

## **Difusividad de colorante rojo gardenia en cerezas**

Juan Ignacio González Pacheco<sup>a</sup>, Ariel Márquez<sup>a</sup>, María Florencia Lardone<sup>a</sup>, Mariela Beatriz Maldonado<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> UTN FRM, Departamento de Ingeniería Química, C. Rodríguez 273

C.P.:5500, Ciudad de Mendoza, Mendoza, Argentina

<sup>b</sup> CONICET, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina

C.P.: 5500, Ciudad de Mendoza, Mendoza, Argentina

jngonzalez534@gmail.com

### **Resumen**

El estudio se centra en la modelación matemática del fenómeno de difusión del colorante rojo gardenia, a 357 ppm y diferentes temperaturas (40, 50 y 60°C) en cerezas, mediante el cálculo de coeficientes de difusión y resolución numérica mediante condición de frontera de Robin, usando un modelo basado en la segunda ley de Fick.

Se midieron por triplicado los parámetros del espacio de color CIELAB, con colorímetro Konica Minolta CR-400, utilizando luz natural (D65), en 3 kilogramos de cerezas calibradas, descaroizadas y desulfatadas durante 24 h. El muestreo se realizó extrayendo aleatoriamente dos cerezas de diferentes partes del recipiente y así medir los parámetros del espacio de color. Adicionalmente, se obtuvo una correlación para vincular los cambios en el parámetro de tendencia al rojo ( $a^*$ ), con la concentración presente de colorante, y así proceder a calcular difusividades en piel y pulpa, ajustando un modelo de difusión de esfera hueca con doble frontera de difusión a valores experimentales.

Se utilizó la prueba HSD de Tukey-Kramer, así como la prueba de Scheffe, con un nivel de significancia de 0.05, utilizando el software IBM® SPSS® (V22.0, IBM Corp., NY, EE. UU.) para determinar la diferencia estadística en la media de los coeficientes, así como el software MATLAB® R2017a (V9.2, The MathWorks Inc., MA, EE. UU.) para visualizar y predecir los perfiles de concentración de colorante.

Se observó una diferencia significativa en los coeficientes de difusión para rojo gardenia ( $p < 0.05$ ), así como los coeficientes más elevados a 60°C, indicando que su penetración a través de la matriz entre temperaturas podría ser diferencial, y su efecto, acelerador de la difusión. Los coeficientes efectivos para el pigmento en pulpa de cereza fueron entre 1 - 2 órdenes de magnitud superiores comparados con los de la piel, probablemente debido al efecto barrera otorgado por la epidermis de la fruta. Finalmente, los perfiles de concentración evidenciaron difusión progresiva en relación con el radio de la cereza y el tiempo, además, mediante el uso de la condición de frontera de Robin, se pudo visualizar la doble frontera de difusión en la interfase pulpa-piel.

**Palabras Clave:** Difusividad – Rojo Gardenia - Cereza.

## 1. Introducción

Normalmente, durante el proceso de transformación de los alimentos estos tienen un color propio en su estado natural, que dependiendo de las operaciones o procesos a los que sea sometido puede variar enormemente. En cuanto a los alimentos, un parámetro que determina principalmente el juicio sobre el sabor y el estado de conservación es el color, así como la calidad del producto y las características funcionales del alimento (Mohamed, 2014; da Silva *et al.*, 2019). Los colores pueden tener múltiples orígenes, por ejemplo, la presencia de sustancias a través de reacciones químicas que generan nuevos compuestos responsables de la aparición de colores novedosos en los alimentos, por ejemplo, la reacción de Maillard o, en el caso de este trabajo, la presencia de colorantes incorporados como aditivos (Muñoz y Maldonado Cid, 2003; Martins *et al.*, 2016; Faustino *et al.*, 2019; Oladzabbasabadi *et al.*, 2022). Adicionalmente, existe un enorme interés en el mercado de alimentos por productos orgánicos y naturales, además los consumidores tienden a seleccionar aditivos naturales con propiedades funcionales promotoras de la salud (Maldonado, 2021).

En lo que respecta a la elaboración de cerezas confitadas mediante procesos de impregnación en soluciones edulcorantes (Maldonado *et al.*, 2014, 2016; Maldonado y González Pacheco, 2020), el uso de colorantes se ha convertido en un requisito indispensable dada la breve estacionalidad de la materia prima, por lo que, su procesamiento requiere la colocación de las cerezas en una solución de anhídrido sulfuroso, eliminando el color rojo natural al transformarlo en leucobases, siendo necesario restaurar su color por completo. Mencionando trabajos relacionados, Giusti y Wrolstad (1996, 2008), así como Sigurdson, Tang y Giusti (2017) obtuvieron cerezas al marrasquino con un atractivo color rojo brillante estable utilizando extracto de rábano, siendo este último mencionado uno de los pocos precedentes en el uso de colorantes naturales con respecto a la elaboración de cerezas confitadas tipo marrasquino.

Por otro lado, aunque los colorantes sintéticos son muy versátiles en la industria alimentaria, varios estudios han detectado una correlación entre su consumo y diversos trastornos de salud, por ejemplo, hiperactividad (Oplatowska-Stachowiak y Elliott, 2015), defectos en el ADN (Khan *et al.*, 2020), reacciones alérgicas dermatológicas (Panachiyil *et al.*, 2019), entre otras.

