

# EVALUACIÓN DE LA DIFUSIÓN DE ARSÉNICO EN ZANAHORIAS: IMPACTO DE LA TEMPERATURA Y TIEMPO DE COCCIÓN

Oscar Daniel Galvez<sup>1</sup>; Mariela Beatriz Maldonado<sup>2</sup>; María Cristina Vargas<sup>2</sup>; Juan Ignacio González Pacheco<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Depto. Materias Básicas, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional / lcidanielgalvez@yahoo.com.ar.

<sup>2</sup>Depto. Ingeniería Química, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional /  
[marielabeatriz1972@yahoo.com.ar](mailto:marielabeatriz1972@yahoo.com.ar)  
[coropel@yahoo.com.ar](mailto:coropel@yahoo.com.ar)  
[jngonzalez534@gmail.com](mailto:jngonzalez534@gmail.com)

**Resumen:** Este trabajo analiza la difusión de arsénico en zanahorias cocidas en soluciones arsenicales a diferentes temperaturas y tiempos de cocción, un tema relevante para la salud pública en regiones afectadas por la contaminación del agua con arsénico. El estudio se llevó a cabo utilizando zanahorias híbridas del tipo Nantesa, cocidas en una solución de arsénico de  $5 \text{ mgL}^{-1}$  a temperaturas de 89°C, 94°C y 99°C, con tiempos de cocción que variaron entre 30 y 240 minutos. Se tomaron muestras en distintos intervalos y se analizó la concentración de arsénico mediante espectrofotometría de absorción atómica. El modelo matemático utilizado fue el de un cilindro homogéneo semi-infinito, basado en la segunda ley de Fick. Los resultados mostraron que la difusión del arsénico aumenta con la temperatura. A medida que la cocción progresó, la concentración de arsénico disminuyó desde la epidermis hacia el centro de la zanahoria. Los coeficientes efectivos de difusión calculados para la pulpa de zanahoria variaron con la temperatura y fueron consistentes con estudios previos. Para la región superior de la zanahoria, los coeficientes obtenidos fueron de  $6.83\text{E-}09 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  a 89°C,  $8.24\text{E-}09 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  a 94°C y  $4.72\text{E-}08 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  a 99°C. En la región media, los valores fueron de  $9.76\text{E-}09 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  a 89°C,  $6.36\text{E-}09 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  a 94°C y  $2.47\text{E-}08 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  a 99°C. Para la región inferior, se obtuvieron  $1.25\text{E-}08 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  a 89°C,  $7.38\text{E-}09 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  a 94°C y  $2.79\text{E-}08 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  a 99°C. El estudio concluye que la temperatura es un factor determinante en la difusión del arsénico en las zanahorias, con implicaciones para la seguridad alimentaria en zonas contaminadas.

**Palabras claves:** Zanahoria, arsénico, coeficientes de difusión, transferencia de materia, modelo cilíndrico.

## INTRODUCCIÓN

El problema asociado con la preparación de alimentos en zonas afectadas por la presencia de arsénico en el agua aún no ha sido adecuadamente estudiado. Por ello, es crucial investigar la difusión del arsénico en zanahorias, dado que este elemento altamente tóxico podría concentrarse durante el proceso de cocción. Esto genera preocupación debido a los posibles efectos adversos que el arsénico podría tener sobre la salud pública.

El arsénico (As) es un elemento natural presente en formaciones geológicas y suelos, que llega a las aguas subterráneas a través de procesos como la disolución y lixiviación. Además, las actividades industriales han contribuido a aumentar sus concentraciones en diferentes regiones, superando en algunos casos los niveles permitidos en el agua potable establecidos por las normativas. Este elemento entra en la cadena alimentaria principalmente a través del consumo y la cocción en agua contaminada con altos niveles de arsénico, la absorción por cultivos regados con dicha agua, y la ingesta de organismos marinos (RSA-CONICET, 2018; Marchetti et al., 2021; Smedley & Kinniburgh, 2002).

La transferencia de masa de pequeñas moléculas y solutos en sistemas alimentarios ocurre mediante varios mecanismos, destacando la difusión molecular como el proceso principal de transporte. El modelo que describe la difusión es el más adecuado para comprender el movimiento de agua y la dispersión de pequeñas moléculas y solutos en alimentos, ofreciendo resultados valiosos para la ingeniería y los procesos tecnológicos (Cussler, 2009; Saravacos & Maroulis, 2001; Tijskens et al., 2001).

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se emplearon zanahorias bienales híbridas del tipo varietal Nantesa obtenidas de un productor de zanahoria de Mendoza, Argentina. Se trabajó con tres niveles de temperatura de 89°C, 94°C y 99°C y tiempos de cocción de 240, 60 y 30 minutos respectivamente, a la concentración de arsénico de 5 mgL<sup>-1</sup>. Se cocinaron las zanahorias enteras con su epidermis a las distintas temperaturas en un baño termostatizado marca Technicon, modelo Autoanalyzer II con agitación a 1150 rpm. El tiempo de cocción o duración del ensayo a esas temperaturas se determinó en función de un determinado valor de grado de terneza en las tres regiones superior, medio e inferior. El valor

