



# Tratamientos con pulsos de luz de alta intensidad:

## sus aplicaciones en la industria de los alimentos

---

D. González-Albarrán\*, E. Palou-García y A. López-Malo

\*Programa de Doctorado en Ciencia de Alimentos  
Correo electrónico: [david.gonzalezan@udlap.mx](mailto:david.gonzalezan@udlap.mx) • [aurelio.lopezm@udlap.mx](mailto:aurelio.lopezm@udlap.mx)

## RESUMEN

Los pulsos de luz de alta intensidad (PLAI) son una tecnología emergente para la inactivación de microorganismos patógenos y causantes del deterioro de los alimentos. Esta tecnología surge a raíz de la demanda de los consumidores por productos con mayor valor nutricional, con una «etiqueta limpia» (al eliminar aditivos) y, en general, lo más similar posible a un producto fresco. Los tratamientos con PLAI se basan en la aplicación de pulsos de luz de amplio espectro (que incluye longitudes de onda desde el infrarrojo hasta el ultravioleta), de alta energía y corta duración.

En este artículo de revisión, se tratan los aspectos fundamentales para la comprensión de los tratamientos con PLAI, con el objetivo de facilitar el diseño y estudio de procesos utilizando esta tecnología. Se presentan sus distintas aplicaciones en la industria de alimentos y se explora la viabilidad de incorporarlos a las líneas de producción.

**Palabras clave:** luz pulsada, tecnologías emergentes, tecnologías no térmicas, desinfección de alimentos.

## ABSTRACT

High intensity light pulses (HILP) are an emerging technology for the inactivation of pathogenic and spoilage microorganisms in food. This technology arises from consumer demand for products with better nutritional value, “clean label” (by eliminating food additives), and, in general, with sensory and nutritional characteristics as close as possible to those of a fresh product. Treatments with HILP are based in the application of short duration, high energy, broad-spectrum light on food. This broad-spectrum light includes wavelengths from infrared to ultraviolet.

This review paper will deal with the fundamental aspects for the comprehension of treatments with HILP with the objective to make the design and study of processes using them more accessible. Their applications in the food industry will be presented and the viability of incorporating them into manufacturing lines will be analyzed.

**Keywords:** pulsed light, emerging technologies, non-thermal technologies, food safety.

## INTRODUCCIÓN

Los pulsos de luz de alta intensidad (PLAI) son una tecnología no-térmica emergente para el control de microorganismos en alimentos. La tecnología se fundamenta en la inactivación microbiana utilizando luz pulsada de amplio espectro, mediante la cual se dañan estructuras y procesos vitales de los microorganismos deterioradores y patógenos presentes en el alimento con muy poco daño a sus características sensoriales y nutritivas. El efecto microbicida de los PLAI se deriva de los efectos foto-térmicos y fotoquímicos sobre las células y sus componentes, y requiere que el espectro de la luz pulsada contenga un componente importante de luz ultravioleta (UV). Entre los microorganismos contra los que se ha demostrado la efectividad de los PLAI se encuentran bacterias como *Listeria innocua*, *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli*, *Bacillus cereus* y *Salmonella enteritidis* (Agüero, Jagus, Martín-Belloso y Soliva-Fortuny, 2016; Anderson, Rowan, MacGregor, Fouracre y Farish, 2000; Can, Demirici, Puri y Gourama, 2014), mohos como *Aspergillus niger*, *Fusarium culmorum* y *Penicillium roqueforti* (Anderson *et al.*, 2000; Can *et al.*, 2014; Chaine, Levy, Lacour, Riedel y Carlin, 2012) y levaduras como *Saccharmyces cerevisiae* (Chaine *et al.*, 2012; Aguil.-Aguayo, Charles, Renard, Page y Carlin, 2013).

Esta tecnología (de manera similar a otras tecnologías emergentes) surge dada la demanda de los consumidores por alimentos «menos procesados», lo cual se ha interpretado como productos que se encuentren en el estado más cercano posible al alimento fresco cuando son comprados o consumidos por las personas. La tecnología comenzó a desarrollarse comercialmente en los años noventa del siglo pasado (Chen, Lung, Yang y Wang, 2015; Elmnasser *et al.*, 2007), pero sus aplicaciones aún son limitadas. En general, los fabricantes de sistemas de luz pulsada recomiendan utilizar la tecnología para la esterilización de empaques alimenticios y esta es la principal aplicación comercial de los PLAI en la actualidad. A pesar de esto, se han explorado otras opciones para su utilización, como su aplicación en alimentos líquidos como bebidas, agua potable, leche y jugos de frutas. Sus aplicaciones en alimentos sólidos son aún inciertas, aunque algunos estudios han explorado su uso en quesos, carnes, nueces, semillas y especias. El principal reto para la aplicación de la luz pulsada en esta clase de alimentos es que la desinfección se li-

mita a la superficie del producto. En productos cuya superficie es irregular, las irregularidades producen un efecto de «sombra», el cual protege a los microorganismos de la luz desinfectante. En ese sentido, los tratamientos con luz pulsada se comportan de manera similar a otros métodos de desinfección que sólo actúan sobre la superficie de los alimentos, como la desinfección con soluciones microbicidas.

