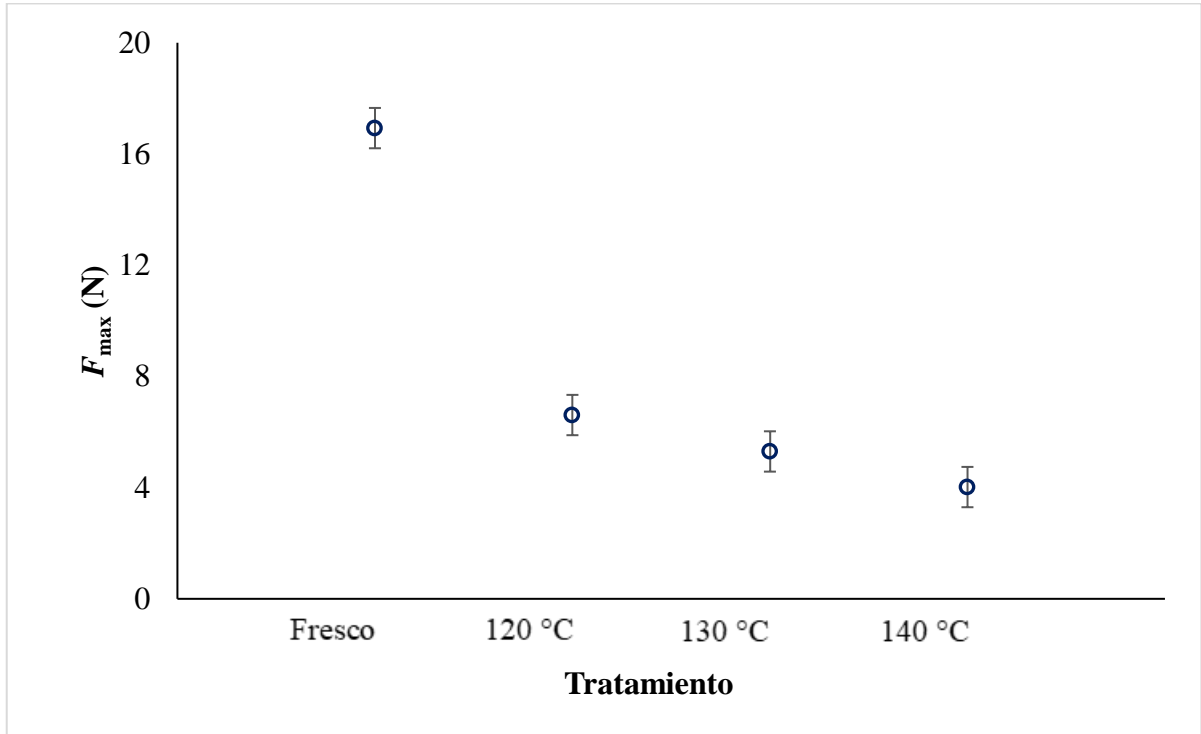


Figura 18. Fuerza máxima de fractura para rebanadas de zanahoria fresca y horneada a 120, 130 y 140 °C, respectivamente ($LSD = 1.45$ N, $\alpha = 0.05$).

encontró una fuerza máxima de fractura de 16.9 ± 0.69 N, la reducción significativa de esta variable puede atribuirse a la formación de poros y grietas a medida que avanza el proceso de horneado, de esta manera, propicia que la estructura sea menos rígida y más frágil (Xu y Kerr 2012).

b Color y diferencia total de color

En el **Cuadro 6** se presentan las variables L^* , a^* y b^* de color para zanahoria horneada a 120, 130 y 140 °C, así como la diferencia total de color entre cada tratamiento con respecto al fresco. En la variable L^* se observa una disminución de 67.5 a 57.6, esto puede atribuirse a que dicha variable de color está relacionada con la cantidad de agua en la muestra; por otro lado, la variable a^* disminuyó de 26.9 a 7.25, esto puede deberse a la oxidación de diferentes compuestos como los carotenoides, reacciones de Maillard y oxidación de la vitamina C, lo que explica el cambio de color de un naranja brillante a un naranja opaco o café. Por último, la variable b^* varió de 58.6 a 41.9, concuerda con la aparición de colores más oscuros en las muestras procesadas (Cuastumal y col 2016; Wu y col 2018).

La ΔE encontrada fue 12.3 ± 0.8 , 20.0 ± 1.4 y 27.7 ± 2.7 , para 120, 130 y 140 °C, respectivamente. La tendencia de un aumento en la diferencia total de color al aumentar la temperatura de proceso concuerda con lo reportado por Demiray y Tulek (2014). Los resultados obtenidos son mayores a lo encontrado por Chen y col (2016), reportan un rango de ΔE de 8.4 a 14.9 para el secado de zanahoria y son similares al 26.3 indicado por Tuta y Palazoglu (2017) para el horneado de papa.

En el **Cuadro 6** se presentan las variables de color y la ΔE obtenidas para zanahoria horneada; es posible apreciar que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre algunas de las variables de respuesta.

Cuadro 6. Variables de color y diferencia total de color de zanahoria horneada.

Variable	120 °C	130 °C	140 °C	LSD
<i>L*</i>	62.8 ^{b*}	59.1 ^{a*}	57.6 ^{a*}	2.7
<i>a*</i>	22.1 ^{c*}	17.9 ^{b*}	7.25 ^{a*}	3.6
<i>b*</i>	48.7 ^{b*}	43.1 ^{b*}	41.9 ^{a*}	4.2
ΔE	12.3 ^a	20.0 ^b	27.7 ^b	3.6

Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas ($\alpha = 0.05$).

Indica diferencia significativa respecto al fresco ($L_f^ = 67.5$, $a_f^* = 26.9$, $b_f^* = 58.6$).

2 Variable nutrimental

a Vitamina C

En el **Cuadro 7** se observa que existe una disminución ($p < 0.05$) del contenido de vitamina C en zanahoria horneada a las tres temperaturas estudiadas respecto al fresco (129.0 ± 3.2 mg de vitamina C / 100 g s.s.). De acuerdo con Ordóñez-Santos y col (2013) estas reducciones pueden atribuirse a reacciones químicas que involucran la oxidación de este ácido. Por otro lado, los porcentajes de retención (**Cuadro 7**) concuerdan con lo reportado por la USDA (2017), reporta una retención de vitamina C del 70 % para alimentos de origen vegetal horneados. Por otra parte, Hwang y col (2014) obtuvieron una disminución del 30.14 % de este nutrimento durante el horneado de rebanadas de camote. Las retenciones de vitamina C pueden atribuirse a que es un nutrimento termolábil y altamente soluble en agua, por lo que, durante el horneado se evitan pérdidas por lixiviación al no estar la muestra sumergida en agua.

