

# Modelización integral del proceso de desinfección solar de agua: Descripción del viaje del fotón desde el sol hasta el patógeno y del sistema de reacciones mecánicas de inactivación

Ángela García-Gil, Javier Marugán

Departamento de Tecnología Química y Ambiental (ESCET), Universidad Rey Juan Carlos, C/ Tulipán s/n, 28933 Móstoles, Madrid- España.



**Para citaciones:** A. García-Gil y J. Marugán, "Modelización integral del proceso de desinfección solar de agua: Descripción del viaje del fotón desde el sol hasta el patógeno y del sistema de reacciones mecánicas de inactivación", *Ing-NOVA*, vol. 1, no. 2, pp. 227-234. Jul. 2022.

<https://doi.org/10.32997/rin-2022-4007>

**Recibido:** 22 de junio de 2022

**Revisado:** 8 de julio de 2022

**Aprobado:** 10 de julio de 2022

**Autor de correspondencia:**

Javier Marugán

[javier.marugan@urjc.es](mailto:javier.marugan@urjc.es)

**Editor:** Miguel Ángel Mueses. Universidad de Cartagena-Colombia.

**Copyright:** © 2022. García Gil, A., & Marugán, J. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> la cual permite el uso sin restricciones, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre y cuando que el original, el autor y la fuente sean acreditados.

## RESUMEN

La falta de agua potable en regiones de bajos recursos sigue siendo un desafío hoy en día. Existen tratamientos de agua alternativos que son aptos para ejecutarlos de forma doméstica. Sin embargo, estos procesos siguen teniendo limitaciones que, al fin y al cabo, repercuten en la eficacia del proceso. La desinfección solar de agua o proceso SODIS es uno de estos tratamientos de agua domésticos, cuyo procedimiento estandarizado peca por ser ineficaz en la inactivación de virus y protozoos (al utilizar botellas de PET que corta la transmisión de radiación UVB), tener alto riesgo de recontaminación (al tener que utilizar numerosas botellas de tan solo 2 L) y por ser ineficiente en la producción de agua potable (al recomendar como mínimo 6 horas de exposición solar cuando en muchos casos este tiempo está sobreestimado). El desarrollo de modelos cinéticos que consideren de forma íntegra y rigurosa la influencia de todas las variables que intervienen en el proceso es esencial para optimizar los tiempos de exposición solar y maximizar la producción de agua potable. Este trabajo propone una metodología para la modelización integral del proceso de desinfección de agua teniendo en cuenta el transporte de la radiación desde el sol hasta el patógeno (y su atenuación por la atmósfera, el material del recipiente y la composición del agua) y de las reacciones mecánicas de inactivación de diferentes patógenos (virus, protozoos y bacterias). Además, esta modelización contempla la ejecución del proceso SODIS en recipientes de alta capacidad, así como el empleo de materiales más adecuados para la fabricación de los recipientes SODIS.

**Palabras clave:** Modelado; SODIS; Transporte de radiación; Reacciones mecánicas; Inactivación.



# Comprehensive modeling of the solar water disinfection process: Description of the photon journey from the sun to the pathogen and the mechanistic inactivation reaction system

## ABSTRACT

The lack of safe drinking water in low-income regions remains a challenge today. Alternative water treatments are available that are suitable for domestic use. However, these processes still have limitations that ultimately have an impact on the efficiency of the process. Solar water disinfection or SODIS process is one of these household water treatments, whose standardised procedure is ineffective in inactivating viruses and protozoa (by using PET bottles that cut the transmission of UVB radiation), has a high risk of recontamination (by having to use numerous bottles of only 2 L) and is inefficient in the production of safe drinking water (by recommending a minimum of 6 hours of solar exposure when in many cases this time is overestimated). The development of comprehensive kinetic models that rigorously consider the influence of all the variables involved in the process is essential to optimise solar exposure times and maximise safe drinking water production. This work proposes a methodology for the integral modelling of the water disinfection process, taking into account the transport of radiation from the sun to the pathogen (and its attenuation by the atmosphere, the material of the container and the composition of the water) and the mechanistic reactions of inactivation of different pathogens (viruses, protozoa and bacteria). In addition, this modelling envisages the execution of the SODIS process in large-volume containers, as well as the use of more suitable materials for the manufacture of SODIS containers.