En este contexto, el propósito de esta revisión es explorar los fundamentos tecnológicos de los tratamientos por PLAI, así como presentar sus actuales aplicaciones industriales, sus aplicaciones emergentes y perspectivas de sus aplicaciones futuras. Se explorarán también parámetros operacionales de los tratamientos y consideraciones para el diseño de estos, así como los posibles efectos no deseados sobre las características nutricionales, químicas y organolépticas de los alimentos. Finalmente, se evaluará el potencial de la tecnología como una alternativa para el tratamiento térmico u otros métodos de inactivación microbiana.

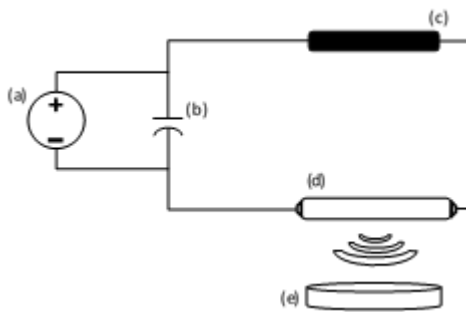
## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 1. Fundamentos de los pulsos de luz de alta intensidad

La investigación sobre el uso de pulsos luminosos de alta intensidad (PLAI), también llamados simplemente *luz pulsada* (LP), *luz blanca pulsada* o *luz pulsada de amplio espectro de alta intensidad* para la desinfección de alimentos comenzó en la década de los setenta en Japón, con la primera patente apareciendo en el año de 1984. Los derechos de dicha patente fueron comprados por la empresa PurePulse Technologies®, lo cual derivó en el primer sistema comercial para desinfección de fármacos, equipo médico, material de empaque y agua, denominado PureBright®. Sin embargo, no fue sino hasta los años noventa, cuando el proceso fue aprobado por la FDA para su uso en alimentos, que el desarrollo de aplicaciones en la industria alimentaria comenzó a acelerarse (Gómez-López, Ragaert, Debevere y Devlieghere, 2007; Heinrich, Zunabovic, Varzakas, Bergmair y Kneifel, 2016; Oms-Oliu, Martín-Belloso y Soliva-Fortuny, 2010).

En la figura 1 se puede apreciar un esquema generalizado de un sistema PLAI. El principal componente de estos sistemas

de desinfección es una lámpara de luz de amplio espectro y con alta intensidad luminosa (figura 1, d). Estas lámparas generalmente contienen xenón dentro de una cámara de cuarzo, al cual se le suministran pulsos de energía eléctrica de corta duración, pero alta energía, generando pulsos de luz con un espectro entre los 180 y los 1,100 nm de longitud de onda, el cual incluye luz en el espectro ultravioleta (UV-C, UV-A y UV-B), visible e infrarrojo (Elmnasser *et al.*, 2007). El sistema genera los pulsos de luz por medio de la combinación de un condensador (figura 1, b) y un inductor (figura 1, c). El condensador almacena energía eléctrica y posteriormente la libera de manera súbita (en solo unos pocos nanosegundos) hacia la lámpara, la cual produce en ese momento el pulso luminoso (Elmnasser *et al.*, 2007; Oms-Oliu *et al.*, 2010). El inductor permite configurar algunas características de los pulsos de luz, como su amplitud y el espectro de la luz producida (Abida, Rayees y Masoodi, 2014; Elmnasser *et al.*, 2007).



**Figura 1.**

Diagrama simplificado de un sistema de tratamiento con PLAI. (a) Fuente de energía de alto voltaje de corriente directa (DC), (b) condensador, (c) inductor, (d) lámpara, (e) objeto a desinfectar.

Para el tratamiento del material de empaque y alimentos se han desarrollado sistemas de desinfección tanto por lotes (*batch*) como continuos. Los sistemas por lotes por lo general consisten en una cámara en donde se puede colocar el alimento o material de empaque para que incida la luz sobre este. La cámara puede estar hecha de cristal o de acero inoxidable. Las primeras son más comúnmente utilizadas para fines de investigación, mientras que las segundas son más efectivas para la desinfección de alimentos, ya que el acero inoxidable actúa como material reflejante, permitiendo que

la luz incida sobre el alimento o material de empaque desde múltiples ángulos y no sólo desde la lámpara misma.