3 Variable nutracéutica

a Carotenoides totales

En el **Cuadro 8** se muestran los resultados obtenidos para el análisis de carotenoides totales después del horneado de zanahoria.

El contenido de carotenoides totales fue afectado por el horneado de zanahoria, disminuyó de 113.7 ± 2.2 mg eq de β -caroteno/100 g s.s. a 24.9 ± 0.3 , 16.9 ± 0.4 y 15.1 ± 0.3 mg eq. de β -caroteno/100 g s.s., indica un porcentaje de retención del 21.9, 14.9 y 13.3 % para las temperaturas de 120, 130 y 140 °C, respectivamente. Hiranvarachat y col (2011), Zielinska y

Cuadro 7. Variable nutrimental de zanahoria horneada respecto al fresco.

Condición del alimento	Vitamina C (mg/100 g s.s.)	% de retención
Horneado (120 °C)	86.3 ^{c*}	66.9
Horneado (130 °C)	54.9 ^{b*}	42.6
Horneado (140 °C)	25.7 ^{a*}	20.9

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($LSD = 7.61$ mg/100 g s.s., $\alpha = 0.05$).

*Indica diferencia significativa respecto al fresco (Vitamina C = 128.9 mg/100 g s.s.)

Cuadro 8. Variable nutracéutica de zanahoria horneada.

Condición del alimento	Carotenoides totales (mg eq de β-caroteno/100 g s.s.)	% de retención
Horneado (120 °C)	24.9 ^{c*}	21.9
Horneado (130 °C)	16.9 ^{b*}	14.9
Horneado (140 °C)	15.1 ^{a*}	13.3

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ($LSD = 0.7$ mg/100 g s.s., $\alpha = 0.05$).

*Indica diferencia significativa respecto al fresco (Carotenoides totales = 113.7 mg eq de β -caroteno/100 g s.s.)

Markouski (2011) y Hiranvarachat y col (2012) reportan retenciones de carotenoides desde el 14 al 82 % para diferentes condiciones de secado de zanahoria con aire caliente. Los resultados obtenidos en este estudio concuerdan con lo reportado por Eim y col (2013), observaron una degradación de carotenoides totales durante el secado de cilindros de zanahoria, se obtuvieron porcentajes de retención similares.

4 Variable enzimática

a Actividad de peroxidasa

La actividad enzimática de la peroxidasa presentó una disminución ($p < 0.05$) al comparar zanahoria fresca con respecto a las muestras horneadas, al reducirse de 1.24 ± 0.09 U/mL a 0.002 ± 0.0006 , 0.0006 ± 0.0004 y 0.0005 ± 0.0002 U/mL, para las temperaturas de 120, 130 y 140 °C, respectivamente. Lo mencionado anteriormente se considera deseable, puesto que la peroxidasa es reconocida como una de las enzimas que provocan el deterioro de los alimentos, al inactivar parcial o completamente esta enzima se promueve un incremento en la vida de anaquel del alimento procesado.

E TRANSFERENCIA SIMULTÁNEA DE CALOR Y MASA

En las **Figuras 19, 20 y 21** se exhiben la historia de temperatura promedio del alimento, los gráficos de Arrhenius a partir de los cuales se estimó la de energía de activación empleada para predecir la difusividad efectiva de la humedad en función de la temperatura promedio del alimento y las cinéticas del contenido de humedad experimentales para las temperaturas de estudio (120, 130 y 140 °C).