**Keywords:** Modelling; SODIS; Radiation transport; Mechanistic Reactions; Inactivation.

---

## 1. Introducción

Actualmente, más de 800 millones de personas carecen de acceso a agua potable [1]. La mayoría de estas personas viven en países de bajos ingresos donde los recursos financieros y tecnológicos son limitados. En este contexto, la falta de suministro de agua potable centralizado proveniente de plantas de tratamiento se cubre con procesos a nivel doméstico. Estos tratamientos, que suelen denominarse tratamientos domésticos de agua, se caracterizan por ser de bajo coste, fáciles de usar y sostenibles [2]. Algunos ejemplos son la cloración, la filtración, el hervido y la desinfección solar del agua. Este último, también llamado proceso SODIS, se ha revelado como uno de los tratamientos más adecuados para producir agua potable a nivel doméstico, ya que es barato, no depende de consumibles y su eficacia de eliminación de patógenos (virus, bacterias y protozoos) del agua ha sido ampliamente demostrada [3,4]. Este proceso se basa en el efecto germicida de la luz UV y su efecto sinérgico con el aumento de la temperatura del agua. El procedimiento es muy sencillo, basta con llenar un recipiente transparente con agua y colocarlo a la luz del sol durante varias horas. El procedimiento globalmente aceptado [5] establece que se deben exponer botellas de polietilentereftalato (PET) de 2 litros durante 6 h en días soleados o 48 h en días nublados. Sin embargo, este método estándar tiene limitaciones que podrían solventarse cambiando alguna característica del procedimiento: el aumento del volumen del recipiente disminuiría el riesgo de recontaminación causado por la manipulación de botellas de 2 litros y también maximizaría la producción de agua potable; el uso de materiales plásticos para la fabricación de recipientes distintos del PET aumentaría significativamente la eficacia de la inactivación de virus y protozoos; y un estudio detallado de los factores que influyen en el proceso reduciría la sobreestimación del tiempo de exposición solar [3]. Por lo tanto, el desarrollo de precisos modelos cinéticos es crucial para garantizar, e incluso, maximizar la producción de agua potable. Un modelo

cinético ideal debería tener en cuenta todos los factores críticos que afectan a la eficacia del proceso, como la intensidad y la distribución espectral de la radiación solar, los espectros de transmisión de las paredes del recipiente —y el envejecimiento del material del recipiente SODIS—, o bien fabricado con PET, o bien con materiales alternativos, la composición química del agua —ya que las sustancias presentes en el agua pueden desempeñar un papel crítico como atenuadores de la radiación y/o sensibilizadores que desencadenen procesos de inactivación— y el tipo y la concentración de patógenos en el agua no tratada (virus, protozoos o bacterias). En este trabajo, se presenta el desarrollo de una metodología para el modelado cinético del proceso que permita estimar con precisión el tiempo de exposición solar necesario en recipientes SODIS de alta capacidad.

## 2. Metodología para la modelización del proceso SODIS

La metodología se dividió en las siguientes partes, cada una relacionada con uno de los factores críticos que intervienen en el proceso SODIS (anteriormente comentados):

- ▶ Radiación solar: desarrollo de un algoritmo para obtener fácilmente la dosis solar diaria real en cualquier punto del mundo.
- ▶ Recipiente: desarrollo de una herramienta de cálculo para estimar la irradiancia espectral en el interior de los recipientes SODIS para los materiales más adecuados.
- ▶ Composición del agua: desarrollo de un procedimiento para calcular la radiación incidente efectiva en los recipientes SODIS de gran volumen en función de las concentraciones de sustancias naturales encontradas en aguas reales
- ▶ Modelos cinéticos de inactivación: desarrollo de tres modelos cinéticos mecánicos, uno para cada grupo de patógenos (virus, protozoos y bacteria), que describan las principales reacciones de inactivación de los diferentes tipos de microorganismos durante el proceso SODIS.

## 3. Modelización cinética

### 3.1 Radiación solar

El algoritmo para estimar fácilmente la dosis solar diaria real en cualquier punto del mundo fue obtenido del trabajo desarrollado por García-Gil et al. (2022) [6]. Para calcular la dosis diaria en función del día del año y de la latitud, este algoritmo tiene en cuenta: i) la duración del día ( $\tau_{DL}$ ) y la irradiancia del sol al mediodía solar ( $p_{sn}^o(\lambda)$ ), las cuales solo dependen de la latitud y del día del año; ii) un primer factor corrector ( $F_1$ ) que relaciona la radiación incidente acumulada con la dosis diaria si la irradiancia del sol corresponde a la del mediodía solar y es constante durante la duración de todo el día; y iii) un segundo factor corrector ( $F_2$ ) que relaciona la radiación real y la máxima acumulada incidente:

$$G_{day}(\lambda) = F_2 \cdot F_1 \cdot p_{sn}^o(\lambda) \cdot \tau_{DL} \quad (1)$$