objetivo fue igual o menor a 3,0 kg.m<sup>-2</sup> (Galvez et. al., 2018). La solución de As para la cocción de las zanahorias se preparó a partir de una solución stock de 1000 mgL<sup>-1</sup> de arsénico, que contenía 1,320 g de trióxido de diarsénico, As<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Anedra, grado analítico) y 4,000 g de NaOH, luego se diluyó con agua destilada (resistividad 100 mOhms) hasta 1 L (Rice et al., 2012). En cada ensayo se usaron 15 zanahorias y por cada zanahoria se obtuvieron 9 muestras para posterior determinación de arsénico total. La cantidad de arsénico total en la zanahoria se evaluó en función de la temperatura de cocción de las zanahorias en el baño termostatizado, manteniendo la concentración de la solución arsenical constante. Se extrajeron tres (3) zanahorias (triplicado) en cada intervalo de tiempo, a las zanahorias se les realizó una serie de cortes para obtener las muestras en función de la altura del corte (longitud de la zanahoria) y distancia radial de la muestra (Galvez et. al., 2019, 2024). Previo a las determinaciones de arsénico se realizó una mineralización ácida a las muestras sólidas de zanahoria, para luego medir la cantidad de arsénico total en espectrofotómetro de absorción atómica Unicam 929, empleando método normalizado 3114.C, generación continua de hidruro/espectrometría de absorción atómica (Rice et al., 2012). Previo a la inmersión de las zanahorias en solución de arsénico se recubrieron los extremos con revestimiento impermeable al agua (pintura asfáltica), para evitar transferencia longitudinal de soluto durante la cocción.

### **1.1 Modelo matemático: cilindro sólido semi-infinito. Estado no estacionario**

Se realizó una aproximación del modelo cilíndrico sólido semi-infinito considerando al cuerpo geométrico homogéneo en su totalidad, sin discriminar las partes morfológicas de la zanahoria. El cilindro considerado estuvo compuesto por pulpa en su totalidad. El modelo matemático aplicado en esta investigación fue extraído de (Crank, 1975). La zanahoria cuenta con una concentración inicial de arsénico y su superficie estuvo expuesta a una concentración de solución arsenical constante, Cs.

El modelo cilíndrico se basó en los siguientes supuestos:

1. La difusión molecular es el único mecanismo de transporte dentro del sólido, de manera que se desprecia transporte convectivo ( $v_x=v_y=v_z=0$ ).

2. La difusión se considera sin generación de sustancias por reacción química.
3. La pulpa de la zanahoria es homogénea e isotrópica con concentración inicial ( $c_i$ ) uniforme.
4. La difusión molecular es unidireccional.
5. La epidermis adquiere instantáneamente la concentración de la solución arsenical en el momento de inmersión de las zanahorias en la misma, debido a la gran agitación (1150 rpm) del líquido rodeando las superficies (elevado número de Biot) (Ecuación 1).

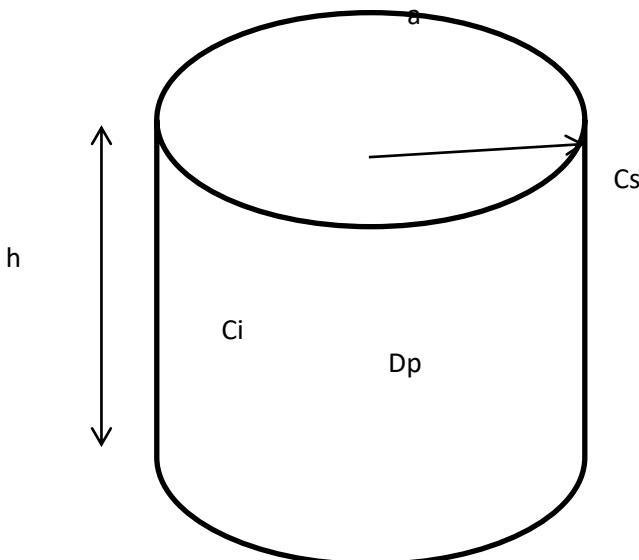
$$C_i(x_i, t) = C_{i(x_{sup})} = C_{soluc} ; t > 0 \quad (1)$$

6. Se considera proceso isotérmico.

En Figura 1 se muestra el modelo cilíndrico para la muestra región superior.

**Figura 1**

*Modelo cilíndrico homogéneo.*



Donde:

- Cs: concentración de arsénico en la superficie externa de la zanahoria en  $\mu\text{g/g As}$ .
- Ci: concentración inicial de arsénico promedio en  $\mu\text{g As/g}$  de zanahoria, valor hallado de las muestras obtenidas de 27 zanahorias.
- Dp: coeficiente de difusión de pulpa en  $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ .
- a: radio de pulpa de la región superior en m.
- h: altura de las porciones superior, medio e inferior en m.

Aplicando la segunda ley de Fick para un gradiente de concentración en una sola dirección, la variación de la concentración en el tiempo se puede calcular con la siguiente Ecuación 2 en coordenadas cilíndricas:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_p \left( \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad (2)$$

La cual describe los cambios de la concentración con las variables temporal t y espacial r. Donde Dp es el coeficiente de difusión de la pulpa asumido constante durante el proceso. La Ecuación 2 está sujeta a las siguientes condiciones inicial y de frontera (Ecuación 3):

$$\text{CI: } C = C_i; \quad 0 \leq r \leq 1; \quad t = 0 \quad (3)$$

$$\text{CF: } C = C_s; \quad r = a; \quad t > 0$$

La solución general de la Ecuación 2 con la condición inicial y de frontera de la Ecuación 3 está dada por la Ecuación 4:

$$C = C_s + (C_i - C_s) \frac{2}{a} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-D_p \alpha_n^2 t}}{\alpha_n} \frac{J_0(r\alpha_n)}{J_1(a\alpha_n)} \quad (4)$$

Donde los valores propios,  $\alpha_n$  son las raíces positivas de  $J_0(a\alpha_n) = 0$