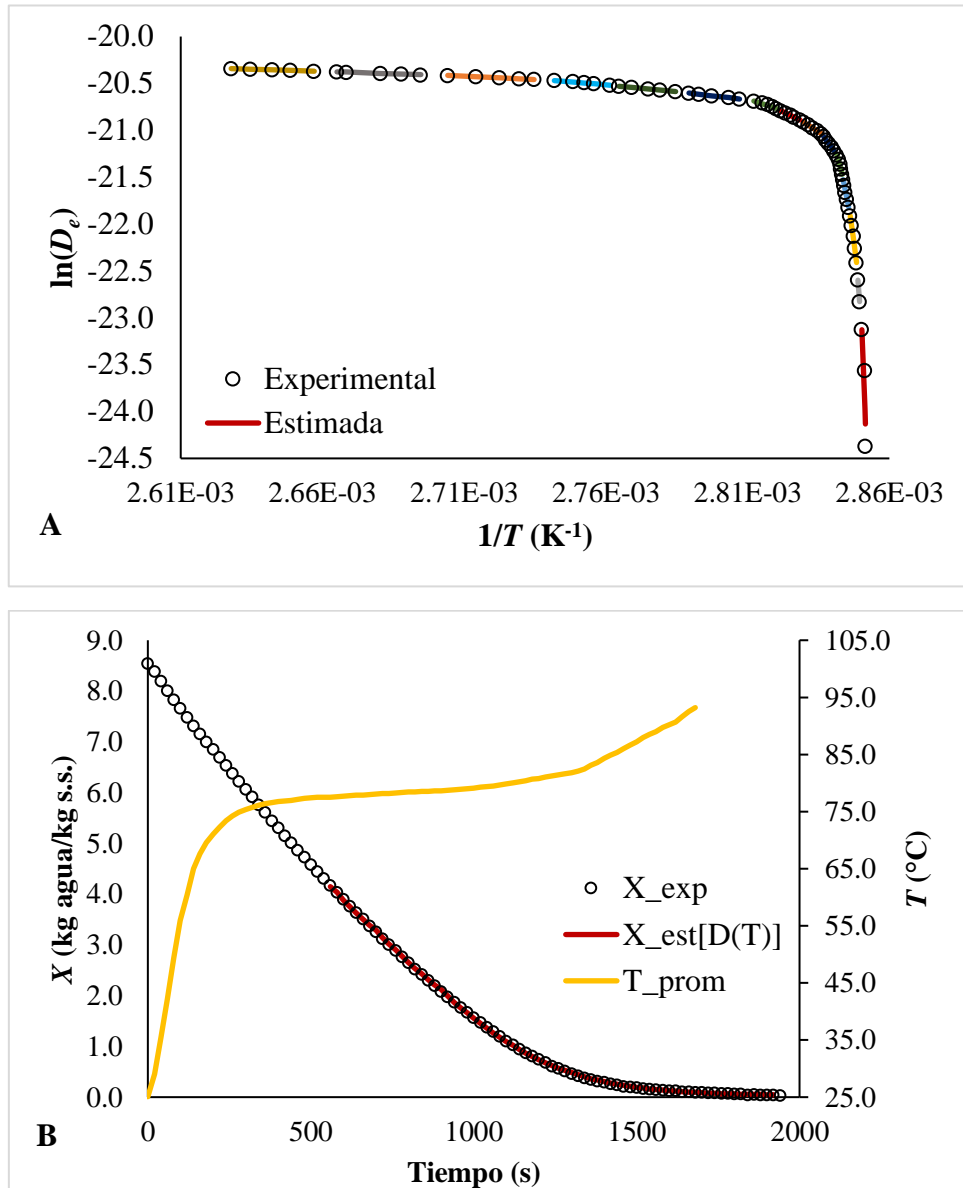


Figura 19. Gráfico de Arrhenius experimental (\circ) de una réplica utilizado para estimar la D_e en función de la temperatura promedio del alimento (T_{prom}) y estimación por subperiodos (líneas continuas) con el modelo de Arrhenius (A), cinética de horneado experimental (\circ) e historia de temperatura promedio del alimento (T_{prom}) estimada con la segunda ley de Fourier para placa infinita (120 °C) y cinética de horneado estimada ($X_{est}[D(T)]$) (B) al considerar una difusividad efectiva en función de la temperatura promedio del alimento.

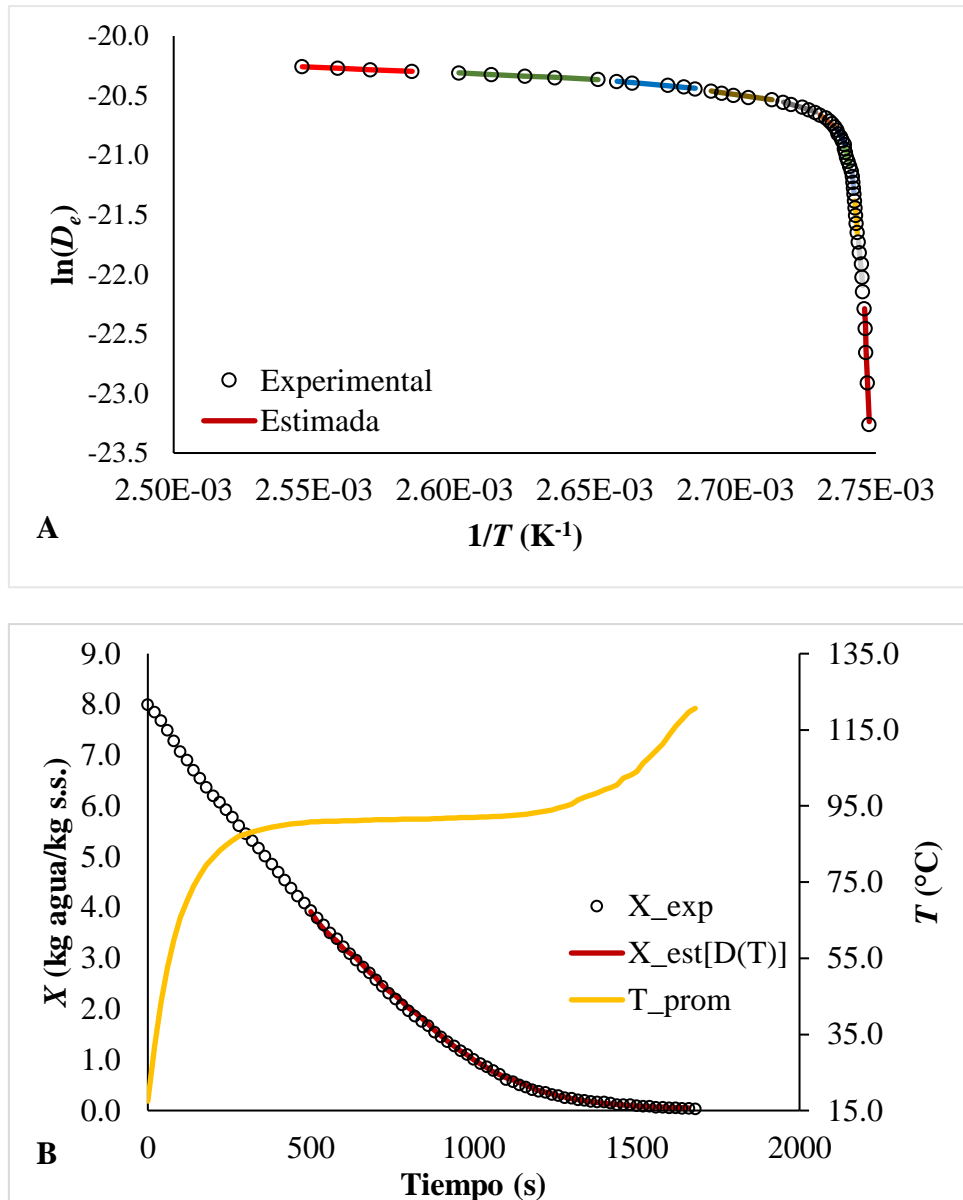


Figura 20. Gráfico de Arrhenius experimental (\circ) de una réplica utilizado para estimar la D_e en función de la temperatura promedio del alimento (T_{prom}) y estimación por subperiodos (líneas continuas) con el modelo de Arrhenius (A), cinética de horneado experimental (\circ) e historia de temperatura promedio del alimento (T_{prom}) estimada con la segunda ley de Fourier para placa infinita ($130\text{ }^{\circ}C$) y cinética de horneado estimada ($X_{est}[D(T)]$) (B) al considerar una difusividad efectiva en función de la temperatura promedio del alimento.

