

Modelado y simulación de la inactivación de patógenos con higienizantes en un tanque de lavado de alimentos operado en continuo y con flujo turbulento

Ari S. Moreno-Razo^a, Nerea Martínez-López^a, Míriam R. García^{a,*}

^aBiosystems and Bioprocess Engineering (Bio2End). Spanish National Research Council (IIM-CSIC) R/ Eduardo Cabello n°6, 36208, Vigo, Pontevedra, España

To cite this article: Moreno-Razo, A. S., Martínez-López, M., García, M.R. 2023. Modelling and simulation of pathogen inactivation with sanitizers in a food washing tank operated continuously and with turbulent flow. XLIV Jornadas de Automática, 429-434. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498609.429>

Resumen

Las autoridades de seguridad alimentaria en los últimos años están demandando avances en el modelado y simulación de la lavado de frutas y verduras que permitan diseñar modos de operación sostenible (mínimo consumo de agua) garantizando la seguridad final del alimento. Se requiere, además, evitar que los residuos y patógenos se trasladen del agua de lavado al alimento (contaminación cruzada). En este estudio, se simula el proceso de lavado y desinfección en un tanque industrial en régimen turbulento. Para modelar el transporte de especies (desinfectante, patógenos y materia orgánica), se considera la ecuación de advección-difusión. Para describir la inactivación de los patógenos en el agua, se incluye el modelo de reacción describiendo las interacciones entre las distintas especies. Los resultados revelan que, aunque un incremento en las velocidades del flujo (aumento de la turbulencia) genera mayor homogeneidad en la distribución de desinfectante, el tiempo característico del proceso resulta insuficiente para inactivar eficazmente los patógenos en el agua.

Palabras clave: Dinámica de fluidos, Flujo turbulento, Modelo de desinfección, Advección-difusión-reacción, Simulación numérica, COMSOL Multiphysics, Clorina libre, Lavado de alimentos frescos.

Modelling and simulation of pathogen inactivation with sanitizers in a food washing tank operated continuously and with turbulent flow

Abstract

Food safety authorities in recent years are demanding advances in modeling and simulating the washing of fruits and vegetables to support the development of sustainable operation designs (minimum water use) and guaranteeing final product safety. It is required, moreover, to avoid the transference of residues and pathogens from the wash water to the food (cross-contamination). In this study, we simulate an industrial washing and disinfection process in a tank in a turbulent regime. We consider the advection-diffusion equation to model the species (disinfectant, pathogens, and organic matter) transport, and we include the reaction model between the different species to describe pathogen inactivation in the wash water. The results reveal that, although increasing flow velocities (increased turbulence) generates greater homogeneity in the disinfectant distribution, the characteristic time of the process becomes insufficient to inactivate pathogens in the water.

Keywords: Fluid dynamics, Turbulent flow, Disinfection model, Advection-diffusion-reaction, Numerical simulation, COMSOL Multiphysics, Free chlorine, Fresh produce washing process

1. Introducción

Los higienizantes basados en cloro son ampliamente usados en el lavado de productos frescos de cosecha, como frutas y

verduras. Su uso supone una alternativa barata al lavado únicamente con agua limpia por dos ventajas fundamentales (Tudela et al., 2019): (1) hacen el proceso más sostenible medioam-

*Autor para correspondencia: miriamr@iim.csic.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

bientalmente, ya que se reduce substancialmente el consumo de agua, tan escasa en ciertas zonas de cultivo, y (2) garantizan la seguridad alimentaria, resultando efectivos para inactivar posibles virus y bacterias patógenas en el alimento. Además, el proceso puede diseñarse para reutilizar el agua de lavado y tratar distintos lotes de alimentos, ya que los higienizantes inactivan también los patógenos en el agua que se recircula, previniendo así la contaminación cruzada. Sin embargo, la eficiencia de la desinfección se ve altamente afectada por los tiempos de contacto con el desinfectante, la presencia de materia orgánica en el agua (Abnavi et al., 2021), y por sus características fisicoquímicas (Abnavi et al., 2021), como la absorbancia ultravioleta a 254 nm (UV254), turbidez o sólidos suspendidos (Gómez-López et al., 2014).