La concentración volumétrica promedio de la Ecuación 4 está dada por la ecuación 5:

$$\langle C \rangle = \frac{2}{a^2} \int_0^a r C dr \quad (5)$$

Resolviendo la integral de la Ecuación 5, obtenemos la Ecuación 6:

$$\langle C \rangle = C_s + \frac{4}{a^2} (C_i - C_s) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-D_p \alpha_n^2 t}}{\alpha_n^2} \quad (6)$$

Para tiempos de proceso largos  $t \gg 0$ , podemos descartar los términos mayores que 1 de la serie infinita y, por lo tanto, es posible trabajar con el primer término. Así resulta la Ecuación 7:

$$\langle C \rangle = C_s + \frac{4}{a^2} (C_i - C_s) \frac{e^{-D_p \alpha_n^2 t}}{\alpha_n^2} \quad (7)$$

Realizando un cambio de variables,  $\beta_n = \alpha_n \cdot a$ , obtenemos la Ecuación 8:

$$\langle C \rangle = C_s + 4 (C_i - C_s) \frac{e^{-\frac{\beta_n^2 D_p t}{a^2}}}{\beta_n^2} \quad (8)$$

Los valores de los coeficientes de difusión promedio y los valores propios se calcularon de la Ecuación 8 con los datos experimentales volumétricos de concentración de arsénico y radio promedio de la región superior, medio e inferior en cada intervalo de tiempo, utilizando el método de Mínimos Cuadrados, que minimiza la Ecuación 9:

$$S = \sum_{i=1}^N \left( \tilde{C}_{i-\text{exp.}} - \tilde{C}_{i-\text{calc.}} \right)^2 \quad (9)$$

Donde:

- $\tilde{C}_{i-\text{exp.}}$ : es la concentración volumétrica experimental.
- $\tilde{C}_{i-\text{calc.}}$ : es la concentración volumétrica estimada.

La Ecuación 9 es una función no lineal del coeficiente de difusión efectivo de la pulpa de zanahoria y los valores propios, para ello, se utilizó el método de regresión no lineal de GraphPad Prism 8.0.1 para calcular el valor de la difusividad de la pulpa utilizando la Ecuación 8.

### **Limitaciones del método usado**

- Se considera a la pulpa como isotrópica y homogénea, cuando en realidad tienen configuraciones morfológicas distintas. A fin de resolver el modelo difusional en la varias publicaciones consultadas (da Silva et al., 2018; Kian-Pour, 2023; Maldonado et. al., 2008; Maldonado, 2011; Maldonado et. al., 2003; Pereira da Silva et al., 2009) se utiliza la resolución de la 2º ley de Fick que determina un coeficiente de difusión  $D_p$  para la pulpa.
- Se aplica a un determinado rango de temperatura y concentración de arsénico.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Se realizó un control del experimento midiendo la concentración de arsénico en zanahorias crudas, sin someterlas a cocción, para determinar su contenido inicial. Los datos obtenidos corresponden al promedio de tres repeticiones, expresados en microgramos de arsénico total por gramo de zanahoria ( $\mu\text{g As/g zanahoria}$ ). A los valores experimentales se les restó la cantidad inicial de arsénico presente. El contenido inicial arsénico fue de  $0,127 \mu\text{g/g}$  de zanahoria, que corresponde al promedio de 243 muestras, obtenidas de 27 zanahorias crudas analizadas antes de comenzar los experimentos (9 muestras por zanahoria).

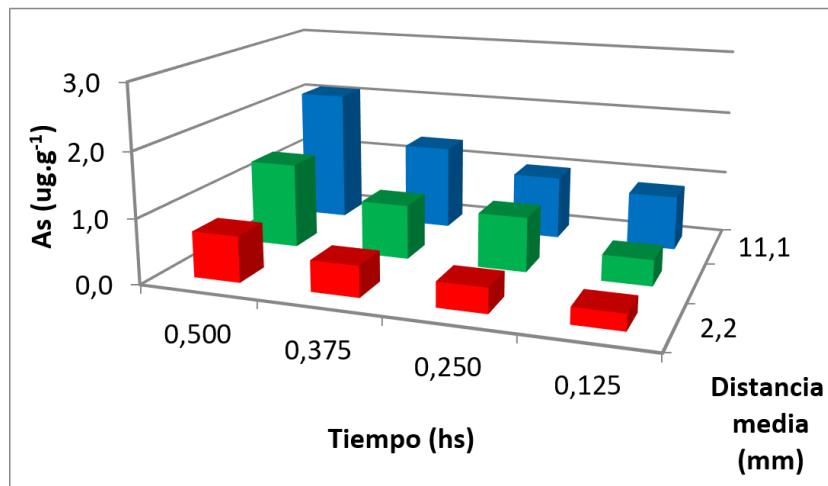
### **Perfiles de concentración de arsénico**

En las Figuras 2, 3 y 4 se presentan los perfiles de concentración de arsénico de las regiones inferiores, obtenidos durante la cocción de zanahorias a las temperaturas de  $89^\circ\text{C}$ ,  $94^\circ\text{C}$  y  $99^\circ\text{C}$  en solución

arsenical de  $5 \text{ mgL}^{-1}$ . Las distancias consignadas representan el punto medio de los cortes, medidos desde el centro de la zanahoria hacia la epidermis.