Así mismo, los modelos de Fick (Abraão *et al.*, 2013; Rubio-Arreaez *et al.*, 2015; Gusmão *et al.*, 2016; Gagliardi, 2019; González-Pérez, Ramírez-Corona y López-Malo, 2021; Sayago, 2021; Maldonado y González Pacheco, 2022) como los no fickianos (Berkowitz, Emmanuel y Scher, 2008; Simpson *et al.*, 2013; Ferreira *et al.*, 2015; El Aissaoui y El Afif, 2017; Hasan *et al.*, 2019), difusión multicomponente (Clemente *et al.*, 2020; Bordin *et al.*, 2019; Jamali *et al.*, 2020), simulación numérica (Deen *et al.*, 2014; Xu *et al.*, 2014), termodinámica irreversible (Seguí, Fito y Fito, 2012), modelos de flujo hidrodinámico (Shi y Le Maguer, 2002) se han utilizado en la modelación de los fenómenos de difusión de masas. Para obtener coeficientes de difusión efectivos, se llevaron a cabo varios estudios, por ejemplo, estudios sobre el modelado matemático de la difusión concomitante de sales en champiñones (Clemente *et al.*, 2020), proceso de secado por infrarrojos en rodajas de plátano utilizando ley de Fick (Baptestini *et al.*, 2017), pretratamiento por campo eléctrico pulsado y deshidratado osmótico de tejidos de manzana, zanahoria y plátano (Amami *et al.*, 2014), así como difusión de sodio, cloruro de sodio y glucosa durante el procesamiento de aceitunas verdes de mesa (Zuritz y Maldonado, 2004; Maldonado, Zuritz y Assof, 2008; Maldonado, Zuritz y Miras, 2008; Maldonado *et al.*, 2011), entre otros.

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, el objetivo de este trabajo es cuantificar, mediante un modelo matemático, el fenómeno de transferencia de masa del colorante natural rojo de gardenia en cerezas sometidas a diferentes temperaturas, mediante el cálculo de coeficientes de difusión efectivos, al igual que la obtención de gráficos de superficie con el fin de predecir los diferentes perfiles de concentración, basados en la segunda ley de Fick (Rezagah *et al.*, 2011; Simpson *et al.*, 2015; González-Pérez *et al.*, 2022).

## 2. Materiales y Métodos

Los parámetros  $L^*$  (Luminosidad),  $a^*$  (tendencia al rojo o verde) y  $b^*$  (tendencia al azul o amarillo) del espacio de color CIELAB se midieron por triplicado mediante colorímetro Konica Minolta CR-400, iluminante D65, en aproximadamente 3 kilogramos de cerezas calibradas, descarozadas y desulfatadas durante 24 h, mediante inmersiones en baños de agua, previas al proceso de candeado. Para candear la

fruta se adoptó un método de impregnación múltiple denominado “Método Lento o Francés” empleado por Maldonado y González Pacheco (2020), basado en sumergir la matriz en soluciones hipertónicas de ligera concentración inicial para luego gradualmente incrementarlas, dejándolas en reposo por un lapso de 24 h entre cada impregnación, hasta alcanzar la concentración deseada.

La formulación utilizada para endulzar fue sacarosa 50% - xilitol 50%, ya que su mezcla en estas proporciones no precipitó ni formó cristales, durante seis meses de almacenamiento. Por otro lado, el proceso se inició con una solución de edulcorante a una concentración de 25 Bx, para evitar la formación de arrugas en la matriz, previamente hervida y enfriada a aproximadamente 50°C. Posteriormente, las cerezas fueron sumergidas en almíbar de 35 Bx, en las mismas condiciones que el día anterior. Se utilizó rojo gardenia a 357 ppm para colorear los frutos durante la segunda impregnación, además de encontrarse bajo agitación permanente y temperatura constante de 40, 50 y 60°C, utilizando un agitador de calentamiento magnético termostático PIOWAY 78 HW- 1. Así mismos, se incorporaron a la solución endulzante 0,9 mL de ácido cítrico al 10% (m/V) o 0,3 mL de NaHCO<sub>3</sub> al 10% (m/V) para proporcionar un pH entre 4,2 y 4,8, con el objetivo de generar una ligera precipitación del pigmento dentro del tejido celular de la cereza (Mohd-Adnan *et al.*, 2011; Eggleston *et al.*, 2013).

## 2.1. Muestreo

Se tomaron muestras aleatorias de 2 cerezas de varias zonas del recipiente, luego, con ayuda de una cuchilla se logró disponer de su sección transversal y proceder a la medición de los parámetros del espacio de color CIELAB en tres puntos específicos (Fig. 1), distinguiendo así el progreso del color durante la difusión de los pigmentos (de Freitas *et al.*, 2018; Gutiérrez-Macías *et al.*, 2019). Las mediciones se realizaron por triplicado, además, durante el su confitado, se calcularon los coeficientes de difusión efectivos para ambos colorantes, en piel y pulpa, así como su simulación numérica para visualizar el fenómeno de penetración del colorante y sus perfiles de concentración.

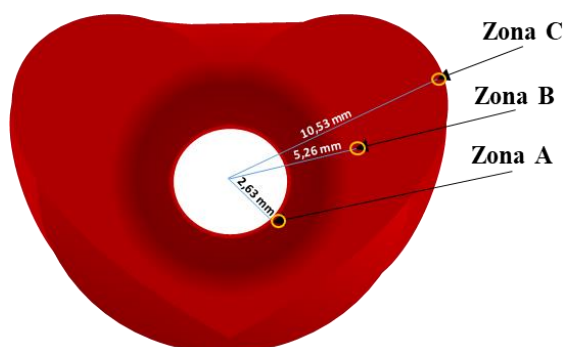


Fig. 1. Espaciamiento del muestreo de parámetros L, a\* y b\* en cerezas.