Mientras las dinámicas de acción del cloro están bastante estudiadas, incluso con algunos trabajos proponiendo modelos dinámicos para las variables fundamentales (Munther et al., 2015; Mokhtari et al., 2018), no lo está tanto la pérdida de efectividad del higienizante debido a los modos de operación que llevan a distribuciones espaciales de variables clave, como la concentración de cloro libre o de microorganismos, tanto en el alimento lavado (Yi et al., 2022) como en el agua (Tan et al., 2022). Desde el punto de vista de diseño del proceso, el estudio en Tan et al. (2022) resulta esencial, siendo el único que simula la distribución de materia orgánica y clorina libre (cantidad de cloro en disolución disponible para inactivar patógenos), así como sus interacciones, en el agua de tanques de lavado continuo en forma de canal, típicos de la industria alimentaria. Este enfoque permite analizar el efecto de diversas configuraciones en el tanque, como la variación en la velocidad del flujo de agua de lavado, así como las velocidades de inyección de clorina, tanto en régimen laminar como turbulento. El estudio concluye que la distribución espacial de clorina es más homogénea en este último caso, minimizando así las regiones sin desinfectante. No obstante, falta extender este estudio para evaluar el impacto en la inactivación de posibles patógenos tanto en el alimento como en el agua de lavado, ya que a pesar de analizar la distribución de clorina en el tanque, no se realiza ninguna medición sobre la concentración de patógenos y como ésta se ve afectada bajo las distintas configuraciones de lavado propuestas.

Con el objetivo de reducir la contaminación cruzada durante el proceso de lavado y desinfección de frutas y verduras, en este trabajo se emplea el software de simulación numérica COMSOL Multiphysics para analizar la distribución de microorganismos patógenos en un tanque con forma de canal usando clorina como higienizante. Para ello, se evalúa la distribución espacial de las distintas especies disueltas: microorganismos, materia orgánica (exudados de los productos de cosecha) y clorina, a lo largo del canal en régimen turbulento. El estudio se realiza tanto considerando las reacciones entre estas especies como el sistema puramente de transferencia, con el objetivo de evaluar la capacidad de inactivación del higienizante bajo las condiciones de operación propuestas en la literatura.

2. Metodología

2.1. Geometría del canal de lavado

Para simular el proceso de lavado se utilizó el diseño de un tanque basado en un modelo industrial de Heinzen M.I., con es-

pecificaciones en las medidas tomadas de Tan et al. (2022). El dominio espacial fue tomado como el tanque completo en forma de canal. Recorriendo el tanque longitudinalmente, al inicio se encuentra la entrada de flujo de agua de lavado, sobre la base se disponen seis puertos de inyección de higienizante y al final una salida de flujo, tal y como se muestra en la Figura 1. La Figura 2 muestra un corte transversal del tanque, especificando las medidas y el plano de simetría que fueron utilizados en el momento de caracterizar el flujo y construir la malla para la resolución numérica de la simulación.

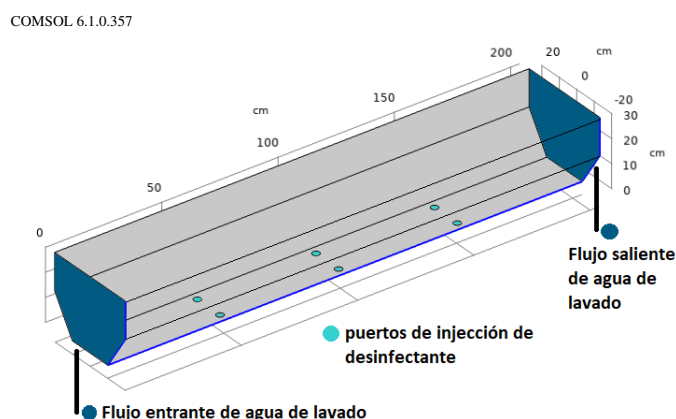


Figura 1: Geometría del canal de lavado.

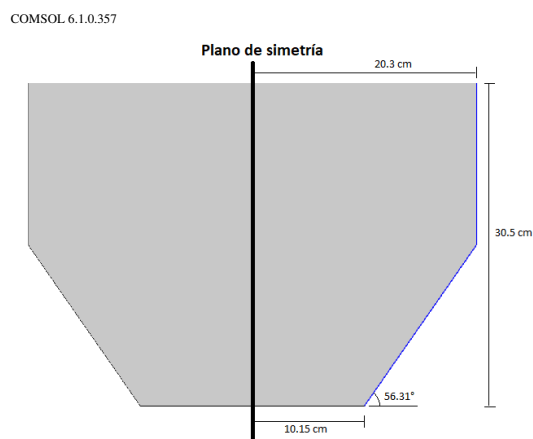


Figura 2: Sección transversal del canal.