Para  $F_2 = 1$  (dosis máxima teórica),  $F_1$  se estimó en un valor de 0,43 a 307,5 nm y a una latitud de 45°N y fue validado para las latitudes comprendidas entre 60°S a 60°N, con un paso de 5°. Como el valor de  $F_2$  depende de las condiciones meteorológicas, se recomienda encarecidamente medir la radiación real sobre el terreno

para determinar F2. Sin embargo, si no se dispone de mediciones reales, es posible encontrar una aproximación razonable en García-Gil et al. (2022) [6]. Por ejemplo, el valor estimado de  $F2 = 0,58$  para  $52^{\circ}\text{N}$ ,  $5^{\circ}\text{E}$ , redujo el error entre las predicciones y las mediciones reales del 121% al 25,5%. Este algoritmo es preciso y capaz de responder a diferentes espectros solares. Sin embargo, su máxima fortaleza es que está basado en una simple ecuación que puede ser implementada en cualquier modelo cinético, a diferencia de los softwares disponibles que resultan ser una caja negra y su uso debe hacerse independientemente. Por otro lado, la simplicidad del procedimiento también conlleva algunas limitaciones, como la pérdida de precisión para los tratamientos que duran menos de medio día y para lugares con una meteorología muy variada, y el uso restringido en latitudes fuera de la franja de  $60^{\circ}\text{S}$  y  $60^{\circ}\text{N}$ .

### 3.2 Recipiente

La herramienta para calcular el espectro de radiación en el interior de los envases SODIS se denomina Solar UV Calculator y puede ser descargada de forma gratuita en García-Gil et al. (2020) [7]. Esta herramienta se basa en la Ley de Lambert-Beer y en la medición de los espectros de absorción de materiales plásticos apropiados para procesos SODIS previamente seleccionados. Esta selección se realizó, en primer lugar, teniendo en cuenta datos bibliográficos de costes de producción, propiedades mecánicas y fotoestabilidad, y mediciones experimentales de propiedades ópticas. Inicialmente, se descartaron el poliestireno (PS), el cloruro de polivinilo (PVC) y el polietileno (PE) como materiales adecuados para la fabricación de envases SODIS debido a su escasa fotoestabilidad. Sin embargo, aunque el polipropileno (PP) también presenta baja fotoestabilidad, sí se eligió por su bajo coste, su transmisión de la radiación en el rango UVB y la posibilidad de añadir un estabilizador UV. También se seleccionó el policarbonato (PC) y el polimetilmetacrilato (PMMA) por su alta fotoestabilidad y sus buenas propiedades ópticas. Finalmente, a pesar de su opacidad en el rango UVB, también se eligió el PET para comparar el plástico estándar de fabricación de recipientes SODIS con otros plásticos alternativos más adecuados. Por lo tanto, la herramienta Solar UV Calculator ofrece espectros de radiación por defecto para el PMMA, el PET, el PC y el PP, aunque también es posible añadir cualquier otro material potencial si se conoce su espectro de absorción. Por otro lado, no solo las propiedades iniciales de los plásticos son importantes, sino que también su evolución con la exposición solar o su exposición a la intemperie, con el fin de analizar su durabilidad (relacionado con la evolución de las propiedades mecánicas) y su eficacia de desinfección (relacionado con la evolución de las propiedades ópticas). En García-Gil et al. (2022) [8] se llevó a cabo un estudio exhaustivo del efecto de la exposición a la intemperie en las propiedades de los plásticos utilizados en procesos SODIS actualmente implantados en campo (PET, PMMA, PP y PP con 1% en peso de estabilizador UV) y se determinó que el PP con un 1% de estabilizador UV y el PMMA tienen las mejores propiedades ópticas y tasas de desinfección a pesar del envejecimiento, sin signos de degradación significativa después de 9 meses para el PP+1% y, al menos, 1 año para el PMMA. Dado que el PP+1% es un plástico con un buen balance entre su elasticidad y resistencia al impacto, se recomienda su uso para recipientes SODIS portátiles, mientras que el PMMA se recomienda para dispositivos SODIS estáticos por su alta rigidez, resistencia al impacto y facilidad para ser rayado.