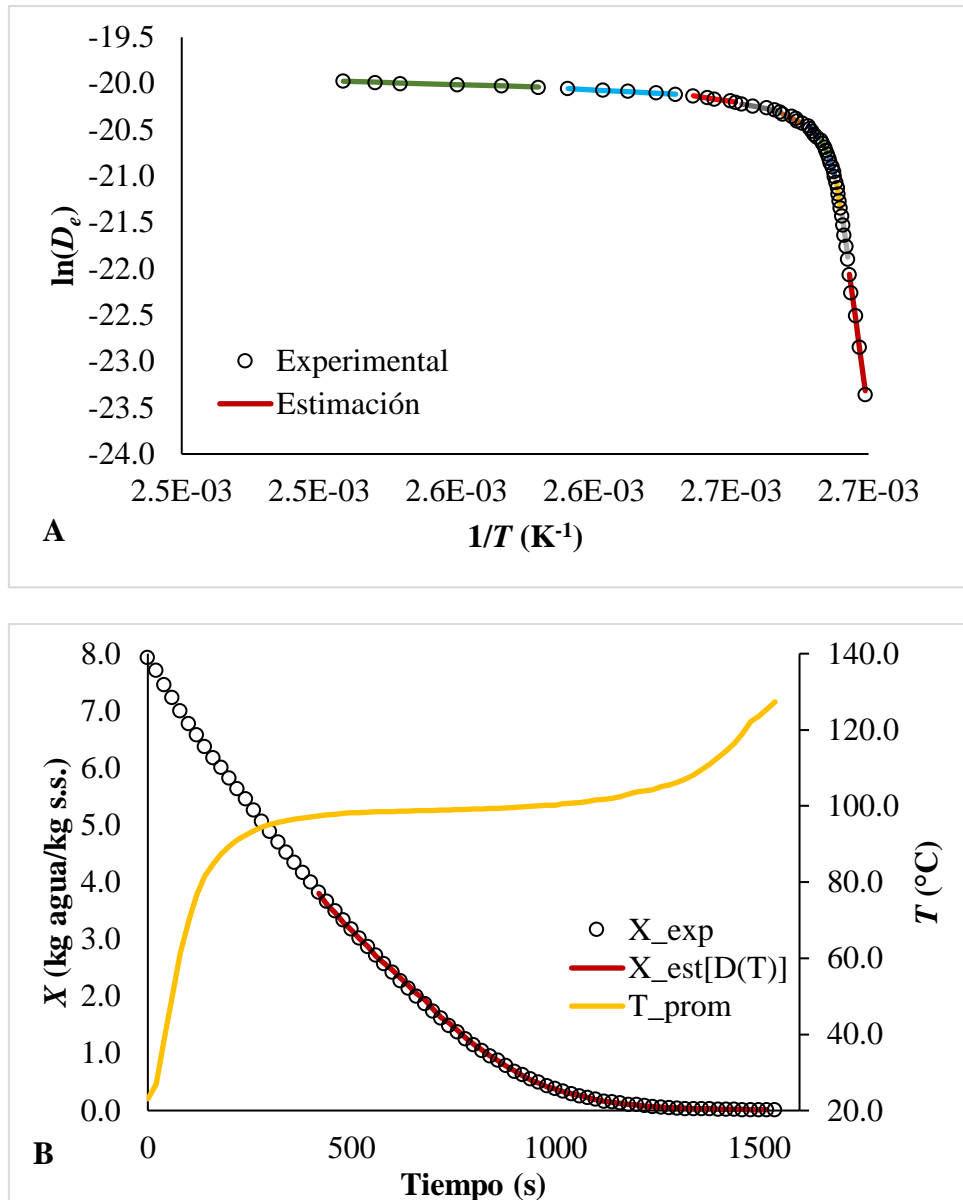


Figura 21. Gráfico de Arrhenius experimental (\circ) de una réplica utilizado para estimar la D_e en función de la temperatura promedio del alimento (T_{prom}) y estimación por subperiodos (líneas continuas) con el modelo de Arrhenius (A), cinética de horneado experimental (\circ) e historia de temperatura promedio del alimento (T_{prom}) estimada con la segunda ley de Fourier para placa infinita ($140\text{ }^{\circ}C$) y cinética de horneado estimada ($X_{est}[D(T)]$) (B) al considerar una difusividad efectiva en función de la temperatura promedio del alimento.

Las historias de temperatura promedio estimadas a las temperaturas estudiadas son similares a lo reportado por Cui y col (2005) para deshidratación de rebanadas de zanahoria, establecen que existen diferentes periodos de cambio de temperatura. Primeramente, se observa un periodo de calentamiento, durante el cual la energía aportada por el aire caliente provoca un aumento de la temperatura del alimento al transcurrir el tiempo de proceso. Posteriormente, se observa un corto periodo de tiempo donde el alimento permanece a una temperatura aparentemente constante; y, finalmente, un nuevo periodo de calentamiento en el que la energía necesaria para remover el agua en el alimento es menor.

Por otro lado, se observa que la muestra no alcanza la temperatura de estudio del horno, esto puede ser atribuido a los efectos de enfriamiento por la evaporación del agua en las muestras de zanahoria, lo anterior concuerda con los resultados obtenidos por Srikiarden y Roberts (2006), estudiaron el secado convectivo de cilindros de papa y zanahoria.

La Energía de activación (E_a) estimada para la obtención de la difusividad efectiva en función de la temperatura promedio del alimento (D_T) para el horneado de zanahoria a 120 °C se obtuvo en un intervalo de 6713 a 8 kJ/mol. A partir de la E_a calculada para cada subperiodo marcado en la **Figura 19A** se calculó la D_T al emplear la ecuación de Arrhenius y se encontró en un rango de 3.3×10^{-11} a 1.5×10^{-9} m²/s. El coeficiente de determinación (R^2) entre el $\ln(D_e)$ y $\ln(D_T)$ fue de 0.997.

Por otro lado, la E_a estimada para cada subperiodo durante el horneado de rebanadas de zanahoria a 130 °C se encontró en un rango de 4678 a 8 kJ/mol, mientras que la D_T se obtuvo en un intervalo de 8.1×10^{-11} a 1.6×10^{-9} m²/s. El coeficiente de determinación (R^2) entre el $\ln(D_e)$ y $\ln(D_T)$ fue de 0.999.

Finalmente, la E_a estimada para el cálculo de la difusividad efectiva en función de la temperatura del alimento para el horneado de rebanadas de zanahoria a 140 °C osciló entre 1806 y 7 kJ/mol, a partir de los cuales se obtuvo la D_T , la cual varió de 7.5×10^{-11} a 2.11×10^{-9} m²/s. El coeficiente de determinación (R^2) entre el $\ln(D_e)$ y $\ln(D_T)$ fue de 0.999.