Los sistemas continuos por lo general logran la desinfección de materiales sólidos por medio de bandas transportadoras que permiten la incidencia de luz sobre el material. También se pueden fabricar sistemas para la desinfección de fluidos, en los que el alimento líquido fluye a través de una tubería dentro de la que se coloca la lámpara de luz pulsada. El alimento fluye alrededor de la lámpara a una velocidad determinada dependiendo de la dosis necesaria para la desinfección.

Recientemente se han comenzado a explorar algunas alternativas para la desinfección de polvos y granos por medio de sistemas PLAI. Algunos autores han experimentado con sistemas generadores de vórtices neumáticos para mejorar la efectividad en el tratamiento de polvos y semillas, sin embargo, se han encontrado con algunos contratiempos (Hwang, Cheigh y Chung, 2017, 2018). Más adelante se discutirán estos contratiempos con mayor detalle, junto con las clases de consideraciones que se deben hacer al diseñar un sistema de tratamiento con PLAI.

## 2. Modo de acción para la inactivación microbiana

La acción antimicrobiana de los PLAI se debe principalmente al componente ultravioleta (UV) de los pulsos luminosos. En estudios realizados por algunos autores, se logró comprobar que, si se bloquea el componente UV de la lámpara por medio de filtros, la actividad antimicrobiana se reduce significativamente. Por ejemplo, Anderson y colaboradores (2000) lograron una inactivación de 6 ciclos logarítmicos sobre *E. coli* O157:H7 por medio de PLAI. Sin embargo, utilizando lámparas modificadas para bloquear la luz UV, lograron una inactivación de tan sólo 1 ciclo logarítmico sobre la misma bacteria. Takeshita y colaboradores (2003) también mencionan que el uso de filtros para bloquear el espectro UV reduce o elimina por completo la capacidad microbicida de los PLAI.

La inactivación microbiana por medio de los PLAI actúa de manera similar a la inactivación por medio de luz UV. De acuerdo con Wuytack y colaboradores (2003), los tratamientos antimicrobianos se pueden clasificar de acuerdo con la forma en la que producen lesiones subletales en los microorganismos. Dichos autores proponen las siguientes tres clasificaciones:

1. El tratamiento daña una única estructura vital del microorganismo sin la cual no puede subsistir. En estos casos, si el tratamiento no es suficiente para matar al microorganismo, este tampoco presentará lesiones subletales, por lo que los autores los denominan tratamientos de «todo o nada». Como ejemplos de esta clase de tratamientos, los autores proponen los campos eléctricos pulsados y los tratamientos por homogeneización a alta presión.
2. El tratamiento daña una estructura vital del microorganismo, pero este cuenta con copias redundantes de dicha estructura. En estos casos, el microorganismo solo morirá si se logran destruir todas las copias de esta estructura mediante el tratamiento, de lo contrario presentará una lesión subletal.
3. El tratamiento daña múltiples estructuras vitales del microorganismo, algunas redundantes y otras únicas. En estos casos, el microorganismo morirá si se logra destruir la estructura única o todas las copias de la estructura redundante. La mayoría de los tratamientos antimicrobianos convencionales, como el tratamiento térmico y el tratamiento por alta presión, caen dentro de esta categoría.

Con base en estas clasificaciones, los autores consideran que los tratamientos con PLAI deberían clasificarse en la tercera categoría. Esto concuerda con estudios en los que se han evaluado los efectos de los PLAI sobre los microorganismos. Aguirre y colaboradores (2015) observaron que el tratamiento aplicado a *Bacillus cereus* con PLAI provoca la extensión de la fase lag y disminuye la velocidad máxima de crecimiento de las bacterias sobrevivientes al tratamiento, lo cual se debe a que los microorganismos deben reparar el daño a sus ácidos nucleicos antes de comenzar a reproducirse, al mismo tiempo que sugiere que el daño al ADN de los microorganismos se transmite a través de las generaciones. También se ha encon-

trado que los tratamientos con PLAI provocan la inducción de genes de respuesta al estrés en *Lysteria monocytogenes*, los cuales también son inducidos por factores de estrés como infección por bacteriófagos, calor, estrés osmótico y presencia de etanol en altas concentraciones (Uesugi, Hsu, Worobo y Moraru, 2016). Por otro lado, Takeshita y colaboradores (2003) encontraron que los PLAI provocan la expulsión de material citoplásmico en las células de *Saccharomyces cerevisiae*, lo cual se debe a un sobrecalentamiento del interior de la célula provocado por el efecto fototérmico de los componentes visibles e infrarrojos de los PLAI (Elmnasser *et al.*, 2007). Wekhof, Trompeter y Franken (2001) observaron un efecto similar en esporas de *Aspergillus niger* tratadas con PLAI, las cuales pudieron alcanzar temperaturas internas de hasta 120 °C, suficientes para que se observara, mediante microscopía electrónica, la fusión del medio de cultivo alrededor de las esporas destruidas. Estos efectos no siempre están presentes; por ejemplo, Levy, Aubert, Lacour y Carlin (2012) no observaron diferencias entre las estructuras de las esporas de *B. subtilis* y *A. niger* antes y después de los tratamientos con PLAI.