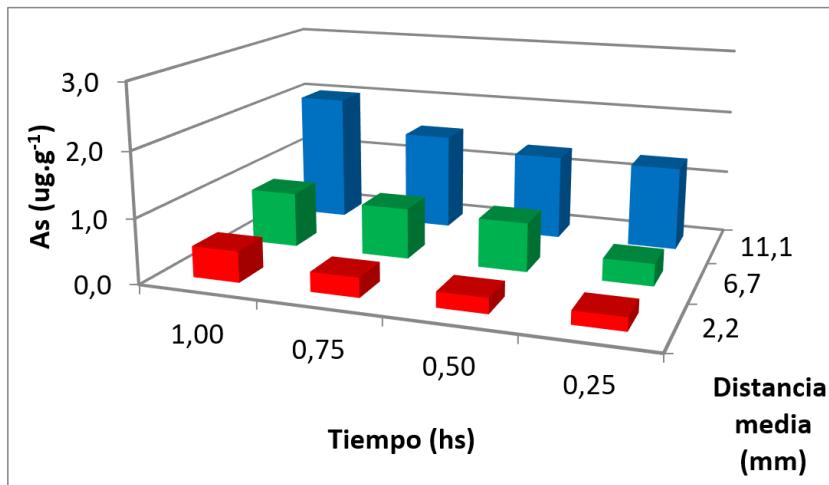
**Figura 2**

*Concentración de arsénico versus tiempos de cocción para cada distancia media desde centro de zanahoria a epidermis en región inferior. Ensayo a  $99^{\circ}\text{C}$  en solución As  $5 \text{ mgL}^{-1}$*



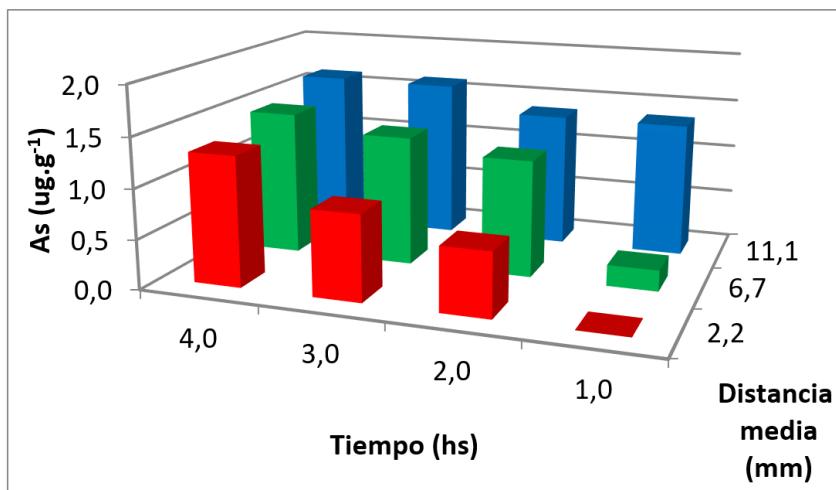
**Figura 3**

Concentración de arsénico versus tiempos de cocción para cada distancia media desde centro de zanahoria a epidermis en región inferior. Ensayo a 94°C en solución As 5 mgL<sup>-1</sup>



**Figura 4**

Concentración de arsénico versus tiempos de cocción para cada distancia media desde centro de zanahoria a epidermis en región inferior. Ensayo a 89°C en solución As 5 mgL<sup>-1</sup>



En las Figuras 2, 3 y 4 se observó que la concentración de arsénico disminuyó a medida que se desplazó desde la epidermis hasta el centro de la zanahoria. Esto ocurrió en cada intervalo de muestreo y en todos los ensayos a diferentes temperaturas. Además, las figuras mostraron que, a medida que transcurría el tiempo, ingresaba más arsénico en la zanahoria. En estos ensayos también se pudieron observar que en general, las cantidades de arsénico en la zanahoria para las distintas distancias radiales (d<sub>1</sub>, d<sub>2</sub> y d<sub>3</sub>) son mayores a medida que aumenta la concentración de arsénico en la solución de cocción. En estos experimentos se nota, en términos generales, que a medida que la temperatura aumenta, las concentraciones en las diferentes distancias e intervalos de muestreo tienden a ser mayores. Además, la concentración tiende a acercarse a valores similares a los de la solución original.

Al disminuir la temperatura decrecen las colisiones intermoleculares y disminuye la fuerza impulsora en el proceso fenomenológico de ingreso

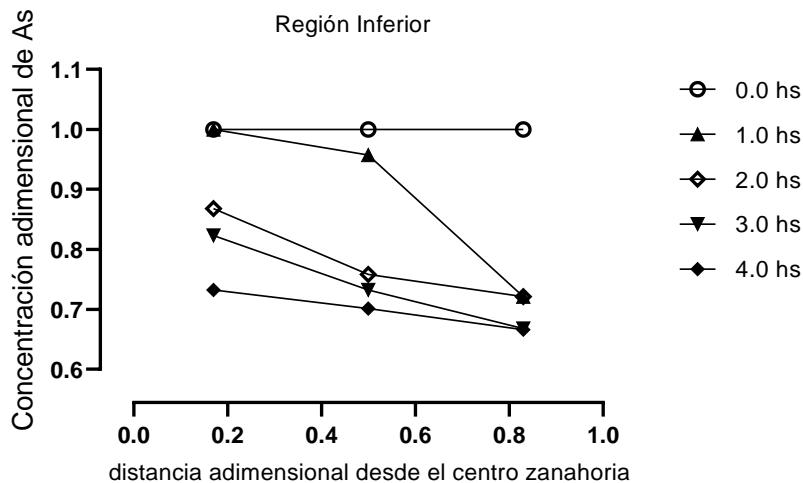
de arsénico en la matriz de la zanahoria, con lo cual es de esperar que los tenores de arsénico decrezcan con la disminución de temperatura, sin embargo, al ser la zanahoria un material biológico fue difícil determinar a priori la difusión de arsénico dentro de la matriz, por lo tanto, se eligió como método de referencia el grado de terneza como punto final del ensayo. Al establecer el grado de terneza en la zanahoria nos permitió asumir igualdad de condiciones finales de cocción (Galvez et. al., 2018). Esto hizo que los tiempos de cocción de los ensayos a distintas temperaturas variaran en duración, haciendo que la concentración de arsénico en el primer intervalo de muestreo en la distancia media 2,2 mm fuera en el ensayo 1; con una duración de 7,5 minutos; de 0,252 µg/g As a 99°C, de 0,203 µg/g As a los 15 minutos y temperatura de 94°C; ensayo cuya duración fue de 60 minutos; y de 0,000 µg/g As en ensayo 3 a 89°C a los 60 minutos. Al disminuir la temperatura decrecieron la fuerza impulsora y el grado de avance del As en el interior de la zanahoria. Sin embargo, al término de cada ensayo en la misma distancia media, en ensayo a 99°C se obtuvo una cantidad de 0,710 µg/g As, de decayó a 0,480 µg/g As a 94°C, aunque aumentó a 1,306 µg/g As en el ensayo a 89°C, casi el doble de cantidad que lo obtenido en ensayo 1, esto podría deberse al tiempo de duración de este último ensayo que fue 8 veces mayor respecto del ensayo a 99°C, donde el arsénico tuvo mayor cantidad de tiempo para difundirse lentamente en la zanahoria. Situaciones similares se observaron en otras distancias medias y regiones de corte.