## 2.2. Modelación Matemática

En primer lugar, se ajustó a los valores experimentales una ecuación que gobierna el fenómeno de difusión molecular a través de una matriz de esfera hueca porosa sólida (ecuación 1).

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \left( v_r \frac{\partial C_i}{\partial r} + v_\theta \frac{1}{r} \frac{\partial C_i}{\partial \theta} + v_\phi \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial C_i}{\partial \phi} \right) = D_{ij} \left[ \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial C_i}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial C_i}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 C_i}{\partial \phi^2} \right] + R_i - \frac{C_i}{C} (R_i + R_j) \quad (1)$$

### 2.2.1. Cálculo

Aplicando la ecuación integral del teorema del transporte de Reynolds aplicado a la transferencia de especies se tiene:

$$\iiint \frac{\partial (cx_i)}{\partial t} dV + \iiint \nabla \cdot cx_i \bar{v}^* dV - \iiint \nabla \cdot cD_{ij} \nabla x_i dV = \iiint W_i dV \quad (2)$$

Donde c es la concentración molar total de la mezcla binaria, x<sub>i</sub> es la fracción molar de la especie de la especie i en la mezcla, por lo que cx<sub>i</sub> es la concentración molar de la especie i en la mezcla binaria, D<sub>ij</sub>

es el coeficiente de difusión para un sistema binario,  $\bar{v}^*$  es la velocidad media molar local de la mezcla,  $W_i$  es la velocidad de producción de la especie  $i$  por unidad de volumen y  $V$  es el volumen de control.

Expresada tensorialmente, suponiendo tanto concentración molar total de la mezcla binaria constante, así como coeficientes de difusión independientes de las coordenadas espaciales, tendremos:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + (\bar{v}^* \cdot \nabla C_i) = \mathcal{D}_{ij} \nabla^2 C_i + R_i - \frac{C_i}{C} (R_i + R_j) \quad (3)$$

Por lo tanto, la ecuación de difusión adimensional con coeficientes efectivos constantes en pulpa ( $D_F$ ) y piel ( $D_S$ ), considerando la difusión molecular de colorantes como el único mecanismo de transporte dentro de la fruta, unidimensional, sin generación de sustancias por reacción, y suponiendo consecuentemente transporte convectivo despreciable, puede ser tratada como una ecuación diferencial en derivadas parciales presentada de la siguiente manera (Carslaw y Jaeger, 1959; Crank, 1979):

$$\frac{\partial a^*}{\partial \Theta} = \frac{2}{R} \frac{\partial a^*}{\partial R} + \frac{\partial^2 a^*}{\partial R^2} \quad (4)$$

Sujeta a las siguientes condiciones inicial y de frontera:

$$\text{C. I.: para } \Theta = 0 \quad a^* = \frac{a_i^* - a_s^*}{a_i^* - a_s^*} = 1 \quad \text{at } A \leq R \leq 1 \quad (5)$$

$$\text{C. F. 1: para } \Theta > 0 \quad a^* = \frac{a_s^* - a_s^*}{a_i^* - a_s^*} = 0 \quad \text{at } R = A \quad (6)$$

$$\text{C. F. 2: para } \Theta > 0 \quad \frac{\partial a^*}{\partial R} = - \left[ \frac{D_S}{\frac{r_s - r_0}{D_F}} \right] a^* \quad \text{at } R = 1 \quad (7)$$

Donde

$$\Theta = \frac{D_{ij} t}{r_0^2}, \quad R = \frac{r}{r_0}, \quad A = \frac{r_A}{r_0}, \quad a^* = \frac{a(t) - a_s^*}{a_i^* - a_s^*}$$

Para alcanzar la ecuación 4, se ajustó una línea de tendencia al comparar parámetro de tendencia al rojo  $a^*$  con la concentración presente de colorante rojo gardenia y así obtener una correlación para ajustar los datos experimentales a la ecuación general del transporte de especies.

Luego, una expresión como serie infinita que representa la evolución del parámetro adimensional  $av^*_{(R,\Theta)}$  con relación al tiempo adimensional  $\Theta$  y la coordenada espacial adimensional  $R$ , modificada a la presentada por Maldonado y González Pacheco (2022), puede expresarse como:

$$av^*_{(R,\Theta)} = \frac{3}{(1-A^3)} \sum_1^\infty \int_A^1 R^2 \left\{ e^{-\lambda_m^2 \Theta} + (e^{-\lambda_m^2 \Theta} - 1) \frac{W\Phi_{m(R)}}{\lambda_m^2} \right\} dR \quad (8)$$

Con el objetivo de calcular los coeficientes de difusión efectivos y los valores propios  $\lambda_m$ , se implementó un método de regresión no lineal iterativa por medio del método de mínimos cuadrados utilizando el software Microsoft Excel®.

### 2.3. Análisis estadístico

En el análisis de varianza (ANOVA) se utilizó la prueba HSD de Tukey-Kramer, así como la prueba de Scheffe, con un nivel de significancia de 0.05, mediante el software IBM® SPSS® (V22.0, IBM Corp., NY, EE. UU.), en para determinar la diferencia estadística en la media de los coeficientes. Los resultados se presentan como media  $\pm$  desviación estándar (DE).