### 3.3 Composición del agua

El procedimiento descrito por García-Gil et al. (2020) [9] fue seleccionado para calcular de forma sencilla la radiación efectiva disponible en el interior de los recipientes SODIS de gran volumen en función de la concentración de sustancias naturales del agua, tales como (bi)carbonatos, carbohidratos solubles, hierro,

ácidos húmicos y sólidos medidos como turbidez. Por un lado, no es necesario considerar la presencia de sustancias transparentes en el rango UV (bicarbonatos y carbohidratos solubles), ya que no tuvieron ningún impacto en la tasa de desinfección. Por otro lado, la presencia de sustancias ópticamente activas (hierro, ácidos húmicos o sólidos) sí tuvieron un efecto ya que actúan como atenuadores de la radiación. Este efecto puede ser considerado con la siguiente ecuación:

$$k = k_0 \cdot G \cdot UI \quad (2)$$

donde la cinética del proceso (aquí  $k$ : constante cinética de primer orden) se ve influenciada no solo por el valor medio de la radiación incidente ( $G$ ) sino que también por la homogeneidad en la distribución de la radiación ( $UI$ , índice de uniformidad), siendo  $k_0$  un factor cinético proporcional (constante e independiente de la radiación).

Los valores de  $G$  y  $UI$  en función de la composición del agua pueden ser obtenidos en García-Gil et al. (2020) [9]. El efecto ocasionado en recipientes de alta capacidad difiere en función de sus propiedades ópticas absorción o dispersión de la luz). Las sustancias absorbentes (hierro y ácidos húmicos) producen una disminución progresiva de la radiación incidente a medida que la radiación avanza a lo largo del recipiente. En cambio, las partículas dispersantes (sólidos) conducen a perfiles significativamente más pronunciados con valores mucho más altos de la radiación incidente cerca de la parte frontal, lo que da lugar a un  $UI$  más bajo para la misma  $G$ . Sin embargo, esta ecuación no puede aplicarse para el hierro, que además de actuar como un atenuador de radiación en recipientes de alta capacidad, también desempeña un papel como potenciador del daño bacteriano, probablemente debido a su posible permeabilidad dentro de la célula y a su contribución en el proceso Fenton intracelular [10,11].

### 3.4 Modelos cinéticos

Para la estimación de tiempos precisos de inactivación, se utilizaron modelos cinéticos mecánicos que estudiaron cada uno de los mecanismos que tienen lugar durante el proceso SODIS (térmico, fotónico y sinérgico UV-T) por separado, para así proponer esquemas cinéticos apropiados para la inactivación de cada tipo de microorganismo.

#### 3.4.1 Virus

El modelo cinético utilizado para la estimación del tiempo de inactivación en virus fue obtenido de García-Gil et al. (2020) [12] que utilizó el virus MS2, indicador generalmente usado en procesos de fotoinactivación por su elevada resistencia. Para la modelización del efecto térmico, este modelo no utilizó ningún mecanismo ya que los virus MS2 no mostraron ningún efecto térmico en condiciones de oscuridad en el rango de temperaturas del agua que se alcanza habitualmente durante el proceso SODIS (20-50°C). Por otro lado, los datos experimentales de la inactivación del virus en condiciones de iluminación a bajas temperaturas mostraron una dependencia lineal que fue modelada con éxito con un modelo cinético de primer orden. En cambio, los virus sí mostraron sensibilidad al efecto sinérgico UV-T (reducción de 3 logs en 60-90 min), el cual se modeló aplicando una ecuación de Arrhenius modificada a la constante cinética de la reacción fotónica. Además, este modelo también incluye la dependencia espectral en la reacción fotónica añadiendo la función de ponderación biológica del ARN a su constante cinética. De hecho, la incorporación de la acción

espectral fue validada con datos experimentales, donde se modificó el espectro de emisión de radiación colocando plásticos de PET, PP y PMMA entre el agua y la fuente solar. Estos resultados confirmaron que la inactivación observada experimentalmente para el PET es despreciable, resultado muy significativo teniendo en cuenta que es el material más utilizado para los procesos SODIS, mientras que el PMMA y el PP proporcionaron las tasas de desinfección más altas.