2.2. Modelo de la dinámica de fluidos en el tanque

Dada la geometría del tanque, el número de Reynolds que caracteriza el flujo de agua durante el proceso de lavado se calcula de la siguiente forma

$$Re = \frac{\rho \bar{v} D_h}{\mu},$$

donde, tomando una temperatura de referencia de $T = 298.15K$, $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$ y $\mu = 1 \times 10^{-3} \text{ Pa s}$ son la densidad y viscosidad dinámica del agua, respectivamente, y $\bar{v} = 0.1 \text{ m s}^{-1}$ denota la velocidad característica del flujo, que ha sido tomada como la velocidad de entrada del agua de lavado. Finalmente, D_h es el diámetro hidráulico del tanque, dado por

$$D_h = \frac{4A}{2P_w},$$

siendo A el área de la sección transversal del tanque y P_w el perímetro mojado, que se ha calculado considerando todo el perímetro de la sección, resultando $D_h = 0.33\text{m}$.

Con lo anterior, se obtiene

$$\text{Re} = 32,934 \times 10^4,$$

valor que caracteriza un flujo turbulento en el canal si tomamos $\text{Re} = 2000$ como el límite del régimen laminar (Davidson, 2015). Por lo tanto, se ha utilizado un modelo RANS $k - \varepsilon$ para describir un flujo adiabático incompresible, cuyas ecuaciones están dadas por

$$\begin{aligned} \rho \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0, \\ \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} &= \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mathbf{K}] + \mathbf{F}, \\ \mathbf{K} &= (\mu + \mu_T)(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T), \\ \rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)k &= \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + p_k - \rho\varepsilon, \\ \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\varepsilon &= \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} p_k - c_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \\ \mu_T &= \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \\ p_k &= \mu_T \left[\nabla\mathbf{u} : (\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T) \right]. \end{aligned} \quad (1)$$

Las dos primeras ecuaciones del modelo (1) corresponden a la conservación de materia y momento, respectivamente, donde ρ y \mathbf{u} son la densidad y el campo de velocidades del fluido, respectivamente, mientras que p denota la presión. Por otro lado, \mathbf{F} es el campo de fuerzas externas sobre el fluido, que se ha tomado como cero al ser la gravedad la única fuerza externa presente (despreciable debido a las pequeñas diferencias en la altura del tanque y porque el arrastre de fluido en el canal es suficientemente rápido). Los términos μ y μ_t denotan la viscosidad dinámica y turbulenta del fluido, respectivamente. Esta última viene dada por la densidad del fluido, una constante del modelo de turbulencia c_μ , la energía cinética turbulenta k (que mide las fluctuaciones en la energía cinética del sistema), y la tasa de disipación de energía cinética turbulenta ε (cantidad de energía cinética turbulenta que se transforma en energía interna). Las ecuaciones para las variables de turbulencia ε y k se incluyen también en (1), donde p_k es un término de producción que se calcula en función del campo de velocidades y la viscosidad turbulenta. Finalmente, $c_{\varepsilon 1} = 1.44$, $c_{\varepsilon 2} = 1.92$, $c_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1$ y $\sigma_\varepsilon = 1.3$ son parámetros estándar del modelo de turbulencia $k - \varepsilon$ (Davidson, 2015).

Las condiciones de contorno para las ecuaciones (1) son:

- Presión cero en el drenaje.
- Esfuerzo cortante cero en la superficie del canal.
- Condición de no deslizamiento en las paredes del tanque.
- Velocidad de entrada del agua de lavado constante, con módulo $\|\mathbf{u}\| = v_{in,w}$, y dirección normal a la superficie de entrada del tanque (*inlet water flow* en la Figura 1)
- Velocidad constante de entrada del cloro a través de los puertos de inyección, con módulo $\|\mathbf{u}\| = v_{in,c}$, y dirección normal al fondo del tanque.

2.3. Modelo de reacción y transporte de especies

Dado que el objetivo del trabajo es simular la desinfección en el agua de lavado y estudiar la contaminación cruzada, la materia orgánica que se considera en el modelo corresponde al exudado generado por los productos de cosecha, y no a los alimentos en sí mismos. Asimismo, los patógenos modelados son aquellos presentes en el agua de lavado que han sido transferidos desde los vegetales o frutas contaminados y que, por lo tanto, dan paso a la contaminación de nuevos productos.