El hecho de que los PLAI sean capaces de dañar múltiples estructuras en los microorganismos los vuelve adecuados para desinfectar alimentos contaminados con una gran variedad de bacterias, mohos, levaduras y virus. En la tabla I se presenta una recopilación de distintos estudios en los que se ha evaluado la efectividad de los PLAI sobre distintos microorganismos.

En diversos estudios se ha observado que los PLAI son efectivos para destruir bacterias, levaduras, mohos y virus, sin embargo, la efectividad de los tratamientos es afectada por la clase de microorganismo presente en la superficie. En algunos estudios se ha reportado que los mohos son más resistentes a los tratamientos con PLAI que levaduras y bacterias (Anderson *et al.*, 2000; Chaine *et al.*, 2012). En el caso de *A. niger*, por ejemplo, se cree que la mayor resistencia se debe a la presencia de pigmentos melanoideos capaces de absorber las longitudes de onda más

dañinas para el ADN (Anderson *et al.*, 2000). Por otro lado, se cree que las bacterias también presentan diferencias en su susceptibilidad. Por ejemplo, las bacterias gramnegativas (como *S. enterica* y *E. coli*) parecen ser más susceptibles a los tratamientos con PLAI que las grampositivas, posiblemente debido a las diferencias en la estructura de sus paredes celulares (Ramos-Villaroel, Aron-Maftei, Martín-Belloso y Soliva-Fortuny, 2012). Estas diferencias en la resistencia no resultan evidentes cuando se comparan los diversos estudios que han tratado con distintos microorganismos, como se

puede apreciar en la tabla I. Es posible que las diferencias en la resistencia entre mohos, levaduras y bacterias se deban más a las condiciones de proceso, el tamaño del inóculo y el tipo de medio (o alimento), que a la resistencia intrínseca de los diferentes microorganismos (Ramos-Villaroel *et al.*, 2012). A pesar de esta controversia, es necesario considerar el tipo y cantidad de microorganismos que se encuentran comúnmente en el alimento a tratar cuando se está diseñando un tratamiento con PLAI, como se discutirá más adelante.

**Tabla I.** Estudios sobre la efectividad de tratamientos con PLAI en distintos microorganismos

Microorganismo	Carga microbiana inicial (log UFC/g o log UFC/mL)	Sustrato	Fluencia* (J/cm <sup>2</sup> )	Inactivación máxima (log UFC/mL o log UFC/g)	Referencia
<b>Bacterias</b>					
<i>Alicyclobacillus acidoterrestris</i> ATCC 49025T	5 a 6	Jarabe de sacarosa (65 y 67 °Bx)	1.86	3	Chaine <i>et al.</i> , 2012
<i>Bacillus cereus</i> CECT 131/ATCC 10876	10	Agar nutritivo fortificado	2.1	6	Aguirre <i>et al.</i> , 2015
NTCC 11145	10	Agar soya triptona suplementado con extracto de levadura	-	6 a 8	Anderson <i>et al.</i> , 2000
<i>Bacillus subtilis</i> DSM 402	5 a 6	Jarabe de sacarosa (65 y 67 °Bx)	1.86	>4	Chaine <i>et al.</i> , 2012
	6 a 9	Agar Luria Bertani y medio inerte	1.25	5	Levy <i>et al.</i> , 2012
<i>Escherichia coli</i> LRF 1.107	7	Espinaca ( <i>Spinacia oleracea</i> L. cv. Polka) (Lleida, España)	12	2.3	Agüero <i>et al.</i> , 2016
	6	Jitomate ( <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill. cv. Daniela)	8	>1	Valdivia-Nájar <i>et al.</i> , 2017