Los gráficos de Arrhenius presentados exhiben una desviación tipo convexa, por lo que, al analizar la E_a se obtiene que ésta disminuye al aumentar la temperatura. Este comportamiento es similar a lo reportado por Yang y col (2021) y es relacionado con la cinética de difusión del agua. Por otro lado Zhou y col (2018) reportan la existencia de una dependencia de la E_a con la velocidad de calentamiento, por lo que, a altas velocidades de calentamiento, el sistema tiene notables fluctuaciones térmicas, lo que permite que se sobrepase la barrera de transformación fácilmente, en consecuencia, la energía de activación es aparentemente baja; por el contrario, a bajas velocidades de calentamiento, cruzar dicha barrera es más difícil, por consiguiente, la E_a aparenta ser alta. Los mismos autores concuerdan en que este comportamiento puede atribuirse a las modificaciones microestructurales que ocurren en el sistema. Durante el horneado de alimentos los cambios microestructurales hacen referencia a la formación y el tamaño de poros, parámetros que cambian conforme avanza el proceso de horneado del alimento (Iribe-Salazar y col 2018).

1 Validación de la transferencia simultánea de calor y masa

Los resultados de la validación de la transferencia simultánea de calor y masa se obtuvieron al contrastar la cinética de horneado estimada para el periodo de velocidad decreciente a cada temperatura de estudio con la cinética de horneado experimental para dicho periodo de velocidad decreciente (**Figuras 19B, 20B y 21B**) donde se obtuvo un coeficiente R^2 mayor a 0.999 en todos los casos.

VIII CONCLUSIONES

Las características fisicoquímicas, nutrimentales, nutracéuticas y enzimáticas en zanahoria fresca son consistentes con los datos previamente reportados en investigaciones científicas. Su contenido nutricional y nutracéutico adecuados, la convierten en un alimento beneficioso para una dieta balanceada.

Las cinéticas de contenido de humedad durante el horneado de rebanadas de zanahoria mostraron un comportamiento típico y el coeficiente local de transferencia de masa y la densidad de flujo de masa aumentaron al incrementar la temperatura, por lo que, el tiempo de horneado disminuyó con el aumento de la temperatura.

La difusividad efectiva estimada como función cuadrática del tiempo predijo satisfactoriamente del contenido de humedad durante el periodo de velocidad decreciente.

Las propiedades termofísicas obtenidas a las diferentes temperaturas se encuentran en el intervalo reportado para alimentos y el coeficiente convectivo de transferencia de calor se encuentra en el rango estipulado por diversos autores para convección en gases.

Las variables fisicoquímicas, nutrimental, nutracéutica y enzimática de la zanahoria horneada, contrastadas respecto al fresco, fueron significativamente diferentes.

El uso de la difusividad efectiva basada en la temperatura promedio del alimento permitió modelar con éxito la pérdida de humedad durante el periodo de velocidad decreciente. Esto demuestra que hay una relación entre la difusividad efectiva de la humedad y la temperatura del alimento durante el proceso, lo que posibilita que se realicen predicciones precisas del contenido de humedad al considerar los cambios de temperatura del alimento. Este aspecto es crucial para reducir u optimizar la pérdida de calidad del alimento.

La validación exitosa de la transferencia simultánea de calor y masa, mediante la comparación de las cinéticas estimadas, al considerar la difusividad efectiva en función de la temperatura promedio del alimento, con las cinéticas experimentales, posibilita calcular el contenido de humedad a diferentes tiempos de horneado o determinar el tiempo requerido para obtener un contenido específico de humedad en rebanadas de zanahoria horneadas, sin la necesidad de realizar pruebas experimentales.

IX BIBLIOGRAFÍA

- AghbAShlo M, Kianmehr MH, ArAbhoSSeiNi A, NAzgheliChi, T. 2011. Modelling the carrot thin-layer drying in a semi-industrial continuous band dryer. *Czech Journal of Food Sciences*. 29(5):528-538.
- Allier-González AL. 2012. Análisis de los periodos y mecanismos de transporte durante el secado de papa por convección de aire forzada [Tesis de Maestría]. Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México. 109 p.
- Alvarado JD. 2014. Principios de ingeniería aplicados a alimentos. 2ª edición. Universidad Técnica de Ambato, Ecuador, Megagraf. 490 p.
- Álvarez J. 2018. Perspectivas y Tendencias del consumo de alimentos en Latinoamérica. Convención Latinoamericana de Cadena de Frío.
- Alzate CEO. 2003. Procesamiento de alimentos. 1ª edición. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. 322 p.
- AOAC Official Methods of Analysis. 2012. Of AOAC INTERNATIONAL. 18a ed. Estados Unidos de América: Association of Official Analytical Chemists.
- Azarang M, y García E. 1996. Simulación y Análisis de Modelos Estocásticos, México: McGrawHill. 282p.
- Badui S. 2006. Química de los alimentos. 4ª ed. México: Pearson Educación. 716 p.
- Bastidas-Cadpata R, Valencia-Chamorro S. 2015. estudio del efecto de la aplicación de sanitizantes en la calidad de zanahoria (*Daucus carota* L.) de IV Gama. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*. 16(2):307-312.

- Bolaños O. 2014. Importancia de la simulación en la mejora de procesos [Tesis de licenciatura]. México; Universidad Nacional Autónoma de México. 105 p. Disponible de: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/5884/tesis.pdf?sequence=1>
- Botelho FM, Corrêa PC, Goneli A, Martins MA, Magalhães FE, Campos SC. 2011. Periods of constant and falling-rate for infrared drying of carrot slices. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 15:845-852. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000800012>
- Caro-Hernández OC. 2019. Evaluación de parámetros de calidad e ingenieriles en la cocción de chayote (*Sechium edule* Sw.) [Tesis de Maestría]. Culiacán, Sinaloa, México: Universidad Autónoma de Sinaloa. 122p.
- Caro-Corrales JJ, Zazueta-Niebla JA, Ordorica-Falomir CA, Zazueta-Morales JJ, Gutierrez-Lopez, GF, Alamilla-Beltran L. 2005. Controlled low-temperature vacuum dehydration and tunnel drying: a comparative study. *International Journal of Food Properties*. 8(3):529-542. <https://doi.org/10.1080/10942910500269618>
- Carpenter KJ. 2012. The discovery of vitamin C. *Annals of nutrition and metabolism*. 61(3):259-264. <https://doi.org/10.1159/000343121>
- Carslaw HS, Jaeger JC. 1959. *Conduction of Heat in solids*, 2a ed., Oxford University Press, Nueva York, NY.
- Castro-Beltrán YG. 2022. Optimización del secado convectivo de nopal (*Opuntia ficus-indica* L.) en trozos y evaluación de parámetros de calidad [Tesis maestría]. Culiacán, Sinaloa: Universidad Autónoma de Sinaloa. 105 p.
- Cengel YA. 2007. *Tranferencia de calor y masa*. 3ª ed. México: McGraw Hill. 901 p.