Para incluir las dinámicas de la materia orgánica O , el agente higienizante C y los patógenos X en el tanque, así como las interacciones entre las distintas especies, se considera el siguiente sistema de ecuaciones de advección-difusión con términos de reacción asociados a cada especie (Bianco et al., 2011; Clairambault, 2013):

$$\begin{aligned} -D_C \Delta C + \mathbf{u} \cdot \nabla C &= -\lambda C - \beta OC, \\ -D_O \Delta O + \mathbf{u} \cdot \nabla O &= 0, \\ -D_X \Delta X + \mathbf{u} \cdot \nabla X &= -\alpha CX. \end{aligned} \quad (2)$$

El primer término en el lado izquierdo de las ecuaciones ((2)) corresponde al término difusivo, donde D_i es la difusividad de la especie i , con $i \in \{C, O, X\}$. El segundo término a la izquierda de la igualdad describe la convección debido al campo de velocidades en el flujo modelado por las ecuaciones 1. Finalmente, los términos del lado derecho corresponden a las reacciones presentes en cada especie. En el caso del higienizante, el término λC corresponde al decaimiento natural del agente diluido en agua, siendo λ la tasa de decaimiento. Por otro lado, el segundo término de reacción corresponde a la inactivación del higienizante debido a la presencia de materia orgánica en el agua de lavado, donde el parámetro β corresponde a la tasa de agotamiento de desinfectante debido a esta interacción. En el caso de la dinámica de las bacterias patógenas, el término de reacción corresponde a la inactivación de las mismas por el desinfectante a través de la función α .

El parámetro de inactivación α se ha modelado como una función de Michaelis-Menten propuesta para inactivación de bacterias en Abnavi et al. (2021), dada por

$$\alpha = \frac{\gamma K}{K + O}, \quad (3)$$

siendo γ y K constantes estimadas. Para el estudio de virus, otras funciones de inactivación en presencia de materia orgánica han sido propuestas en la literatura, que modelan de forma similar la ineficiencia de la inactivación a concentraciones altas de materia orgánica (Falcó et al., 2023).

Se han impuesto las siguientes condiciones de contorno sobre las ecuaciones (2):

- Concentraciones de patógenos y materia orgánica en la entrada del tanque, X_{in} y O_{in} , no nulas. Concentración de higienizante $C_{in} = 0$ en la entrada.
- Concentración de higienizante en los puertos de inyección constante e igual a C_{iny} .
- Flujo a la salida del tanque: $\mathbf{n} \cdot D_i \nabla i = 0$.

Para analizar el efecto de las reacciones en la concentración de bacterias patógenas se simuló las ecuaciones con los términos de inactivación y decaimiento (forma descrita en (2)), así como las ecuaciones de advección-difusión sin términos de reacción (ecuaciones (2) homogéneas), este último caso considerando entonces únicamente dilución. A continuación, se obtuvieron las concentraciones medias de patógenos en el drenaje del tanque para ambos casos, diluido y diluido con reacción. El porcentaje de la concentración de patógenos con respecto a la entrada del tanque (fijado por la condición frontera), dado por

$$\sigma = 100 \frac{[X]}{[X_{entrada}]},$$

permite el cálculo del efecto de la reacción mediante

$$\sigma_{reacción} = \sigma_{dilución+reacción} - \sigma_{dilución}. \quad (4)$$

2.4. Simulación numérica del sistema

Partiendo del trabajo de Tan et al. (2022), donde se discute la uniformidad en la distribución de clorina libre con tres configuraciones en la dirección de inyección, se optó por utilizar como punto de partida la configuración de la dirección de inyección de clorina como perpendicular a las superficies inclinadas, que presentaba una mayor distribución de higienizante con respecto a las otras estrategias de inyección propuestas. Las velocidades de inyección ($v_{in,c}$) y de flujo medio a la entrada del tanque ($v_{in,w}$) se tomaron como 0.5 m s^{-1} y 0.1 m s^{-1} respectivamente. Los parámetros utilizados para simular las especies en el tanque por medio de las ecuaciones (2) se especifican en la Tabla 1. Como agente desinfectante se ha utilizado la clorina libre, mientras que, para los valores correspondientes al organismo patógeno (especie X), se han tomado de la literatura valores de referencia para la especie bacteriana *E.Coli*. Por otro lado, las concentraciones de inyección de clorina, así como de entrada de materia orgánica y concentración de patógenos, se han escogido $C_{iny} = 0.05 \text{ kg m}^{-3}$, $O_{in} = 2.2255 \text{ kg m}^{-3}$ y $X_{in} = 100 \text{ CFU mL}^{-1}$, respectivamente.