**Tabla I.** Estudios sobre la efectividad de tratamientos con PLAI en distintos microorganismos (continuación)

Microorganismo	Carga microbiana inicial (log UFC/g o log UFC/mL)	Sustrato	Fluencia* (J/cm <sup>2</sup> )	Inactivación máxima (log UFC/mL o log UFC/g)	Referencia
<i>Escherichia coli</i> LRF 1.107	9.47	Agar bilis rojo violeta, agua destilada	0.0157	6.7	Luo <i>et al.</i> , 2014
	8	Aguacate ( <i>Presea americana</i> Mil var. Hass)	12	3.33	Ramos-Villaruel, Martín-Belloso y Soliva-Fortuny, 2011
ATCC 25922	5 a 7	Queso Cheddar (Nueva York, EE. UU.), queso blanco americano (Illinois, EE. UU.)	<12	>3	Proulx <i>et al.</i> , 2015
	7	Leche en polvo reconstituida (9.8 % s.s.), leche descremada, leche parcialmente descremada (2 % de grasa), leche entera	8.41, 14.85, 14.85, 14.85	2.05, 3.36, 2.89, 2.94	Miller, Sauer y Moraru, 2012
ATCC 11229	6 a 7.5	Discos de manzana ( <i>Malus pumila</i> var. Granny Smith)	221.1	2.25	Gómez <i>et al.</i> , 2012
DH5 $\alpha$	7	Leche de cabra (Olmúe, Chile)	10	6	Kasahara, Carrasco y Aguilar, 2015
<i>E. coli</i> O157:H7 NTCC 12079	10	Agar soya triptona suplementado con extracto de levadura	-	6	Anderson <i>et al.</i> , 2000
CECT 4972	3 <sup>b</sup>	Carpacho de res (Madrid, España)	11.9	1.2	Hierro <i>et al.</i> , 2012
	8	Fresa, mora azul	5.9	1.5, 5.4	Huang <i>et al.</i> , 2017
LFMFP 463	7.5	Cuchillos de cocina	3	4.62	Rajkovic <i>et al.</i> , 2010
932, 994, E0018, H1730, F4546, MDD 333	4 a 5	Semillas de alfalfa	504	4.80	Sharma y Demirci, 2003
<i>E. coli</i> K12 MDD 333	8	Huevo cocido	19.4	4.78 <sup>a</sup>	Macias-Rodriguez <i>et al.</i> , 2014
<i>Geobacillus stearothermophilus</i> CIP 6623T	5 a 6	Jarabe de sacarosa (65 y 67 °Bx)	1.86	>4	Chaine <i>et al.</i> , 2012
<i>Listeria innocua</i> LRF 1.117	7	Espinaca ( <i>Spinacia oleracea</i> L. cv. Polka) (Lleida, España)	12	2.6	Agüero <i>et al.</i> , 2016
NTC 11288	4 a 5 <sup>b</sup>	Queso gouda, queso manchego	0.9	3, <1	Fernández <i>et al.</i> , 2016
CECT 4030	4 a 5 <sup>b</sup>	Queso gouda, queso manchego	0.9	3, <1	Fernández <i>et al.</i> , 2016

**Tabla I.** Estudios sobre la efectividad de tratamientos con PLAI en distintos microorganismos (continuación)

Microorganismo	Carga microbiana inicial (log UFC/g o log UFC/mL)	Sustrato	Fluencia* (J/cm <sup>2</sup> )	Inactivación máxima (log UFC/mL o log UFC/g)	Referencia
CLIP 11262	6	Jitomate ( <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill. cv. Daniela)	8	<1	Valdivia-Nájar <i>et al.</i> , 2017
FSL C2-008	5 a 7	Queso cheddar (Nueva York, EE. UU.), queso blanco americano (Illinois, EE. UU.)	12	3	Proulx <i>et al.</i> , 2015
	9	Material de empaque	8	7.2	Ringus y Moraru, 2013
ATCC 33090	6 a 7.5	Discos de manzana ( <i>Malus pumila</i> var. Granny Smith)	119.4	1.7	Gómez <i>et al.</i> , 2012
LRF 1.17	8	Aguacate ( <i>Presea americana</i> Mill var. Hass)	12	2.97	Ramos-Villaruel, Martín-Belloso y Soliva-Fortuny, 2011
<i>Listeria monocytogenes</i> ATCC 43256	8	Queso blanco americano (Pensilvania, EE. UU.)	152	3.08	Can <i>et al.</i> , 2014
KCCM 40307	4	Lenguado ( <i>Paralichthys olivaceus</i> ), salmón ( <i>Salmo salar</i> ), camarón ( <i>Litopenaeus vannamei</i> ) (Busan, Corea)	12.1	1.9, 2.1, 2.4	Cheigh, Hwang y Chung, 2013
CECT 4032, CECT 746, Scott A	4 a 5 <sup>b</sup>	Salchichón, lomo curado (Madrid, España)	11.9	1.81, 1.48	Ganan <i>et al.</i> , 2013
Scott A	7 <sup>b</sup>	Jamón cocido, boloña (Madrid, España)	8.4	1.78, 1.11	Hierro <i>et al.</i> , 2011
	3 <sup>b</sup>	Carpacho de atún, carpacho de res (Madrid, España)	11.9	0.7, 0.8	Hierro <i>et al.</i> , 2012
LMG 23905	7.5	Cuchillos de cocina	3	4.57	Rajkovic <i>et al.</i> , 2010
<i>Pseudomonas fluorescens</i> 1150	5 a 7	Queso cheddar (Nueva York, EE. UU.), queso blanco americano (Illinois, EE. UU.)	<12	>3	Proulx <i>et al.</i> , 2015
<i>Salmonella</i> spp.	9.01	Agar bismuto sulfito, agua destilada	0.01547	6.45	Luo <i>et al.</i> , 2014
<i>Salmonella enterica</i> serovar Thyphimurium CECT 7159, CECT 4371, CECT 443	4 a 5 <sup>b</sup>	Salchichón, lomo curado (Madrid, España)	11.9	1.48, 1.73	Ganan <i>et al.</i> , 2013