Se calcularon las concentraciones y distancias adimensionales. Las distancias se calcularon usando el Teorema del Punto Medio, ajustado a una función lineal a los datos experimentales. Las distancias adimensionales representan el punto medio de cada región de corte, medido desde el centro hacia la superficie de la zanahoria.

Los datos experimentales expresados como concentraciones y distancias adimensionales de las regiones inferiores de los ensayos, se presentan en las Figuras 5, 6 y 7 para solución arsenical de 5 mgL<sup>-1</sup> a las temperaturas de 89°C, 94°C y 99°C. En todos los casos se consideró como tiempo inicial al momento de colocar las zanahorias en las soluciones de tratamiento.

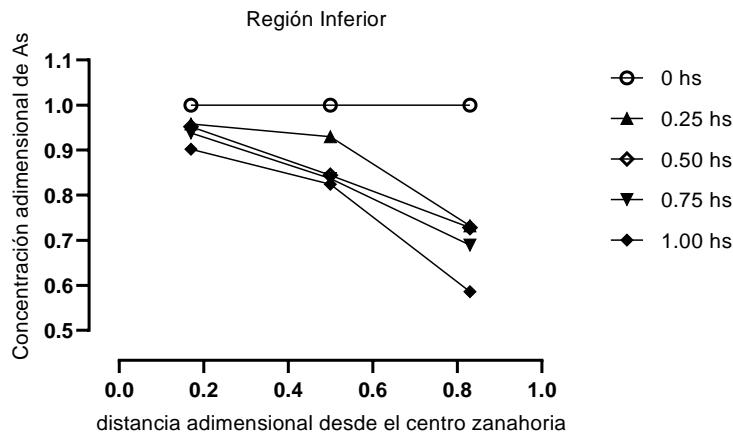
**Figura 5**

Concentración adimensional de arsénico versus distancia adimensional desde el centro de la zanahoria. Tratamiento con solución arsenical de  $5 \text{ mgL}^{-1}$  a  $89^\circ\text{C}$ .



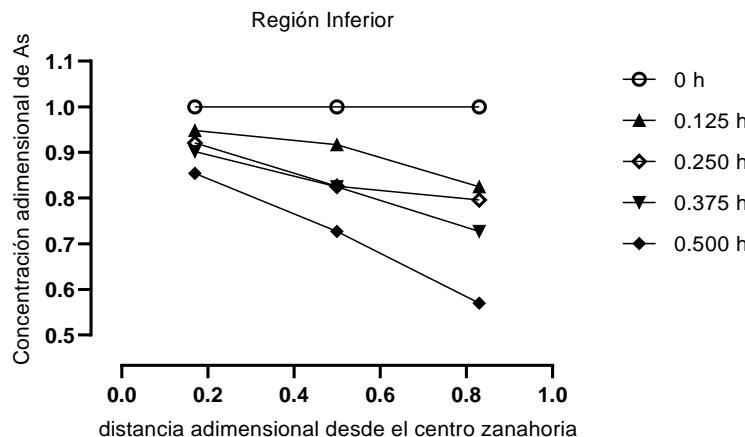
**Figura 6**

Concentración adimensional de arsénico versus distancia adimensional desde el centro de la zanahoria. Tratamiento con solución arsenical de  $5 \text{ mgL}^{-1}$  a  $94^\circ\text{C}$ .



**Figura 7**

Concentración adimensional de arsénico versus distancia adimensional desde el centro de la zanahoria. Tratamiento con solución arsenical de  $5 \text{ mgL}^{-1}$  a  $99^\circ\text{C}$ .