### 2.4. Simulación Numérica

Para la visualización de los gráficos de superficie y predicción de los perfiles de concentración, se utilizó el software MATLAB® R2017a (V9.2, The MathWorks Inc., MA, EE. UU.) utilizando condición de frontera de Robin para ajustar un modelo de esfera hueca con doble frontera de difusión en la interfase pulpa – piel de la cereza.

### 3. Resultados y Discusión

En cuanto a la Figura 2, se puede observar que, tanto en piel como en pulpa de cereza, los mayores coeficientes de difusión se obtuvieron cuando las impregnaciones se realizaron a 60°C con una diferencia de 1 orden de magnitud (Fig. 2), luego el fenómeno disminuyó a 50° C, mientras que a 40°C se obtuvieron los coeficientes más bajos, esto podría indicar que la temperatura genera un efecto acelerador del fenómeno de difusión del colorante a través de la pulpa y la piel de las cerezas.

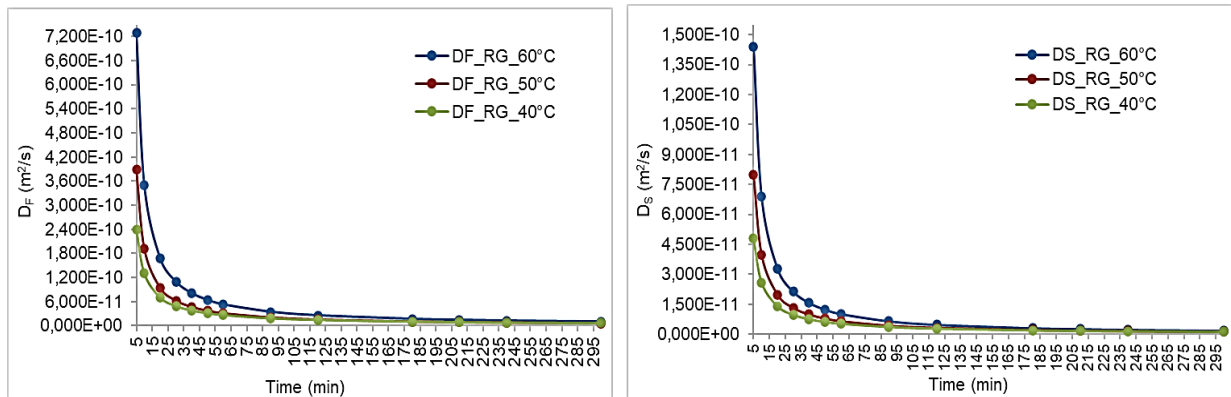


Fig. 2. Coeficientes efectivos de difusión con relación al tiempo para las temperaturas de 40, 50 y 60°C.

Además, los coeficientes de difusión en pulpa de cereza ( $D_F$ ) fueron 1 orden de magnitud superior a los calculados en piel de cereza ( $D_S$ ) (Maldonado, Zuritz y Miras, 2008; Maldonado *et al.*, 2011; da Conceição Silva *et al.*, 2012; Herman *et al.*, 2018), posiblemente debido al efecto barrera generado por la epidermis del fruto. Por otro lado, se observa que durante las primeras 2 horas de iniciado el proceso, es cuando ocurre el movimiento molecular del colorante en mayor medida, es decir, cuando se presenta la mayor diferencia de concentración (Della Rocca, Roche y Mascheroni, 2013).

Por otro lado, los coeficientes de difusión efectivos disminuyeron a medida que avanzaba el fenómeno, acercándose a cero, para tiempos de impregnación avanzados. Esto podría deberse a la reducción de la permeabilidad del sólido poroso, por lo que la solución que impregnaba la pared de los canalículos podría aumentar su tortuosidad, aumentando la dificultad de transporte a través de ellos.

		Temperatura (°C)		
		40	50	60
Rojo de Gardenia <sup>†</sup>	$D_F$ (m <sup>2</sup> /s)	5,012E-11±6,403E-12 <sup>a</sup>	7,067E-11±1,039E-12 <sup>ab</sup>	1,281E-10±1,954E-11 <sup>b</sup>
	$D_S$ (m <sup>2</sup> /s)	1,002E-11±1,281E-12 <sup>a</sup>	1,480E-11±2,139E-12 <sup>ab</sup>	2,517E-11±3,865E-12 <sup>b</sup>

<sup>†</sup>Los resultados se presentan como medias ± DE. Los coeficientes medios con letras diferentes en la misma fila difieren significativamente ( $p < 0.05$ ).

Tabla 1. Coeficientes de difusión efectivos de eritrosina y gardenia roja en piel ( $D_S$ ) y pulpa de cereza ( $D_F$ ) para cada temperatura.

En la Tabla 1 se indican los valores medios de los coeficientes de difusión efectivos rojo gardenia en piel y pulpa de cereza, para cada temperatura. Considerando la difusión de pulpa y piel, a 60°C, los coeficientes de difusión efectivos fueron superiores a los obtenidos a 40 y 50°C, además, se observaron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre los coeficientes de difusión, indicando que la penetración entre temperaturas podría ser diferencial (Maldonado y González Pacheco, 2022).