Al adimensionalizar las ecuaciones (2), se obtiene el número de Peclet asociado al transporte de la especie $i \in \{C, O, X\}$,

$$Pe_i = \frac{u_c l_c}{D_i}, \quad (5)$$

con u_c y l_c la velocidad y longitud características del sistema, respectivamente. Para el primero de estos parámetros, se ha tomado $u_c = v_{in,w}$, es decir, la velocidad media del flujo. La longitud característica utilizada es la misma introducida previamente al calcular el número de Reynolds, esto es, $l_c = D_h$. Por otro lado, D_i es la difusividad asociada con la especie $i \in \{C, O, X\}$.

Los valores obtenidos verifican $Pe_i \gg 1$, por lo que los términos convectivos son los predominantes en el transporte.

Para la simulación numérica del modelo, se ha utilizado el software de simulación numérica basado en elementos finitos COMSOL Multiphysics v. 6.10[®]. Se ha implementado el modelo (1-2) mediante los módulos de *flujo turbulento*, *kε* y *transporte de especies diluidas* en un acople *multifísico*, de forma que los valores del campo de velocidades obtenidos del primer módulo se toman como entrada para el segundo.

Se construyó una malla axisimétrica a partir del eje longitudinal del tanque con la intención de conservar la simetría ya presente por la configuración del problema y condiciones de contorno. Se han añadido elementos refinados alrededor de los puertos de inyección. La malla resultante ilustrada en la figura 3 consta de 591050 elementos tetraédricos y 103723 vértices.

COMSOL 6.1.0.357

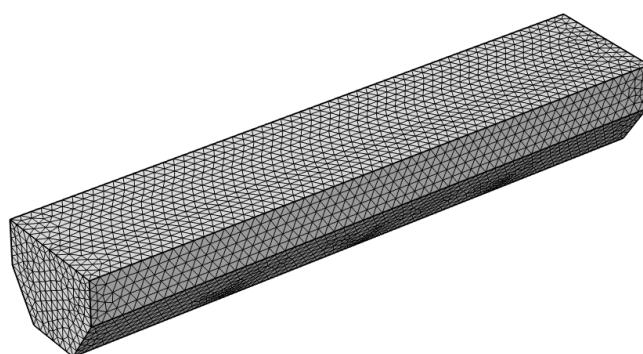


Figura 3: Mallado en tetraedros de la geometría del canal

Se ha realizado una primera simulación para el modelo de dinámica de fluidos a intervalos temporales de 1s, para tiempos de integración totales de 1h. Esto último se ha elegido así debido a que el tanque en el que se ha basado la geometría toma este tiempo como referencia en la ficha del producto (Heinzen M.I.). Tras esta primera simulación, se verifica que en esa escala temporal los cambios en los campos de velocidades no presentan fluctuaciones apreciables para los últimos tiempos de simulación, es decir, se llega a un estado quasi-estacionario. Se trabajó entonces con los modelos de mecánica de fluidos y de transporte de especies (ecuaciones (1) y (2)) bajo un régimen estacionario.

Parámetro	Valor	Definición	Referencia
λ	$6.1667 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$	Tasa de decaimiento de la clorina libre	Tan et al. (2022), de García-Ávila et al.
β	$0.0467 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	Tasa agotamiento del cloro debido a la materia orgánica	Tan et al. (2022), de Waters and Hung
K	$16768 \times 10^{-2} \text{ kg m}^{-3}$	Constante en la función de Michaelis-Menten (ecuación 3)	Abnavi et al. (2021)
γ	$1.17 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$	Coefficiente de inactivación máxima en ausencia de materia orgánica	Abnavi et al. (2021)
D_c	$1.38 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	Coefficiente de difusividad del Cloro libre a 25°C	Tang and Sandall (1985)
D_o	$2.27 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	Coefficiente de difusividad del agua a 25°C	Tanaka (1978)
D_x	$4 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	Coefficiente de difusividad de <i>E.coli</i>	Berg and Turner (1990)

Tabla 1: Parámetros escogidos para el modelo de reacción y transporte de especies