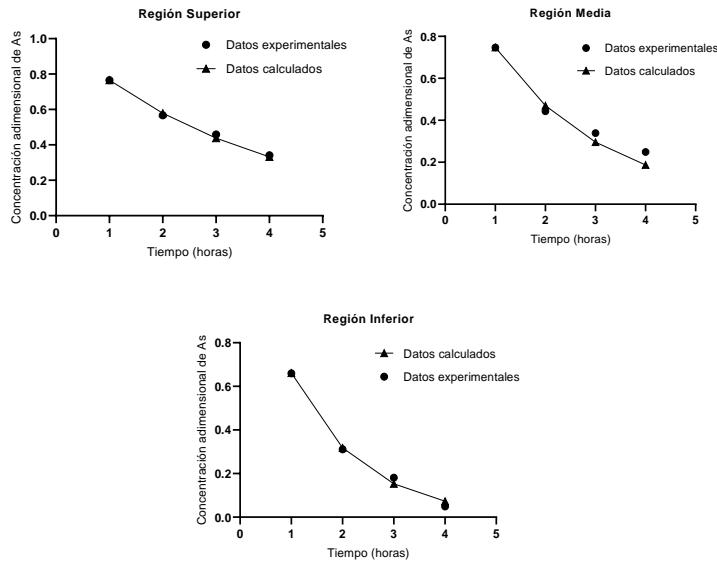
También en estos casos, las Figuras 5, 6 y 7 muestran claramente que un incremento de temperatura aumenta la tasa de difusión del arsénico dentro de la pulpa de las zanahorias, por ejemplo, a la distancia adimensional  $X = 0,126$ , la concentración adimensional (C) disminuyó desde 1,000 hasta 0,964 en 11,25 hora a 15°C; hasta 0,953 en 6,00 horas a 20°C y hasta 0,945 en 4,00 horas a 25°C

También en estos casos, las figuras 5, 6 y 7 muestran que con el aumento en el tiempo de cocción en los ensayos se observaran situaciones similares al de los perfiles de concentración, por ejemplo en la región inferior la distancia adimensional igual 0,83, la concentración adimensional disminuyó desde 1,000 hasta 0,721 en 2,0 horas a 89°C; hasta 0,728 en 0,50 horas a 94°C y 0,796 en 0,250 horas a 99°C, mientras que para la distancia adimensional de 0,17 los valores de las concentraciones adimensionales fueron respectivamente de 0,868; 0,952 y 0,921.

Las concentraciones volumétricas promedio,  $\langle C \rangle$ , se obtuvieron sumando las correspondientes tres concentraciones puntuales para cada intervalo de tiempo. Estos valores se correlacionaron con la Ecuación 6. Los resultados de los ajustes para las tres regiones se muestran en las Figuras 8, 9 y 10 para los tratamientos con solución arsenical de  $5 \text{ mgL}^{-1}$  a las temperaturas de 89°C, 94°C y 99°C.

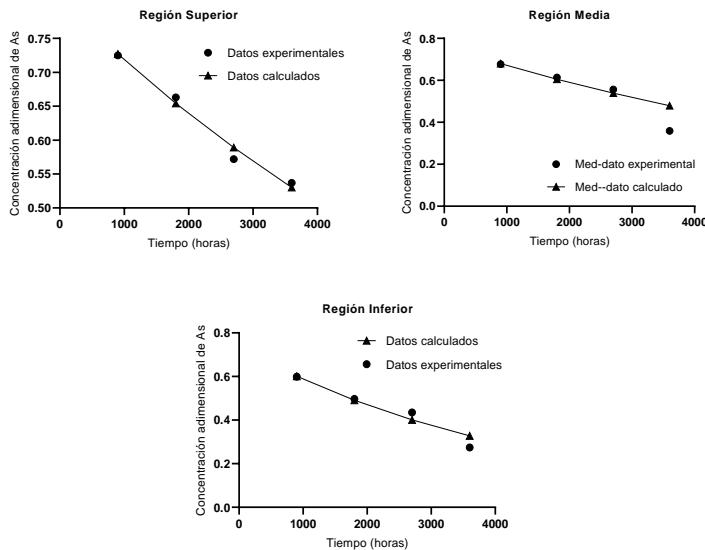
**Figura 8**

*Datos experimentales versus concentraciones adimensionales promedio de arsénico ( $\langle C \rangle$ ) calculadas para tratamientos con solución arsenical  $5 \text{ mgL}^{-1}$  a  $89^\circ\text{C}$ .*



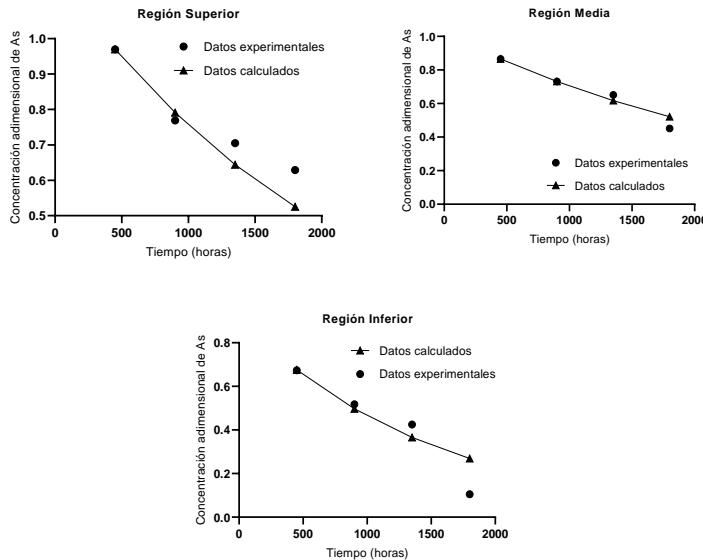
**Figura 9**

*Datos experimentales versus concentraciones adimensionales promedio de arsénico ( $\langle C \rangle$ ) calculadas para tratamientos con solución arsenical  $5 \text{ mgL}^{-1}$  a  $94^\circ\text{C}$ .*



**Figura 10**

*Datos experimentales versus concentraciones adimensionales promedio de arsénico ( $\langle C \rangle$ ) calculadas para tratamientos con solución arsenical  $5 \text{ mgL}^{-1}$  a  $99^\circ\text{C}$ .*