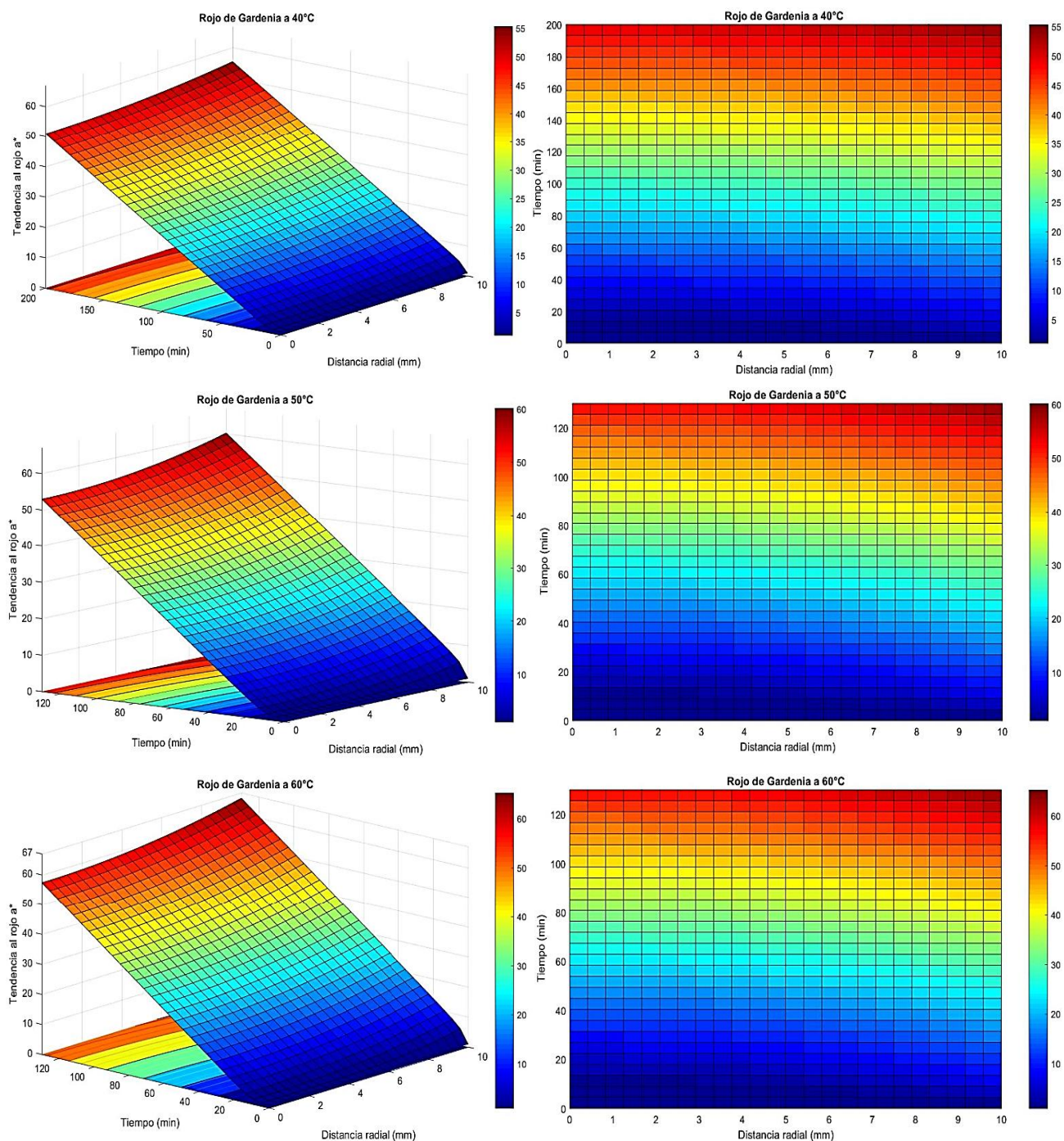


Fig. 3. Superficies de respuesta para evolución de los perfiles de concentración de colorante rojo de gardenia con relación al tiempo y la distancia radial de las cerezas a 40, 50 y 60°C.

En la figura 3 se presentan los perfiles de concentración mediante superficies de respuesta (Torres *et al.*, 2013; Oladejo y Ma, 2016; Granados-Conde *et al.*, 2019; Antonio y Ayma, 2021; Salehi, Razavi Kamran y Goharpour, 2023) a través de los cambios en la tendencia al rojo en función del tiempo y la distancia radial, para las temperaturas de 40, 50 y 60°C. Se pudo observar que la penetración del colorante avanzó de manera progresiva en relación con el radio de la cereza y el tiempo, además, se pudieron observar mayores valores de tendencia al rojo a mayores distancias respecto del centro de la cereza, por lo que, mediante el uso de la condición de frontera de Robin, se pudo visualizar la doble frontera de difusión en la interfase pulpa-piel. Así mismo, a 60°C es donde se pueden observar los valores del parámetro  $a^*$  más elevados (mayores a 60), en un lapso de tiempo de 120 min, mientras que, a 40°C, los valores de tendencia al rojo fueron los más bajos (menores de 60) alcanzándose el máximo a los 200 min, por lo

que aquí se pudo manifestar el efecto acelerador de la temperatura en el fenómeno de difusión del colorante rojo de gardenia.

#### 4. Conclusiones

Mediante modelación matemática se cuantificó el fenómeno de difusión de rojo de gardenia a 357 ppm en cerezas sometidas a impregnaciones a temperaturas de 40, 50 y 60°C. Se obtuvieron coeficientes de difusión superiores cuando las impregnaciones se realizaron a 60°C, reportándose una diferencia de 1 orden de magnitud mayor respecto a los calculados a 40 y 50°C, esto podría deberse a que la temperatura posee un efecto acelerador del fenómeno de difusión en la matriz alimentaria. Además, se obtuvo una diferencia de 1 y hasta 2 órdenes de magnitud superior para los coeficientes en pulpa en comparación con los de piel, lo que podría deberse al efecto barrera que proporciona la epidermis de la cereza.