### 3.4.2 Protozoos

El modelo cinético utilizado para la estimación del tiempo de inactivación en protozoos fue obtenido de García-Gil et al. (2020) [13] que utilizó el protozoo *Cryptosporidium parvum*, indicador generalmente de contaminación fecal por protozoos. En este caso, este modelo sí utilizó ecuaciones cinéticas para describir el efecto térmico observado experimentalmente. Los protozoos mostraron una inactivación por efecto térmico por encima de los 30°C (modelado con la ecuación de Arrhenius), siendo este proceso especialmente significativo por encima de los 40°C, (se consigue una reducción de 3 logs en 17 h a 44°C y en aproximadamente 1 h a 50°C). Las curvas experimentales de desinfección en condiciones de iluminación a bajas temperaturas mostraron un hombro inicial que se modeló con éxito con un modelo de eventos en serie. Además, los protozoos también mostraron sensibilidad al efecto sinérgico UV-T (reducción de 3 logs en 2-3 h), que se modeló aplicando una ecuación de Arrhenius a la constante cinética de la reacción fotónica. También se incluyó la dependencia espectral en la reacción fotónica, mediante la incorporación de la función de ponderación biológica del ADN a su constante cinética. En este caso, la incorporación de la acción espectral también fue validada con experimentos donde se modificó el espectro de emisión de radiación colocando plásticos de PET, PP y PMMA entre el agua y la fuente solar. Estos resultados confirmaron que la inactivación observada experimentalmente para el PET a temperaturas inferiores a 40°C es casi inexistente. Por lo tanto, el hecho de que en los envases de PET no se inactiven los virus y que la inactivación térmica sea casi la única posibilidad de inactivar protozoos, evidencia la necesidad de buscar materiales alternativos para fabricar recipientes SODIS, entre ellos el PMMA y el PP con estabilizador UV.

### 3.4.3 Bacterias

El modelo cinético utilizado para la estimación del tiempo de inactivación de bacterias en oscuridad fue obtenido de García-Gil et al. (2022) [14] y en condiciones de radiación en García-Gil et al. (2022) [15] para la bacteria *Escherichia coli*, indicador referente de contaminación fecal bacteriana. El segundo trabajo es la continuación del primero, por lo que el modelo cinético en condiciones de iluminación tiene en cuenta todos los mecanismos descritos en condiciones de oscuridad. Como las bacterias son organismos más complejos, por ejemplo, realizan la respiración celular para vivir, es necesario tener en cuenta procesos intracelulares que serán alterados durante el proceso SODIS. Para ello, este sistema modela las rutas de la respiración celular y el efecto del daño de los radicales en las células bacterianas (condiciones de oscuridad). Para este último efecto, se utilizó un modelo de eventos en serie con una constante de recuperación, y así reproducir con precisión este sistema. Las bacterias también mostraron una inactivación por efecto térmico en condiciones de oscuridad por encima de 30°C, el cual se modeló con la ecuación de Arrhenius. Por último, los efectos fotónicos se incluyeron en los mecanismos (desactivación/activación de enzimas/coenzimas, proceso foto-Fenton intracelular y daño directo). El daño directo se modeló con otro modelo de eventos en serie con recuperación que se acopló con el del daño de los radicales mediante un modelo de múltiples golpes y múltiples objetivos. Además, las bacterias mostraron una suave sensibilidad a la sinergia UV-T y se

modeló mediante la incorporación de la ecuación de Arrhenius a la constante cinética del daño directo fotónico. Debido a la complejidad del sistema cinético, este modelo no contempla la acción espectral, pero fue seleccionado debido a su rigurosidad y precisión. De hecho, no existen todavía modelos cinéticos mecánicos de inactivación bacteriana que contemplen la acción espectral.

#### 4. Conclusiones

Este trabajo presenta el desarrollado de un modelo cinético completo que estima el tiempo de exposición solar necesario en recipientes de alta capacidad sometidos al proceso SODIS. Este modelo tiene en cuenta el transporte de la radiación espectral desde el sol hasta los patógenos (incluyendo la atenuación causada por la atmósfera, las paredes de los recipientes y las sustancias naturales disueltas en el agua) y las reacciones químicas mecánicas que se producen durante la inactivación térmica y/o solar de virus, protozoos y bacterias. La complejidad de los microorganismos obliga a adoptar suposiciones para obtener modelos cinéticos mecánicos plausibles. Sin embargo, a pesar de sus limitaciones, estos modelos ofrecen un marco incomparable para futuros desarrollos y mejoras, pudiendo contemplar nuevas reacciones, procesos y patógenos.

#### Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea en el marco del proyecto PANIWATER (GA 820718), financiado conjuntamente por la Comisión Europea y el Departamento de Ciencia y Tecnología de la India.