3. Resultados y discusión

La Figura 4 muestra los perfiles de velocidad en la base del tanque, a 0.15 m y 0.30 m del fondo. Estos planos longitudinales exhiben el desarrollo del flujo en su recorrido por el tanque. Es notable la competencia entre las velocidades de inyección de la clorina y de entrada del agua de lavado, que poseen contribuciones ortogonales. Adicionalmente, en la Figura 5(b) puede observarse que la distribución de clorina se encuentra localizada mayormente en los puertos de inyección, y que el flujo inyectado desplaza totalmente al flujo medio que proviene aguas arriba de los puertos. Asimismo, las figuras 5(d) y 5(e) muestran que el arrastre de la concentración de clorina con respecto al plano transversal que contiene a las fuentes de desinfectante es más pronunciado a mayor distancia de estas, resultando en una mejor distribución cerca de la superficie que en las profundidades del tanque. De forma similar, en la Figura 5(a) se puede ver cómo en la base del tanque la concentración de bacterias apenas varía en los alrededores de los puertos de inyección y, en conjunto con las figuras 5(c) y 5(f), se aprecia la reducción en la concentración de bacterias a medida que el flujo inyectado se distribuye. De esta forma, la simulación acorde con el análisis realizado a partir del número de Peclet (5) muestra para las variables de concentración que la distribución de las distintas especies, clorina libre, materia orgánica y patógenos, describen un comportamiento puramente convectivo. Esto se traduce en que la distribución de especies en el tanque se verá gobernada por la configuración dispuesta para las velocidades de inyección, así como las velocidades del flujo entrante de agua de lavado.

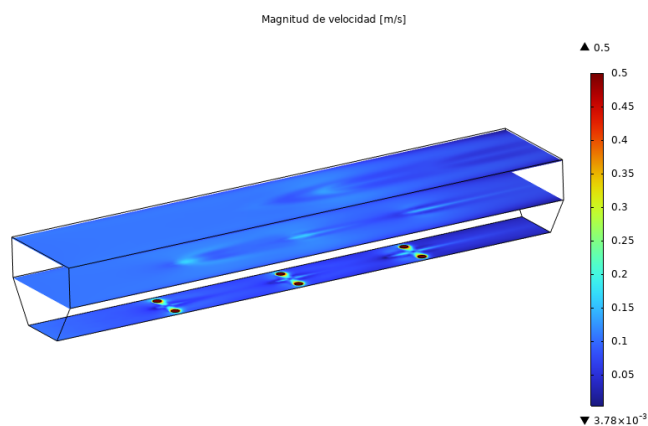


Figura 4: Magnitud del campo de velocidades en la base del tanque, a 0.15 m y a 0.30 m del fondo.

Evaluando la concentración media de patógenos en el drenaje se han obtenido los casos: sin reacción, $\sigma_{dilución} = 97.201\%$ y con reacción, $\sigma_{dilución+reacción} = 97.097\%$, por lo que tan sólo el 0.104 % del flujo continuo de entrada de patógenos son inactivados al abandonar el tanque.

Así, podemos llegar a la conclusión de que no es suficiente con lograr una distribución efectiva de clorina configurando la dirección de las velocidades de inyección y aumentando la turbulencia en el fluido, dado que velocidades lo suficientemente altas en el flujo de entrada provocan, en contraposición, que no haya suficiente tiempo para que las reacciones produzcan un

cambio significativo en la concentración de las especies, por lo que los patógenos no llegan a inactivarse apreciablemente. En otras palabras, el tiempo característico que el fluido permanece en el tanque es insuficiente para lograr una desinfección efectiva del agua. Estas configuraciones sí producen, sin embargo, un barrido y salida rápida de las distintas especies, lo que se traduce en un resultado similar durante el lavado con o sin el higienizante introducido en el canal por los puertos de inyección.

Dado que el objetivo es realizar en continuo el lavado de frutas y verduras, desinfectando tanto el producto como el agua de lavado durante su recorrido por el tanque, las estrategias a considerar requieren configuraciones con velocidades de entrada del agua de lavado más reducidas en la entrada el canal. Si se deseara mantener las mismas velocidades de inyección, para no ralentizar los tiempos del proceso, por ejemplo, sería necesario modificar las direcciones de inyección de desinfectante.