Durante las primeras 2 h de ensayos, todos los experimentos revelaron el transporte principal de colorante cuando se presentó la máxima diferencia de concentración, lo cual se pudo evidenciar a través de la visualización de los perfiles de concentración. Se presentó diferencia significativa entre los coeficientes de difusión en piel y pulpa para los diferentes experimentos ( $p < 0.05$ ), posiblemente debido a que el fenómeno difusivo entre temperaturas es diferencial. Adicionalmente, en tiempos de proceso avanzados, todos los coeficientes efectivos, disminuyeron a medida que avanzaba el fenómeno de impregnación.

Así mismo, se pudo observar en los gráficos de superficie que la difusión avanzó de manera progresiva en relación con el radio de la cereza y el tiempo, además, se pudieron observar mayores valores de tendencia al rojo a mayor temperatura y distancias respecto del centro de la cereza, por lo que, mediante el uso de la condición de frontera de Robin, se pudo visualizar la doble frontera de difusión en la interfase pulpa-piel.

#### Bibliografía

Abraão, A. S. *et al.* (2013) 'Influence of osmotic dehydration process parameters on the quality of candied pumpkins', *Food and Bioproducts Processing*, 91(4). doi: 10.1016/j.fbp.2013.04.006.

El Aissaoui, A. and El Afif, A. (2017) 'Non-Fickian mass transfer in swelling polymeric non-porous membranes', *Journal of Membrane Science*, 543, pp. 172–183. doi: 10.1016/J.MEMSCI.2017.08.035.

Amami, E. *et al.* (2014) 'Osmotic dehydration of some agro-food tissue pre-treated by pulsed electric field: Impact of impeller's Reynolds number on mass transfer and color', *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 26(1), pp. 93–102. doi: 10.1016/J.JKSUES.2012.10.002.

Antonio, M. and Ayma, P. (2021) 'Determinación de los Parámetros en la Deshidratación Osmótica en Láminas de Mashua (*Tropaeolum tuberosum*), Mediante la Metodología de Superficie de Respuesta', *Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac*. Available at: <http://repositorio.unamba.edu.pe/handle/UNAMBA/1006> (Accessed: 11 August 2023).

Baptistini, F. M. *et al.* (2017) 'Heat and mass transfer coefficients and modeling of infrared drying of banana slices', *Revista Ceres*, 64(5). doi: 10.1590/0034-737X201764050002.

Berkowitz, B., Emmanuel, S. and Scher, H. (2008) 'Non-Fickian transport and multiple-rate mass transfer in porous media', *Water Resources Research*, 44(3), p. 3402. doi: 10.1029/2007WR005906.

Bordin, M. S. P. *et al.* (2019) 'Mathematical modeling of multicomponent NaCl and KCl diffusion process during the salting of pre-cooked champignon mushrooms', *Food Chemistry*, 273, pp. 99–105. doi: 10.1016/J.FOODCHEM.2018.01.188.

Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C. (1959) *Conduction of Heat in Solids*. 2nd ed. Ox. New York, N.Y.

Clemente, M. A. J. *et al.* (2020) 'Mathematical modeling of NaCl and KCl diffusion in mozzarella cheese using static and stirred brine', *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*, 56(7). doi: 10.1007/s00231-020-02849-2.

da Conceição Silva, M. A. *et al.* (2012) 'Mass transfer during the osmotic dehydration of West Indian cherry', *LWT - Food Science and Technology*, 45(2), pp. 246--252. doi: 10.1016/j.lwt.2011.07.032.