**Tabla I.** Estudios sobre la efectividad de tratamientos con PLA1 en distintos microorganismos (continuación)

Microorganismo	Carga microbiana inicial (log UFC/g o log UFC/mL)	Sustrato	Fluencia* (J/cm <sup>2</sup> )	Inactivación máxima (log UFC/mL o log UFC/g)	Referencia
<i>Salmonella enterica</i> serovar Thyphimurium CECT 7159, CECT 4371, CECT 443	3 <sup>b</sup>	Carpacho de res (Madrid, España)	11.9	1	Hierro <i>et al.</i> , 2012
<i>S. enterica</i> serovar Enteritidis NCTC 4444	10	Agar soya triptona suplementado con extracto de levadura	-	6 a 8	Anderson <i>et al.</i> , 2000
ATCC 13076	4.5, 6 <sup>c</sup>	Huevos, huevos lavados (Madrid, España)	12	2.49, 1.85	Hierro <i>et al.</i> , 2009
<i>S. enterica</i> serotipo Newport H1275	8	Fresa, mora azul	5.9	2.1 a 4.2	Huang <i>et al.</i> , 2017
<i>S. enterica</i> subespecie <i>enterica</i> DSMZ 9898	5 a 6	Tallarines de huevo (Udine, Italia)	0.7	2.5	Manzocco <i>et al.</i> , 2014
<i>Vibrio parahaemolyticus</i> CECT 511T	3 <sup>b</sup>	Carpacho de atún	11.9	0.8	Hierro <i>et al.</i> , 2012
<b>Levaduras</b>					
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	5	Epidermis de jitomate ( <i>Lycopersicon esculentum</i> L. var Climberly) (Entressens, Francia)	4	0.9	Aguiló-Aguayo <i>et al.</i> , 2013
	5 a 6	Jarabe de sacarosa (65 y 67 °Bx)	1.23	5.4	Chaine <i>et al.</i> , 2012
CBS 1171	8.4	Medio inerte	16.92	<1	Fine y Gervais, 2004
IFO 2347	7	Solución amortiguadora de fosfato de potasio 0.067 M	3.5	7	Takeshita <i>et al.</i> , 2003
KE 162	6 a 7.5	Discos de manzana ( <i>Malus pumila</i> var. Granny Smith)	221.1	N/d	Gómez <i>et al.</i> , 2012
<b>Mohos</b>					
<i>Aspergillus niger</i> IMI 11414	9	Agar extracto de malta	-	3 a 4.5	Anderson <i>et al.</i> , 2000
ATCC 9642	4	Jarabe de sacarosa (65 y 67 °Bx)	1.2	1.3	Chaine <i>et al.</i> , 2012
FRC A-409	5	Harina de maíz (Maryland, EE. UU.)	-	4	Jun <i>et al.</i> , 2003
DSM 1988	6 a 9	Agar extracto de malta, medio inerte	1.25	5	Levy <i>et al.</i> , 2012
ATCC 16404	3	Material de empaque	0.977	<2	Turtoi y Nicolau, 2007