- Chen ZG, Guo XY, Wu T. 2016. A novel dehydration technique for carrot slices implementing ultrasound and vacuum drying methods. *Ultrasonics sonochemistry*. 30:28-34. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.11.026>
- CONABIO Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. s.f. Disponible de: <http://www.conabio.gob.mx/>. Consultado: abril de 2022.
- Crank J. 1975. *The mathematics of diffusion*. 2a ed. Clarendon Press, Oxford.
- Cuastumal HG, Valencia Murillo BL, Ordóñez Santos LE. 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.
- Cui ZW, Xu SY, Sun DW, Chen W. 2005. Temperature changes during microwave-vacuum drying of sliced carrots. *Drying Technology*. 23(5):1057-1074. <https://doi.org/10.1081/DRT-200059136>
- Davis W. 1980. Hot Wire Method for the Measurement of the Thermal Conductivity of Refractory Materials. *British Ceramic Transactions and Journal*. 79:231-253.
- Doymaz İ. 2017. Drying kinetics, rehydration and colour characteristics of convective hot-air drying of carrot slices. *Heat and Mass Transfer*. 53:25-35. <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1791-8>
- Eim VS, Urrea D, Rosselló C, García-Pérez JV, Femenia A, Simal, S. 2013. Optimization of the drying process of carrot (*Daucus carota* v. Nantes) on the basis of quality criteria. *Drying Technology*. 31(8):951-962. <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.707162>

Eroglu A, Al'Abri IS, Kopec RE, Crook N, Bohn T. 2023. Carotenoids and their health benefits as derived via their interactions with gut microbiota. *Advances in Nutrition*, 14(2), 238-255. <https://doi.org/10.1016/j.advnut.2022.10.007>

[FAOSTAT] Base de datos estadísticos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 2020. Disponible en <http://www.fao.org>. Consultado en: abril de 2022

[FAOSTAT] Base de datos estadísticos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 2021. Disponible en <http://www.fao.org>. Consultado en: abril de 2022

Farkas BE, Singh RP, Rurnsey TR. 1996. Modeling Heat and Mass Transfer in Immersion Frying. I, Model Development. *Journal of food Engineering* 29(2):211-226. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(95\)00072-0](https://doi.org/10.1016/0260-8774(95)00072-0)

Fellows PJ. 2017. Baking and roasting. In P.J. Fellows (Ed.), *Food Processing Technology: Principles and Practice*. 4a ed. Boca Raton, FL: CRC Press. p. 733-752.

García-Closas R, Berenguer A, Tormo MJ, Sánchez MJ, Quiros JR, Navarro C, Gonzalez CA. 2004. Dietary sources of vitamin C, vitamin E and specific carotenoids in Spain. *British Journal of Nutrition*. 91(6):1005-1011. <https://doi.org/10.1079/BJN20041130>

Gaviola JC. 2013. *Manual de producción de zanahoria*. Mendoza, Argentina: INTA, 97-98.

Geankoplis CJ, Hersel AA, Lepek DH. 2018. *Transport Processes and Separation Process Principles*. 5a edición. Prentice Hall 1248 p.

- Gil-Gaxiola M. 2022. Simulación de la transferencia de calor durante la inactivación enzimática de champiñón (*Agaricus bisporus* L.) [Tesis de Maestría]. Culiacán, Sinaloa, México: Universidad Autónoma de Sinaloa. 122p.
- Hiranvarachat B, Devahastin S, Chiewchan N. 2011. Effects of acid pretreatments on some physicochemical properties of carrot undergoing hot air drying. *Food Bioprod Process.* 89(C2):116–127. doi:10.1016/j.fbp.2010.03.010
- Hiranvarachat B, Devahastin S, Chiewchan N. 2012. In vitro bioaccessibility of β -carotene in dried carrots pretreated by different methods. *International Journal of Food Science and Technoly.* 47(3):535–541. doi:10.1111/j.1365-2621.2011.02874.x
- Hwang IG, Byun JY, Kim KM, Chung MN, Yoo SM. 2014. Vitamin C quantification of Korean sweet potatoes by cultivar and cooking method. *Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition.* 43(6):955-961. <https://doi.org/10.3746/jkfn.2014.43.6.955>
- Ikegwu OJ, Ekwu FC. 2009. Thermal and physical properties of some tropical fruits and their juices in Nigeria. *Journal of Food Technology.* 7(2):38-42.
- 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. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13109>
- Iribe-Salazar R. 2018. Modelado de la Transferencia de Masa en el Horneado con Aire Caliente de Tortillas de Maíz (*Zea mays* L.) mediante un Modelo Teórico Probabilístico y la Aplicación del Método de Monte Carlo [Tesis de Doctorado]. Culiacán, Sin: Universidad Autónoma de Sinaloa. 121 p.

- Iribe-Salazar R, Gutiérrez-Dorado R, Ríos-Iribe E, Carrasco-Escalante M, Vázquez-López Y, Hernández-Calderón O, Caro-Corrales J. 2018. Modeling of Effective Moisture Diffusivity in Corn Tortilla Baking. *Journal of Food Science* 83(8):2167–2175. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14278>
- Jabbar S, Abid M, Hu B, Hashim MM, Lei S, Wu T, Zeng X. 2015. Exploring the potential of thermosonication in carrot juice processing. *Journal of Food Science and Technology*. 52:7002-7013. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-1847-7>
- Kaushik G, Satya S, Naik SN. 2009. Food processing a tool to pesticide residue dissipation–A review. *Food research international*. 42(1):26-40. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2008.09.009>
- Kaya A, Aydın O, Demirtaş C. 2009. Experimental and theoretical analysis of drying carrots. *Desalination*. 237(1-3):285-295. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.01.022>
- Linster CL, Van Schaftingen E. 2007. Vitamin C. *The Federation of European Biochemical Societies Journal*. 274(1):1-22. <https://doi.org/10.1111/j.1742-4658.2006.05607.x>
- López-Gámez G, Elez-Martínez P, Martín-Belloso O, Soliva-Fortuny R. 2021. Changes of carotenoid content in carrots after application of pulsed electric field treatments. *Lwt*. 147:111408. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111408>
- Manrique V. 2002. *Transferencia de calor*. 2ª ed. México: OXFORD. 304 p.
- Matějková J, Petříková K. 2010. Variation in content of carotenoids and vitamin C in carrots. *Notulae Scientia Biologicae*. 2(4):88-91. <https://doi.org/10.15835/nsb245108>
- Mathews CK, Van Holde KE, Ahern KG. 2002. *Bioquímica*. 3ª edición. Pearson. 1368 p.