- Crank, J. (1979) *The mathematics of diffusion*. Oxford university press.
- Deen, N. G. *et al.* (2014) 'Review of direct numerical simulation of fluid–particle mass, momentum and heat transfer in dense gas–solid flows', *Chemical Engineering Science*, 116, pp. 710–724. doi: 10.1016/J.CES.2014.05.039.
- Eggleston, G. *et al.* (2013) 'Seasonal variations of sugarcane stalk and extraneous matter on pH, color and ash as they affect the production of high quality raw sugars (Part II)', *International Sugar Journal*, 115(1377).
- Faustino, M. *et al.* (2019) 'Agro-Food Byproducts as a New Source of Natural Food Additives', *Molecules* 2019, Vol. 24, Page 1056, 24(6), p. 1056. doi: 10.3390/MOLECULES24061056.
- Ferreira, J. A. *et al.* (2015) 'A new look to non-Fickian diffusion', *Applied Mathematical Modelling*, 39(1), pp. 194–204. doi: 10.1016/J.APM.2014.05.030.
- de Freitas, B. S. M. *et al.* (2018) 'Physical-chemical characterization of yellow mombin (*Spondias mombin* L.) foam-mat drying at different temperatures', *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 22(6), pp. 430–435. doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v22n6p430-435.
- Gagliardi, M. (2019) 'Mathematical Modeling and Experimental Study of Water Diffusion and Swelling in Polymer Films', *Macromolecular Theory and Simulations*, 28(3). doi: 10.1002/mats.201800063.
- Giusti, M. M. and Wrolstad, R. E. (1996) 'Radish Anthocyanin Extract as a Natural Red Colorant for Maraschino Cherries', *Journal of Food Science*, 61(4), pp. 688–694. doi: 10.1111/J.1365-2621.1996.TB12182.X.
- Giusti, M. M. and Wrolstad, R. E. (2008) 'Color quality of maraschino cherries', *ACS Symposium Series*, 983, pp. 43–53. doi: 10.1021/BK-2008-0983.CH004.
- González-Pérez, J. E. *et al.* (2022) 'Modeling mass transfer during osmodehydration of apple cubes with sucrose or apple juice concentrate solutions: Equilibrium estimation, diffusion model, and state observer-based approach', *Journal of Food Process Engineering*, 45(10), p. e14125. doi: 10.1111/JFPE.14125.
- González-Pérez, J. E., Ramírez-Corona, N. and López-Malo, A. (2021) 'Mass Transfer During Osmotic Dehydration of Fruits and Vegetables: Process Factors and Non-Thermal Methods', *Food Engineering Reviews*. doi: 10.1007/s12393-020-09276-3.
- Granados-Conde, C. *et al.* (2019) 'DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA MÉTODO ALTERNATIVO DE CONSERVACIÓN DE ALIMENTOS', *@limentech, Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 17(2), pp. 101–114. doi: 10.24054/LIMENTECH.V17I2.323.
- Gusmão, R. P. de *et al.* (2016) 'Mathematical Modeling and Determination of Effective Diffusivity of Mesquite during Convective Drying', *American Journal of Plant Sciences*, 07(06). doi: 10.4236/ajps.2016.76076.
- Gutiérrez-Macías, P. *et al.* (2019) 'Purple pigment from *Peltogyne mexicana* heartwood as a potential colorant for food', *Journal of Food Science and Technology*, 56(7). doi: 10.1007/s13197-019-03779-6.
- Hasan, S. *et al.* (2019) 'Saturation Dependence of Non-Fickian Transport in Porous Media', *Water Resources Research*, 55(2), pp. 1153–1166. doi: 10.1029/2018WR023554.
- Herman, C. *et al.* (2018) 'Convective drying of fermented Amazonian cocoa beans (*Theobroma cacao* var. Forasteiro). Experiments and mathematical modeling', *Food and Bioprocess Processing*, 108, pp. 81–94. doi: 10.1016/j.fbp.2018.01.002.
- Jamali, S. H. *et al.* (2020) 'Generalized Form for Finite-Size Corrections in Mutual Diffusion Coefficients of Multicomponent Mixtures Obtained from Equilibrium Molecular Dynamics Simulation', *Journal of Chemical Theory and Computation*, 16(6), pp. 3799–3806. doi: 10.1021/ACS.JCTC.0C00268/ASSET/IMAGES/LARGE/CT0C00268\_0004.JPEG.
- Khan, I. S. *et al.* (2020) 'Genotoxic effect of two commonly used food dyes metanil yellow and



carmoisine using *Allium cepa* L. as indicator', *Toxicology Reports*, 7, p. 370. doi: 10.1016/J.TOXREP.2020.02.009.

Maldonado, M. *et al.* (2014) 'Alternative sugar substitutes in canned cherries with improved nutritional value suitable for special diet consumers', *International Journal of Biotechnology and Food Science* 2 (7): 126-142 (November 2014). Available at: <http://repositorio.inta.gob.ar:80/handle/20.500.12123/3374> (Accessed: 3 March 2023).

Maldonado, M. *et al.* (2016) 'Uso del colorante Azul Brillante en cerezas en conserva', *Revista Espanola de Nutricion Comunitaria*, 22(2), pp. 38–48. doi: 10.14642/RENC.2016.22.2.5137.

Maldonado, M. B. *et al.* (2011) 'A simple model of the diffusion phenomena taking place during the debittering process of green table olives', *grasas y aceites*, 62(1), pp. 39--48. doi: 10.3989/gya.022810.

Maldonado, M. B. (2021) 'Nuevos desafíos para la industria alimentaria y los nuevos conocimientos acerca del tercer cerebro', *Revista de Nutrición Clínica y Metabolismo*, 4(4), pp. 92–97. doi: 10.35454/RNCM.V4N4.326.

Maldonado, M. B., Zuritz, C. A. and Assof, M. V (2008) 'Diffusion of glucose and sodium chloride in green olives during curing as affected by lye treatment', *Journal of food engineering*, 84(2), pp. 224--230. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2007.04.033.

Maldonado, M. B., Zuritz, C. A. and Miras, N. (2008) 'Influence of brine concentration on sugar and sodium chloride diffusion during the processing of the green olive variety Arauco', *Grasas y Aceites*, 59(3), pp. 267--273. doi: 10.3989/gya.2008.v59.i3.518.

Maldonado, M. and González Pacheco, J. (2020) 'Shrinkage phenomenon in cherries during osmotic dehydration', *Annals. Food Science and Technology*, 21(1), pp. 19–30. Available at: [http://www.afst.valahia.ro/images/documente/2020/I.2\\_Maldonado.pdf](http://www.afst.valahia.ro/images/documente/2020/I.2_Maldonado.pdf) (Accessed: 26 August 2021).

Maldonado, M. and González Pacheco, J. (2022) 'Mathematical modelling of mass transfer phenomena for sucrose and lactitol molecules during osmotic dehydration of cherries', *Heliyon*, 8(1), p. e08788. doi: 10.1016/J.HELIYON.2022.E08788.

Martins, N. *et al.* (2016) 'Food colorants: Challenges, opportunities and current desires of agro-industries to ensure consumer expectations and regulatory practices', *Trends in Food Science & Technology*, 52, pp. 1–15. doi: 10.1016/J.TIFS.2016.03.009.