**Tabla I.** Estudios sobre la efectividad de tratamientos con PLAI en distintos microorganismos (continuación)

Microorganismo	Carga microbiana inicial (log UFC/g o log UFC/mL)	Sustrato	Fluencia* (J/cm <sup>2</sup> )	Inactivación máxima (log UFC/mL o log UFC/g)	Referencia
<i>A. niger</i> var. <i>cinnamomeus</i> ATCC 1027	3	Material de empaque	0.977	2	Turtoi y Nicolau, 2007
<i>Aspergillus repens</i> ATCC 44409	3	Material de empaque	0.977	<2	Turtoi y Nicolau, 2007
<i>Botrytis cinerea</i> MUCL 18864	5 a 6	Agar rosa de bengala	-	4	Marquenie <i>et al.</i> , 2003
<i>Cladosporium herbarum</i> ATCC 28987	3	Material de empaque	0.977	2.7	Turtoi y Nicolau, 2007
<i>Fusarium culmorum</i> IMI 113133	9	Agar extracto de malta	-	3 a 4.5	Anderson <i>et al.</i> , 2000
<i>Monilinia fructigena</i> CBS 101499	5 a 6	Agar extracto de malta	-	3	Marquenie <i>et al.</i> , 2003
<i>Penicillium roqueforti</i> ATCC 10110	7	Queso blanco americano (Pensilvania, EE. UU.)	152	1.32	Can <i>et al.</i> , 2014
<b>Virus</b>					
Adenovirus del grupo D	6 <sup>d</sup>	Solución salina con amortiguador de fosfato	0.23	4 <sup>d</sup>	Lamont <i>et al.</i> , 2007
Norovirus murino (MNV-1). Línea celular de macrófago murino RAW 264.7	8.7 <sup>e</sup>	Fresa, mora azul	5.9	0.9 <sup>e</sup>	Huang <i>et al.</i> , 2017
Poliovirus 1a	6 <sup>d</sup>	Solución salina con amortiguador de fosfato	0.03	6 <sup>d</sup>	Lamont <i>et al.</i> , 2007
Virus de Tulane (MNV-1). Línea celular de riñón de mono LLC-MK2	6.7 <sup>e</sup>	Solución salina con amortiguador de fosfato	4.94	>6 <sup>e</sup>	Huang <i>et al.</i> , 2017
<b>Microflora nativa</b>					
-	4 a 5	Ajonjolí ( <i>Sesamum indicum</i> L.) (Seúl, Corea del Sur)	37.85	0.99	Hwang, Cheigh y Chung, 2017
Bacterias nativas	-	Mijo glutinoso, semillas de casia ( <i>Cinnamomum cassia</i> ) (China)	54.43	0.66, 0.74	Hwang, Cheigh y Chung, 2018
	-	Jitomate ( <i>Lycopersicon esculentum</i> L. var <i>Climberly</i> ) (Entressens, Francia)	4	0.9	Aguiló-Aguayo <i>et al.</i> , 2013

**Tabla 1.** Estudios sobre la efectividad de tratamientos con PLAI en distintos microorganismos (continuación)

Microorganismo	Carga microbiana inicial (log UFC/g o log UFC/mL)	Sustrato	Fluencia* (J/cm <sup>2</sup> )	Inactivación máxima (log UFC/mL o log UFC/g)	Referencia
Bacterias nativas	89 <sup>f</sup>	Manzana ( <i>Malus pumila</i> var Granny Smith)	71.6	0.8	Gomez <i>et al.</i> , 2012
Mohos nativos	-	Fresa ( <i>Fragaria x Ananassa</i> Duch., cv. Camarosa)	47.8	42 % <sup>g</sup>	Duarte-Molina <i>et al.</i> , 2016
	147 <sup>f</sup>	Manzana ( <i>Malus pumila</i> var Granny Smith)	71.6	1	Gomez <i>et al.</i> 2012
Mohos y levaduras nativos	5.34	<i>Triticum aestivum</i> L. var Dropla (Rumania), <i>T. aestivum</i> L. var Vulgare (España)	51.2	3.81	Aron Maftai <i>et al.</i> , 2014

\* La fluencia reportada en esta tabla es la correspondiente a la inactivación máxima alcanzada en el estudio en cuestión.

<sup>a</sup> Expresado como el logaritmo del número más probable (log NMP) por mL.

<sup>b</sup> Expresado como el logaritmo de las unidades formadoras de colonia (log UFC) por cm<sup>2</sup>.

<sup>c</sup> Expresado como el logaritmo de las unidades formadoras de colonia (log UFC) por unidad.

<sup>d</sup> Expresado como el logaritmo de las unidades de cultivo de tejido infeccioso (log UCTI) por mL.

<sup>e</sup> Expresado como el logaritmo de las unidades formadoras de placa (log UFP) por mL.

<sup>f</sup> Expresado como unidades formadoras de colonia (UFC) por cm<sup>2</sup>.

<sup>g</sup> Expresado como la disminución en el porcentaje de incidencia de mohos superficiales tras 8 días de almacenamiento.

### 3. Consideraciones para el desarrollo de procesos con PLAI

Como cualquier tecnología para el tratamiento de alimentos, los PLAI tienen tanto ventajas como desventajas y condiciones en las que son más o menos efectivos. Es necesario tomar en consideración varios factores cuando se está diseñando un proceso, pues la efectividad de éste puede variar de acuerdo con el tipo de alimento con el que se está trabajando, la configuración del sistema de luz pulsada y la clase y cantidad de microorganismos que se espera encontrar. Se debe tomar en cuenta también que,

aun cuando los PLAI tienen efectos relativamente leves sobre el alimento, estos pueden ser lo suficientemente prominentes como para causar defectos de calidad.