4. Conclusiones y trabajo futuro

En este trabajo, se ha extendido el único modelo de lavado de frutas y verduras en un tanque con forma de canal que estudia la distribución espacial de la clorina libre, para incorporar la inactivación de patógenos por medio del higienizante. Cuando el flujo es turbulento, tal y como se aconseja en estudios teóricos para conseguir una concentración de higienizante homogénea en el tanque, los campos de velocidades se relacionan con los comportamientos dominantes en el sistema. No obstante, los resultados obtenidos en este trabajo a través de simulación numérica, demuestran que en este caso los tiempos necesarios para la inactivación son demasiado reducidos, por lo que la concentración de patógenos disminuye solo por un mero efecto de dilución. En otras palabras, la disminución de patógenos es similar si se introduce agua por los puertos de inyección en vez de clorina, a la que no se le da el tiempo necesario para que inactive los patógenos. De esta forma, este estudio se presenta como un argumento y punto de partida para la optimización de la configuración de operación en tanques de lavado, con especial interés en las velocidades óptimas del flujo de entrada y del desinfectante que permitan una correcta desinfección en el tanque. Adicionalmente, el modelo desarrollado en este trabajo permite también establecer valores mínimos de inactivación de patógenos como condición en el problema de optimización.

Por otro lado, este estudio se ha centrado en el análisis de la solución inestable del sistema explotando la simetría de la geometría, las condiciones de frontera y construyendo un mallado simétrico. No obstante, en trabajos futuro se estudiará también soluciones más estables y representativas de la realidad donde las soluciones son asimétricas, y cuya simulación se obtiene simplemente mediante la construcción de mallados asimétricos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo de las ayudas del CSIC 20213AT001 y 2022701193.

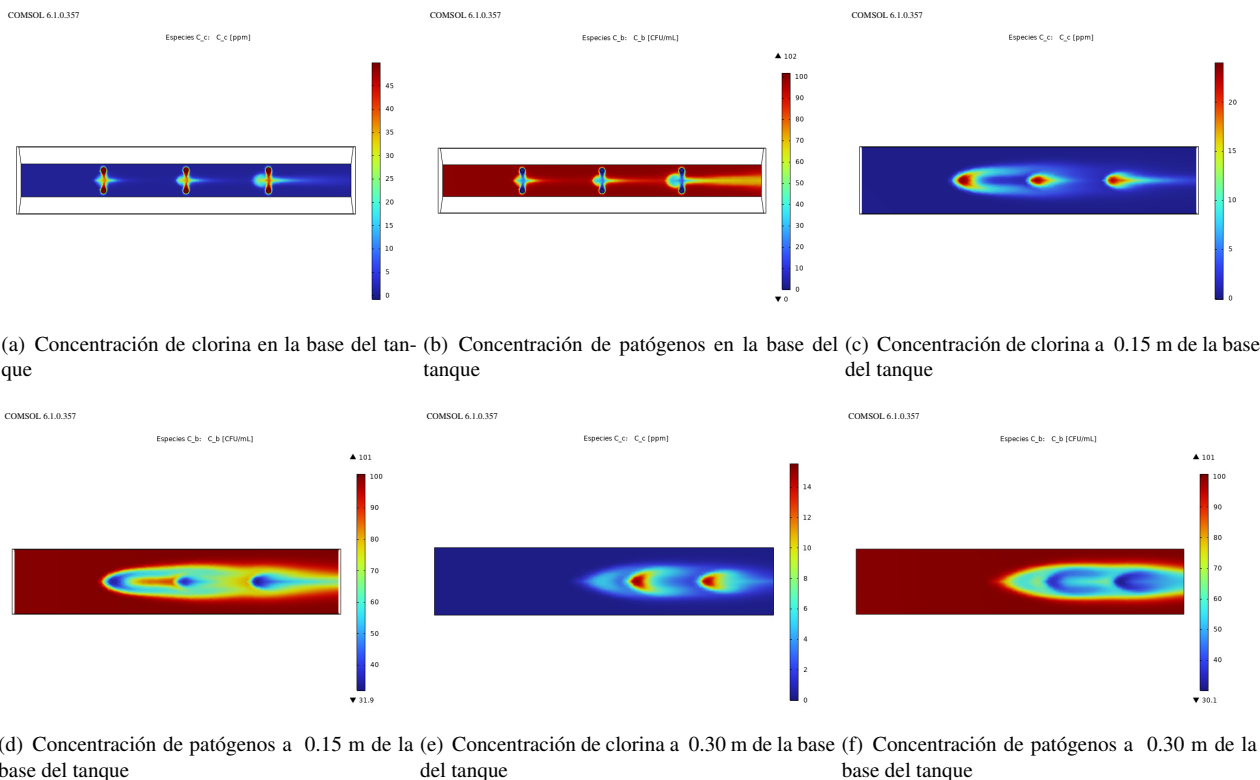


Figura 5: Distribución de clorina y patógenos en cortes longitudinales a distintas alturas del tanque