Mohamed, S. (2014) 'Functional foods against metabolic syndrome (obesity, diabetes, hypertension and dyslipidemia) and cardiovascular disease', *Trends in Food Science and Technology*, 35(2), pp. 114–128. doi: 10.1016/J.TIFS.2013.11.001.

Mohd-Adnan, A. F. *et al.* (2011) 'Colour analysis of potential natural colourant from *Ixora siamensis* and *Melastoma malabathricum*', *Materials Research Innovations*, 15(SUPPL. 2). doi: 10.1179/143307511X13031890748939.

Muñoz, O. and Maldonado Cid, S. (2003) *Antocianos y Betalainas Colorantes Naturales de Aplicación Industrial*. Available at: <http://repositorio.anid.cl/handle/10533/205957> (Accessed: 5 May 2022).

Oladejo, A. O. and Ma, H. (2016) 'Optimisation of ultrasound-assisted osmotic dehydration of sweet potato (*Ipomea batatas*) using response surface methodology', *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(11), pp. 3688–3693. doi: 10.1002/JSFA.7552.

Oladzadabbasabadi, N. *et al.* (2022) 'Natural anthocyanins: Sources, extraction, characterization, and suitability for smart packaging', *Food Packaging and Shelf Life*, 33, p. 100872. doi: 10.1016/J.FPSL.2022.100872.

Oplatowska-Stachowiak, M. and Elliott, C. T. (2015) 'Food Colours: Existing and Emerging Food Safety Concerns', *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(3), pp. 524–548. doi: 10.1080/10408398.2014.889652.

Panachiyil, G. *et al.* (2019) 'A pediatric case report of fixed drug eruption related to carmoisine colorant

- present in paracetamol syrup', *Indian Journal of Pharmacology*, 51(4), p. 279. doi: 10.4103/IJP.IJP\_29\_19.
- Rezagah, M. E. *et al.* (2011) 'Osmotic dehydration of button mushroom: Fickian diffusion in slab configuration', *Latin American Applied Research*, 40(1).
- Della Rocca, P. A., Roche, L. A. and Mascheroni, R. H. (2013) 'Estudio de la transferencia de agua durante la deshidratación osmótica de zanahoria', *Proyecciones*, 11.(2). Available at: [http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/73855/Documento\\_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/73855/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y) (Accessed: 26 September 2020).
- Rubio-Arreaez, S. *et al.* (2015) 'Modelling osmotic dehydration of lemon slices using new sweeteners', *International Journal of Food Science and Technology*, 50(9). doi: 10.1111/ijfs.12859.
- Salehi, F., Razavi Kamran, H. and Goharpour, K. (2023) 'Effects of ultrasound time, xanthan gum, and sucrose levels on the osmosis dehydration and appearance characteristics of grapefruit slices: Process optimization using response surface methodology', *Ultrasonics Sonochemistry*, 98, p. 106505. doi: 10.1016/j.ultsonch.2023.106505.
- Sayago, U. F. C. (2021) 'Design and development of a biotreatment of *E. crassipes* for the decontamination of water with Chromium (VI)', *Scientific Reports*, 11(1). doi: 10.1038/s41598-021-88261-0.
- Seguí, L., Fito, P. J. and Fito, P. (2012) 'Understanding osmotic dehydration of tissue structured foods by means of a cellular approach', *Journal of Food Engineering*, 110(2), pp. 240–247. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2011.05.012.
- Shi, J. and Le Maguer, M. (2002) 'Osmotic dehydration of foods: mass transfer and modeling aspects', *Food Reviews International*, 18(4), pp. 305–120016208. doi: 10.1081/FRI-120016208.
- Sigurdson, G. T., Tang, P. and Giusti, M. M. (2017) 'Natural Colorants: Food Colorants from Natural Sources', <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-food-030216-025923>, 8, pp. 261–280. doi: 10.1146/ANNUREV-FOOD-030216-025923.
- da Silva, D. V. T. *et al.* (2019) 'Betanin, a Natural Food Additive: Stability, Bioavailability, Antioxidant and Preservative Ability Assessments', *Molecules*, 24(3). doi: 10.3390/MOLECULES24030458.
- Simpson, R. *et al.* (2013) 'Fractional Calculus as a Mathematical Tool to Improve the Modeling of Mass Transfer Phenomena in Food Processing', *Food Engineering Reviews*, 5(1). doi: 10.1007/s12393-012-9059-7.
- Simpson, R. *et al.* (2015) 'Diffusion mechanisms during the osmotic dehydration of Granny Smith apples subjected to a moderate electric field', *Journal of Food Engineering*, 166, pp. 204–211. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2015.05.027.
- Torres, D. *et al.* (2013) 'Optimización de las condiciones de deshidratación osmótica de espárrago (*Asparagus officinalis*) utilizando la metodología de superficie de respuesta', *Agroindustrial Science, ISSN-e 2226-2989, Vol. 3, Nº. 1, 2013 (Ejemplar dedicado a: Agroindustrial Science), págs. 7-18, 3(1), pp. 7–18. Available at: https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6583394&info=resumen&idioma=SPA* (Accessed: 11 August 2023).
- Xu, H. T. *et al.* (2014) 'Numerical simulation of double diffusive mixed convection in an open enclosure with different cylinder locations', *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 52. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.01.005.
- Zuritz, C. A. and Maldonado, M. B. (2004) 'A simple method to determine diffusion of sodium in the epidermis of green olives', *Journal of food process engineering*, 27(5), pp. 328–344. doi: 10.1111/j.1745-4530.2004.00466.x.