Los coeficientes efectivos de difusión de la pulpa ( $D_p$ ), calculados con la Ecuación 6 se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Coeficientes de Difusión de arsénico de la pulpa ( $D_p$ ) en función de la temperatura para concentración de arsénico  $5 \text{ mgL}^{-1}$ . Modelo cilindro homogéneo.*

Región	89°C		94°C		99°C	
	$D_p (\text{m}^2\text{s}^{-1})$	$r^2$	$D_p (\text{m}^2\text{s}^{-1})$	$r^2$	$D_p (\text{m}^2\text{s}^{-1})$	$r^2$
Superior	6,83E-09	0,997	8,24E-09	0,986	4,72E-08	0,975
Medio	9,76E-09	0,989	6,36E-09	0,967	2,47E-08	0,982
Inferior	1,25E-08	0,998	7,38E-09	0,962	2,79E-08	0,925

Del análisis de Tabla 1 se observó que los valores de  $D_p$  aumentaron al incrementar la temperatura a una solución arsenical de  $5 \text{ mgL}^{-1}$  constante, durante la cocción de las zanahorias. Se observó que al aumentar el gradiente térmico aumentó la velocidad de avance de las moléculas de arsénico, lo cual también fue corroborado por Maldonado et al. (2003). Los valores hallados de difusividad de arsénico en zanahoria estuvieron en el orden de  $6,36\text{E-}09$  a  $4,72\text{E-}08 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ , estos fueron consistentes con lo hallado por Melquíades, López & Rosas (2009), en procesos de hidratación o rehidratación con agua destilada en zanahorias peladas y cortadas en placas entre  $3,46\text{E-}10$  a  $4,59\text{E-}10 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  en el rango de temperaturas entre  $40\text{-}80^\circ\text{C}$  (Melquíades, López & Rosas, 2009).

Por su parte, Zambrano Zaragoza, Rodríguez & Álvarez (2007) reportó coeficientes de difusión de agua entre  $6,11\text{E-}09$  a  $3,18\text{E-}09 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  a temperaturas entre  $50\text{-}93^\circ\text{C}$  para zanahorias liofilizadas y rehidratadas con agua y soluciones de cloruro sódico y ácido ascórbico. Della Rocca et al. (2014) hallaron un valor del coeficiente de difusión efectiva del agua de  $1,57\text{E-}9 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  por Osmodehidrocongelación, deshidratando las zanahorias en inmersión de soluciones de sacarosa y cloruro sódico (Della Rocca et al., 2014; Zambrano Zaragoza, Rodríguez & Álvarez, 2007). También, Amami et al., (2014), calculó los coeficientes efectivos de difusividad de agua ( $D_w$ ) y sacarosa ( $D_{es}$ ), estudiando el efecto para cinco velocidades diferentes de agitación (0, 250, 500, 1000, 1500 rpm) en rodajas de plátano, manzana y zanahoria en una concentración fija de azúcar (65% p/p), a una temperatura fija ( $25^\circ\text{C}$ ), los valores hallados fueron para  $D_w$  de  $14,50\text{E-}10 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  a  $Re=0$  y  $15,50\text{E-}10 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  a  $Re=252$  y para  $D_{es}$  de  $9,65\text{E-}10 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  a  $Re=0$  y  $10,90\text{E-}10 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  a  $Re=252$  (Amami et. al., 2014). Esos valores son consistentes con los hallados en este trabajo.

También los coeficientes de difusión reportados en la Tabla 1 son consistentes con Saravacos y Maroulis (2001) quienes hallaron valores típicos de difusividad de humedad de varios productos alimenticios a distintas temperaturas, entre ellos para zanahoria:  $2,00\text{E-}10 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  a  $30^\circ\text{C}$ , de  $2,20\text{E-}12$  a  $7,46\text{E-}09 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  para  $20^\circ\text{C}$  y  $100^\circ\text{C}$  (Saravacos & Maroulis, 2001). Por su parte estos valores son menores que los hallados por Matusek & Merész (2002) para difusión de azúcares en zanahorias, cuyos valores fueron del orden de  $10\text{-}11 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  lo cual es consistente dado que la masa molecular de los azúcares es mucho mayor que la del arsénico (Matusek & Merész, 2002).

## CONCLUSIONES

Se cuantificó el fenómeno de difusión en la zanahoria a las temperaturas de 89°C, 94°C y 99°C a la concentración arsenical constante de 5 mgL<sup>-1</sup>. Los coeficientes efectivos promedios de difusión variaron con las temperaturas y los valores hallados para las regiones superior, medio e inferior fueron de 6,83E-09; 9,76E-09 y 1,25E-08 m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup> para la temperatura de 89°C; 8,24E-09; 6,36E-09 y 7,38E-09 m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup> para 94°C y de 4,72E-08; 2,47E-08 y 2,79E-08 m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup> para temperatura de 99°C.

Se observó una correspondencia de las concentraciones de arsénico con la distancia radial y avance de penetración de la solución arsenical en el tejido de la zanahoria y la altura del corte realizado en la muestra. En las tres regiones; superior; media e inferior se observaron comportamientos similares donde el contenido de arsénico descendió desde la periferia hacia el centro de la zanahoria, consistente con los datos de los coeficientes de difusión calculados, donde el coeficiente efectivo de difusión en la región central fue menor que la distancia radial hacia afuera de la zanahoria.