#### Referencias

- [1] United Nations (UN), Sustainable Development Goal 6. Synthesis Report on Water and Sanitation 2018, 2018.
- [2] K.G. McGuigan, R.M. Conroy, H.-J. Mosler, M. du Preez, E. Ubomba-Jaswa, P. Fernandez-Ibañez, Solar water disinfection (SODIS): A review from bench-top to roof-top, *J. Hazard. Mater.* 235 (2012) 29–46. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.07.053>.
- [3] Á. García-Gil, R.A. García-Muñoz, K.G. McGuigan, J. Marugán, Solar Water Disinfection to produce safe drinking water: A review of parameters, enhancements, and modelling approaches to make SODIS faster and safer, *Molecules*. 26 (2021) 3431. <https://doi.org/10.3390/molecules26113431>.
- [4] T. Clasen, L. Haller, D. Walker, J. Bartram, S. Cairncross, Cost-effectiveness of water quality interventions for preventing diarrhoeal disease in developing countries, *J. Water Health*. 5 (2007) 599–608. <https://doi.org/10.2166/wh.2007.010>.
- [5] S. Luzi, M. Tobler, F. Suter, R. Meierhofer, SODIS manual: Guidance on solar water disinfection, EAWAG, Switzerland, 2016.
- [6] Á. García-Gil, J. Marugán, D. Vione, A model to predict the kinetics of direct (endogenous) virus inactivation by sunlight at different latitudes and seasons, based on the equivalent monochromatic wavelength approach, *Water Res.* 208 (2022) 117837. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117837>.
- [7] Á. García-Gil, C. Pablos, R.A. García-Muñoz, K.G. McGuigan, J. Marugán, Material selection and prediction of solar

- irradiance in plastic devices for application of solar water disinfection (SODIS) to inactivate viruses, bacteria and protozoa, *Sci. Total Environ.* 730 (2020) 139126. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139126>.
- [8] Á. García-Gil, M.D. Molina, R.A. García-Muñoz, R. Marasini, L. Buck, K.G. McGuigan, J. Marugán, Weathering of plastic SODIS containers and the impact of ageing on their lifetime and disinfection efficacy, *Chem. Eng. J.* 435 (2022) 134881. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.134881>.
- [9] Á. García-Gil, R. Valverde, R.A. García-Muñoz, K.G. McGuigan, J. Marugán, Solar Water Disinfection in high-volume containers: Are naturally occurring substances attenuating factors of radiation?, *Chem. Eng. J.* 339 (2020) 125852. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125852>.
- [10] M. Kohantorabi, S. Giannakis, M.R. Gholami, L. Feng, C. Pulgarin, A systematic investigation on the bactericidal transient species generated by photo-sensitization of natural organic matter (NOM) during solar and photo-Fenton disinfection of surface waters, *Appl. Catal. B Environ.* 244 (2019) 983–995. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.12.012>.
- [11] E. Rommozzi, S. Giannakis, R. Giovannetti, D. Vione, C. Pulgarin, Detrimental vs. beneficial influence of ions during solar (SODIS) and photo-Fenton disinfection of *E. coli* in water: (Bi)carbonate, chloride, nitrate and nitrite effects, *Appl. Catal. B Environ.* 270 (2020) 118877. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2020.118877>.
- [12] Á. García-Gil, A. Martínez, M.I. Polo-López, J. Marugán, Kinetic modeling of the synergistic thermal and spectral actions on the inactivation of viruses in water by sunlight, *Water Res.* 183 (2020) 116074. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116074>.
- [13] Á. García-Gil, M.J. Abeledo-Lameiro, H. Gómez-Couso, J. Marugán, Kinetic modeling of the synergistic thermal and spectral actions on the inactivation of *Cryptosporidium parvum* in water by sunlight, *Water Res.* 185 (2020) 116226. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116226>.
- [14] Á. García-Gil, L. Feng, J. Moreno-SanSegundo, S. Giannakis, C. Pulgarín, J. Marugán, Mechanistic kinetic modeling of the SODIS inactivation of *Escherichia coli* enhanced with hydrogen peroxide – Part 1: The dark side of peroxide, *Chem. Eng. J.* 439 (2022) 135709. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.135709>.
- [15] Á. García-Gil, L. Feng, J. Moreno-SanSegundo, S. Giannakis, C. Pulgarín, J. Marugán, Mechanistic kinetic modeling of the SODIS inactivation of *Escherichia coli* enhanced with hydrogen peroxide – Part 2: Shine on you, crazy peroxide, *Chem. Eng. J.* 439 (2022) 135783. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.135783>.