- McCabe WL, Smith J, Harriott P. 2007. Operaciones unitarias en ingeniería química. 7^a ed. México: McGraw Hill. 1189 p.
- Mercali DG, Jaeschke DP, Tesaro IC, Marczak LDF. 2012. Study of vitamin C degradation in acerola pulp during ohmic and conventional heat treatments. *LWTF – Food Science and Technology*. 47(1):91-95. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.12.030>
- Mohan VC, Talukdar P. 2010. Three dimensional numerical modeling of simultaneous heat and moisture transfer in a moist object subjected to convective drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 53(21-22):4638-4650. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.06.029>
- Mohsenin N. 1980. *Thermal Properties of Foods and Agricultural Materials*. NY: Gordon and Breach. 407 p.
- Mohsenin N. 1986. *Physical properties of plant and animal materials. Structure, physical characteristics and mechanical properties*. 2a ed. New York: Breach science publishers. 471 p.
- More PG, Khodke SU. 2023. Effect of blanching time on quality parameter of blanched carrot slices.
- Murakami E, Sweat V, Sastru S, Hayakawa K, Datta A. 1996. Recommended design parameters for thermal conductivity probes for nonfrozen food materials. *Journal of Food Engineering*. 27(2):109-123. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(94\)00088-3](https://doi.org/10.1016/0260-8774(94)00088-3)
- Murakami, E. G. 1997. The thermal properties of potatoes and carrots as affected by thermal processing. *Journal of food process engineering*. 20(5):415-432. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.1997.tb00431.x>

- Nieto C. 2014. Técnicas de cocción: sabor, color, textura y nutrientes a buen recaudo. Farmacia profesional. ELSEVIER. 28:15-19.
- Nunes TC, Rogovschi VD, Fabbri AD, Sagretti J, Sabato SF. 2011. Analyse of texture in baby carrot (*Daucus carota*) subjected to the process of ionizing radiation.
- Olives-Barba AJ, Cámara-Hurtado M, Sánchez-Mata MC, Fernández-Ruiz V, López Sánchez- de Tejada M. 2006. Application of a UV-vis detection HPLC method for a rapid determination of lycopene and β -carotene in vegetables. ELSEVIER, 328-336. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.02.028>
- Ordóñez-Santos LE, Portilla MAO, Rodríguez DXR. 2013. Cinética de degradación térmica de vitamina C en frutos de guayaba (*Psidium guajava* L.). Revista Lasallista de Investigación. 10(2): 44-51.
- Pellegrini-Zurita JD. 2017. Inactivación de poligalacturonasa en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) empleando microondas [Tesis de Maestría]. Culiacán, Sinaloa, México: Universidad Autónoma de Sinaloa. 118p.
- Raees-ul H, Prasad K. 2015. Nutritional and processing aspects of carrot (*Daucus carota*)-A review. South Asian Journal of Food Technology and Environment. 1(1):1-14. <http://dx.doi.org/10.46370/sajfte.2015.v01i01.01>
- Rapusas R, Driscoll R. 1995. Theermophysical 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)
- Rashid M, Khabbaz BG. 2010. Prediction of total soluble solids and firmness of carrot based on carrot water content. In Proceedings of the XVIIth World Congress of the International

Commission of Agricultural and Biosystems Engineering (CIGR 2010). University of Southern Queensland.

Sablani SS, Datta AK, Rahman MS, Mujumdar AS. 2006. Handbook of food and bioprocess modeling techniques. CRC Press. 592p.

SADER. 2016. Zanahoria, una joya mundial. gob.mx. Recuperado el 10 de abril de 2022, de <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/zanahoria-una-joya-mundial>

Sáez-Ceniceros CB. 2019. Modelado de la difusividad efectiva y optimización de la deshidratación convectiva en rodajas de pera (*Pyrus communis* L.) cv. D'Anjou [Tesis de licenciatura]. Culiacán, Sinaloa: Universidad Autónoma de Sinaloa. 84 p.

Sahabi DM, Shehu RA, Saidu Y, Abdullahi AS. 2012. Screening for total carotenoids and β -carotene in some widely consumed vegetables in Nigeria. Nigerian Journal of Basic and Applied Sciences. 20(3):225-227.

Sakin M, Kaymak-Ertekin F, Ilicali C. 2007. Modeling the moisture transfer during baking of white cake. Journal of Food Engineering. 80:822-831. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.07.011>

Sakin M, Kaymak-Ertekin F, Ilicali C. 2009. Convection and radiation combined surface heat transfer coefficient in baking ovens. Journal of Food Engineering. 94(3-4):344-349. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.03.027>

Sharma KD, Karki S, Thakur NS, Attri S. 2012. Chemical composition, functional properties and processing of carrot - a review. Journal of food science and technology. 49(1):22-32. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0310-7>

[SIAP] Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2020. México: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en: <https://nube.siap.gob.mx>. Consultado en abril de 2022.

Simon PW, Freeman RE, Vieira JV, Boiteux LS, Briard M, Nothnagel T, Kwon YS. 2008. Carrot. Vegetables II. Springer, New York, NY. p. 327-357

Simon PW. 2019. Economic and academic importance. In *The Carrot Genome*. Springer, Cham. p 1-8

Srikiatden J, Roberts JS. 2006. Measuring moisture diffusivity of potato and carrot (core and cortex) during convective hot air and isothermal drying. *Journal of Food Engineering*. 74(1):143-152. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.02.026>

Suha OA, Babiker EM, Babiker EE. 2013. Thermostability at different pH levels of peroxidase extracted from four vegetables. *International Food Research Journal*. 20(2):715.