## REFERENCIAS

- Amami, E., Khezami, L., Jemai, A. B., & Vorobiev, E. (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), 93-102. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jksues.2012.10.002>
- Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion* (2d ed.). Clarendon Press.
- Cussler, E. L. (2009). *Diffusion. Mass transfer in fluid systems* (3<sup>rd</sup> ed.). Cambridge University Press.
- da Silva, W. P., Nunes, J. S., Gomes, J. P., de Araújo, A. C. & eSilva, C. M. D. P. S. (2018). Description of jambolan (*Syzygium cumini* (L.)) anthocyanin extraction kinetics at different stirring frequencies of the medium using diffusion models. *Heat Mass Transfer* 54, 3275-3285. <https://doi.org/10.1007/s00231-018-2349-8>
- Della Rocca, P., Roche, L., Languasco, J., & Mascheroni, R. (2014). Modelado de la Cinética de Conservación de Zanahoria (*Daucus Carota*) por Osmodehidrocongelación. *Revista Tecnología y Ciencia*, 12(24), 141-159. <https://rtyc.utn.edu.ar/index.php/rtyc/article/view/497/404>
- Galvez, O. D., Maldonado, M. B., Affranchino, G., & Perez, R. C. (2018, octubre 24-26). *Resultados parciales en estudios de difusión de arsénico en *Daucus carota* sp.* [Conference presentation]. 1º Congreso Latinoamericano de Ingeniería de Procesos y Productos y 3º Congreso de Ingeniería de Procesos y Productos, Resistencia, Chaco, Argentina.

- Galvez, O. D., Affranchino, G., Maldonado, M. B. & Perez, R. C. (2019). Estudio de la Difusión de arsénico en *Daucus carota L.* Evolución Temporal de la concentración. *Libro de Actas X Encuentro de Investigadores y Docentes de Ingeniería (ENIDI)*, Mendoza, Argentina, 19-25. [http://ingenium.frm.utn.edu.ar/docs/X%20EnIDI%202019%20\(actas-proceedings\)/Proceeding-Actas%20X%20EnIDI-2019.pdf](http://ingenium.frm.utn.edu.ar/docs/X%20EnIDI%202019%20(actas-proceedings)/Proceeding-Actas%20X%20EnIDI-2019.pdf).
- Galvez, O. D., Maldonado, M. B., Vargas, M. C., Affranchino, G., & González Pacheco, J. I. (2024). Estimation of diffusion coefficients during carrots cooking in arsenious solution at different temperatures. *Helijon*, 10(2). Article Number e24285. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24285>
- RSA-CONICET (2018). *Arsénico en agua. Informe Final*. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. <https://rsa.conicet.gov.ar/wp-content/uploads/2018/08/Informe-Arsenico-en-agua-RSA.pdf>
- Kian-Pour, N. (2023). Effect of Biopolymer Dip-Coating Pretreatments as a Non-Thermal Green Technology on Physicochemical Characteristics, Drying, and Rehydration Kinetics of Santa Maria Pears. *Foods* 12(13), Article Number 2466. <https://doi.org/10.3390/foods12132466>
- Maldonado, M., Zuritz, C. A., & 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), 224-230. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.04.033>
- Maldonado, M. B. (2011). *El desamarizado. Difusión de sodio durante el desamarizado de aceitunas verdes de mesa*. EAE Editorial Academia Española.
- Maldonado, M. B., Gascón, A. D., Zuritz, C. A. & Rey García, D. (2003). Difusión de sodio en aceitunas verdes durante el tratamiento alcalino. I: Efecto de la concentración de la lejía. *Grasas y Aceites*, 54(4), 358-364. <https://grasasyaceites.revistas.csic.es/index.php/grasasyaceites/article/view/221/221>
- Marchetti, M. D., Tomac, A., & Perez, S. (2021). Perfil de riesgo para la inocuidad de alimentos: presencia de arsénico en Argentina. *Revista Argentina de Salud Pública*, 13, Article Number e47. Recuperado a partir de <https://rasp.msal.gov.ar/index.php/rasp/article/view/650>
- Matusek, A., & Merész, P. (2002). Modelling of sugar transfer during osmotic dehydration of carrots. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering* 46(1-2), 83-92. <https://pp.bme.hu/ch/article/view/273/167>
- Melquiádes, Y. I., López, C., & Rosas, M. E. (2009). Estudio de la cinética de rehidratación de zanahoria (*Daucus Carota*) deshidratadas. *Información tecnológica*, 20(3), 65-72. <https://www.scielo.cl/pdf/infotec/v20n3/art09.pdf>
- Pereira da Silva, W., Precker, J. W., e Silva, C. M. D. P. S. & e Silva, D. D. P. S. (2009). Determination of the effective diffusivity via minimization of the objective function by scanning: application to drying of cowpea. *Journal of Food Engineering*, 95(2), 298-304. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2009.05.008

- Rice, E. W., Baird, R. B., Eaton, A. D., & Clesceri, L. S. (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (22<sup>th</sup> ed.). American Public Health Association.
- Saravacos, G. D., & Maroulis, Z. B. (2001). *Transport properties of foods*. CRC Press.
- Smedley, P. L., & Kinniburgh, D. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied geochemistry*, 17(5), 517-568. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00018-5)
- Tijskens, L. M. M., Hertog, M. L. A. T. M. & Nicolaï, B. M. (2001). *Food process modelling*. Woodhead Publishing Ltd..
- Zambrano Zaragoza, M. L., Rodríguez, D. B., & Álvarez, A. (2007). Estudio cinético y de superficie de respuesta para la rehidratación de zanahorias (*Daucus carota*) liofilizadas. *Información tecnológica*, 18(4), 47-56. <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v18n4/art08.pdf>

\* \* \* \* \*