Referencias

- Abnavi, M.D., Kothapalli, C.R., Munther, D., Srinivasan, P., 2021. Chlorine inactivation of escherichia coli o157:h7 in fresh produce wash process: effectiveness and modeling. *International Journal of Food Microbiology* 356, 109364. doi:10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109364.
- Berg, H., Turner, L., 1990. Chemotaxis of bacteria in glass capillary arrays. *Escherichia coli, motility, microchannel plate, and light scattering*. *Biophysical Journal* 58, 919–930. doi:10.1016/S0006-3495(90)82436-X.
- Bianco, F., Chibbaro, S., Prud'homme, R., 2011. Study of an advection-reaction-diffusion equation in a compressible flow field.
- Clairambault, J., 2013. Reaction-Diffusion-Advection Equation, in: Dubitzky, W., Wolkenhauer, O., Cho, K.H., Yokota, H. (Eds.), *Encyclopedia of Systems Biology*. Springer, New York, NY, pp. 1817–1817. doi:10.1007/978-1-4419-9863-7_697.
- COMSOL Multiphysics v. 6.10, . COMSOL AB, Stockholm, Sweden. URL: www.comsol.com.
- Davidson, P.A., 2015. *Turbulence: An Introduction for Scientists and Engineers*. Oxford University Press.
- Falcó, I., Tudela, J.A., Hernández, N., Pérez-Cataluña, A., García, M.R., Truchado, P., Garrido, A., Allende, A., Sánchez, G., Gil, M.I., 2023. Antiviral capacity of sanitizers against infectious viruses in process water from the produce industry under batch and continuous conditions. *Food Control* 150, 109738.
- García-Ávila, F., Sánchez-Alvarracín, C., Cadme-Galabay, M., Conchado-Martínez, J., García-Mera, G., Zhindón-Arévalo, C., . Relationship between chlorine decay and temperature in the drinking water 7, 101002. doi:10.1016/j.mex.2020.101002.
- Gómez-López, V.M., Lannoo, A.S., Gil, M.I., Allende, A., 2014. Minimum free chlorine residual level required for the inactivation of escherichia coli o157:h7 and trihalomethane generation during dynamic washing of fresh-cut spinach. *Food Control* 42, 132–138. doi:10.1016/j.foodcont.2014.01.034.
- Heinzen M.I., . Wash Systems. URL: <https://www.heinzen.com/processing-solutions/washing>.
- Mokhtari, A., Oryang, D., Chen, Y., Pouillot, R., Van Doren, J., 2018. A Mathematical Model for Pathogen Cross-Contamination Dynamics during the Postharvest Processing of Leafy Greens. *Risk Analysis: An Official Publication of the Society for Risk Analysis* 38, 1718–1737. doi:10.1111/risa.12960.
- Munther, D., Luo, Y., Wu, J., Magpantay, F.M.G., Srinivasan, P., 2015. A mathematical model for pathogen cross-contamination dynamics during produce wash. *Food Microbiology* 51, 101–107. doi:10.1016/j.fm.2015.05.010.
- Tan, J., Yi, J., Yang, X., Lee, H., Nitin, N., Karwe, M., 2022. Distribution of chlorine sanitizer in a flume tank: Numerical predictions and experimental validation. *LWT* 155, 112888.
- Tanaka, K., 1978. Self-diffusion coefficients of water in pure water and in aqueous solutions of several electrolytes with 18O and 2H as tracers. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases* 74, 1879–1881. doi:10.1039/F19787401879. publisher: The Royal Society of Chemistry.
- Tang, A., Sandall, O.C., 1985. Diffusion coefficient of chlorine in water at 25-60.degree.C. *Journal of Chemical & Engineering Data* 30, 189–191. doi:10.1021/je00040a017.
- Tudela, J.A., López-Gálvez, F., Allende, A., Gil, M.I., 2019. Chlorination management in commercial fresh produce processing lines. *Food Control* 106, 106760. doi:10.1016/j.foodcont.2019.106760.
- Waters, B.W., Hung, Y.C., . The effect of organic loads on stability of various chlorine-based sanitisers 49, 867–875. doi:10.1111/ijjfs.12379.
- Yi, J., Leveau, J.H., Nitin, N., 2022. Role of multiscale leaf surface topography in antimicrobial efficacy of chlorine-based sanitizers. *Journal of Food Engineering* 332, 111118. doi:10.1016/j.jfoodeng.2022.111118.