Sulaeman A, Keeler L, Giraud DW, Taylor SL, Driskell JA. 2003. Changes in carotenoid, physicochemical and sensory values of deep-fried carrot chips during storage. *International journal of food science & technology*. 38(5):603-613. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2621.2003.00689.x>

Sweat VE. 1974. Experimental values of thermal conductivity of selected fruits and vegetables. *Journal of Food Science*. 39:1080–1091. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1974.tb07323.x>

Terao J. 2023. Revisiting carotenoids as dietary antioxidants for human health and disease prevention. *Food & Function*. <https://doi.org/10.1039/D3FO02330C>

- Tijskens L, Rodis P, Hertog A, Waldron K, Ingham L, Proxenia N, Van Dijk C. 1997. Activity of peroxidase during blanching of peaches, carrots, and potatoes. *Journal of Food Engineering*. 34:355-370. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(97\)00101-5](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(97)00101-5)
- Tirado DF, Acevedo D, Montero PM. 2015. Transferencia de calor y materia durante el proceso de freído de alimentos: tilapia (*Oreochromis niloticus*) y fruta de pan (*Artocarpus communis*). *Información tecnológica*. 26(1):85-94. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642015000100010>
- Thongsook T, Barret DM. 2005. Purification and partial characterization of broccoli (*Brassica oleracea* Var. Italica) peroxidases. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 53:3206-3214. <https://doi.org/10.1021/jf048162s>
- Tocci AM, Mascheroni RH. 2008. Some thermal properties of fresh and osmotically dehydrated kiwifruit above and below the initial freezing temperature. *Journal of Food Engineering*. 88:20-27. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.10.014>
- Treybal RE. 2007. Operaciones de transferencia de masa. 2a ed. Cd de México: McGraw-Hill. 870p.
- Tuta S, Palazoğlu TK. 2017. Effect of baking and frying methods on quality characteristics of potato chips. *GIDA*. 42(1):43-49. DOI: 10.15237/gida.GD16050
- USDA. United States Department of Agriculture. 2017. Disponible de: <https://fdc.nal.usda.gov>. Consultado el 11 de junio de 2023.
- USDA. United States Department of Agriculture. 2019. Disponible de: <https://fdc.nal.usda.gov>. Consultado el 11 de abril de 2022.
- Vidaurre-Ruíz J, Castañeda-Muñoz J. 2014. Determinación de los parámetros de transferencia de calor durante el calentamiento de loche (*Cucurbita moschata Duchesne*) utilizando soluciones

numéricas y analíticas. *Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación*. 1(2):94-105.
<https://doi.org/10.26495/icti.v1i2.108>

Wrzodak A, Szwejda-Grzybowska J, Elkner K, Babik I. 2012. Comparison of the Nutritional Value and Storage Life of Carrot Roots From Organic and Conventional Cultivation. *Vegetable Crops Research Bulletin*. 76. <https://doi.org/10.2478/v10032-012-0010-5>

Wu B, Pan Z, Xu B, Bai J, El-Mashad HM, Wang B, Ma H. 2018. Drying performance and product quality of sliced carrots by infrared blanching followed by different drying methods. *International Journal of Food Engineering*. 14(5-6):20170384. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2017-0384>

Xu S, Kerr WL. 2012. Comparative study of physical and sensory properties of corn chips made by continuous vacuum drying and deep fat frying. *LWT-Food Science and Technology*. 48(1):96-101. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.02.019>

Yang HC, Ge YC, Su KH. 2021. Temperature effect on water dynamics in tetramer phosphofructokinase matrix and the super-arrhenius respiration rate. *Sci Rep* 11, 383. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79271-5>

Zhou ZN, Yang L, Li RC, Li J, Hu QD, Li JG. 2018. Martensitic transformations and kinetics in Ni-Mn-In-Mg shape memory alloys. *Intermetallics*. 92:49-54. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2017.09.016>

Zielinska M, Markowski M. 2011. Color characteristics of carrots: effect of drying and rehydration. *International Journal of Food Properties*. 15(1-2):450-466. <https://doi.org/10.1080/10942912.2010.489209>

ABREVIATURAS

<i>A</i>	Área
<i>a</i> *	Coordenada <i>a</i> del espacio de color
A.A.	Vitamina C
AOAC	Association of Official Analytical Chemists
<i>AT</i>	Acidez titulable
<i>a_v</i>	Actividad volumétrica
<i>b</i> *	Coordenada <i>b</i> del espacio de color
<i>Bi</i>	Número de Biot
cm	Centímetro
<i>C_p</i>	Capacidad calorífica específica
<i>D₀</i>	Difusividad inicial
<i>D₁</i>	Velocidad de cambio inicial de difusividad
<i>D₂</i>	Disminución de la velocidad inicial de difusividad
<i>D_{AB}</i>	Difusividad de A en B
DCG	Ácido dicetogulónico
<i>D_e</i>	Difusividad efectiva
DHA	Ácido L-deshidroascórbico
<i>D_T</i>	Difusividad en función de la temperatura

dT/dt	Gradiente de temperatura con respecto al tiempo ($K m^{-1}$)
dT/dx	Gradiente de temperatura en la dirección x
D_{T0}	Difusividad en función de una temperatura de referencia
dX_A/dt	Gradiente de concentración con respecto al tiempo
Ea	Energía de activación
f.f.	Fruto fresco
F_{max}	Fuerza máxima de fractura
g	Gramo
h	Coefficiente convectivo de transferencia de calor ($W m^{-2} K^{-1}$)
IDR	Ingesta diaria recomendada
J	Joule
K	Kelvin
k	Conductividad térmica
kJ	Kilojoule
k_Y	Coefficiente local de transferencia de masa
L	Longitud característica
L^*	Luminosidad
LSD	Least significant difference
m	Metro

M	Molar
M_{cc}	Masa de cápsula constante
MeqA	Masa equivalente del ácido
mg	Miligramo
mL	Mililitro
mm	milímetro
mM	Milimolar
M_{mf}	Masa de muestra fresca
m_{ss}	Masa de sólidos secos
N	Newton
N_c	Densidad de flujo de masa
nm	Nanómetro
POD	Peroxidasa
ppm	Partes por millón
PVC	Periodo de velocidad constante
PVD	Periodo de velocidad decreciente
q_x	Densidad del flujo de calor ($W m^{-2}$)
R	Constante de los gases (J/mol K)
s	Segundo

s.s	Sólidos secos
<i>SST</i>	Sólidos solubles totales
t	Tonelada
<i>T</i>	Temperatura (°C)
<i>T</i> ₀	Temperatura inicial (°C)
<i>T</i> _∞	Temperatura del fluido (°C)
<i>T</i> _s	Temperatura del sólido (°C)
U	Unidades
UI	Unidades internacionales
USDA	United States Department of Agriculture
<i>V</i>	Volumen (mL)
W	Watt
<i>X</i> _c	Contenido de humedad crítico (kg H ₂ O/kg s.s.)
<i>X</i> _s	Contenido de humedad en la superficie (kg H ₂ O/kg s.s.)
ΔE	Diferencia total de color
α	Difusividad térmica (m ² s ⁻¹)
ε	Coefficiente de extinción molar (mM ⁻¹ cm ⁻¹)
ρ	Densidad aparente (kg m ⁻³)