Los principales parámetros para caracterizar un tratamiento de luz pulsada son la fluencia (J/cm<sup>2</sup>), también llamada «dosis», que se refiere a la energía recibida por la muestra de la lámpara por unidad de área, el tiempo de exposición, la amplitud del pulso, es decir, el intervalo de tiempo en el que la muestra recibe energía luminosa, la cantidad de pulsos por segundo (Hz) y la potencia máxima (W), la cual se refiere a la energía de cada

pulso dividida entre su duración. La fluencia varía en función de la distancia entre la fuente de luz y la superficie (cm), por lo que es posible ajustarla de esta manera, si no se puede cambiar la potencia suministrada a la lámpara. La determinación de la dosis luminosa es un parámetro que generalmente se obtiene de manera experimental por medio de mediciones, ya que la dosis que recibe el alimento generalmente es diferente de la intensidad luminosa obtenida directamente de la lámpara (Caminiti *et al.*, 2011a; Gómez-López *et al.*, 2007). Los principales parámetros que determinan la inactivación de microorganismos son la dosis o fluencia por pulso, el número de pulsos y la fluencia total (Artíguez y Martínez de Marañón, 2014; Cheigh, Hwang y Chung, 2013; Lasagabaster y Martínez de Marañón, 2013). Se han desarrollado modelos para la predicción de la inactivación microbiana en función de la fluencia ( $\text{J}/\text{cm}^2$ ).

Una ecuación que se puede utilizar para predecir la efectividad de los tratamientos con PLAI es la desarrollada por Agüero y colaboradores (2016) con base en el modelo de Weibull, el cual, de acuerdo con los autores, se ha utilizado previamente para modelar la inactivación de microorganismos por medio de tecnologías no térmicas. El modelo desarrollado por estos autores se presenta en la ecuación 1:

$$\log(N) = \log(N_0) - \left(\frac{F}{\delta}\right)^\rho$$

#### Ecuación 1.

Donde  $N$  es el conteo de microorganismos sobrevivientes después del tratamiento,  $N_0$  es el conteo inicial de microorganismos en el alimento,  $F$  es la fluencia ( $\text{J}/\text{cm}^2$ ) aplicada en el tratamiento,  $\delta$  ( $\text{J}/\text{cm}^2$ ) es un parámetro de escala que representa la fluencia necesaria para lograr una reducción logarítmica de los microorganismos y  $\rho$  es un parámetro de forma adimensional que representa la concavidad o convexidad de la curva.

Dos modelos adicionales han sido propuestos por Ferrairo, Alzamora y Guerrero (2013), los cuales toman en consideración la existencia de una subpoblación de microorganismos menos

vulnerables al tratamiento con PLAI (ecuaciones 2 y 3). Estos modelos pueden tener mejor o peor ajuste con los datos experimentales dependiendo de la clase de sistema y microorganismo que se está estudiando, por lo que es recomendable seleccionar el que tenga el mejor ajuste para la aplicación en particular. El primer modelo propuesto se define como:

$$\log(N) = \log(N_0) + \log(f \cdot e^{-k_{max_1} \cdot t} + (1 - f) \cdot e^{-k_{max_2} \cdot t})$$

#### Ecuación 2.

Donde  $f$  es la fracción de la población inicial que corresponde a la subpoblación con menor resistencia al tratamiento,  $(1 - f)$  es la fracción de la población inicial que corresponde a la subpoblación con mayor resistencia al tratamiento,  $k_{max_1}$  y  $k_{max_2}$  son las velocidades de inactivación correspondientes a cada una de las subpoblaciones, respectivamente, y  $t$  es el tiempo de tratamiento. El segundo modelo propuesto se presenta en la ecuación 3:

$$\log(N) = \log(N_0) + \frac{1}{1+10^\alpha} \left[ 10^{-\left(\frac{t}{\theta_1}\right)^{\rho+\alpha}} + 10^{-\left(\frac{t}{\theta_2}\right)^\rho} \right]$$

#### Ecuación 3.

Donde  $\rho$  es un parámetro de forma,  $\alpha$  es la proporción logarítmica entre la población menos resistente  $f$  y la población más resistente  $(1 - f)$  y  $\theta_1$  y  $\theta_2$  representan los tiempos necesarios para la primera reducción logarítmica de cada subpoblación, respectivamente.

Algunos autores han propuesto el uso de un parámetro análogo al valor  $D$  en tratamientos térmicos, el cual se define como el incremento en la temperatura necesario para lograr una reducción logarítmica del microorganismo. En el caso de tratamientos con PLAI, esta variable podría definirse como  $D_{pl}$  y describirse como el incremento en fluencia ( $\text{J}/\text{cm}^2$ ) necesario para obtener una reducción logarítmica del microorganismos.

mo en cuestión (Aguirre *et al.*, 2015; Turtoi y Nicolau, 2007). El uso de esta variable, o de otros términos similares, es escaso en la literatura, pero podría funcionar como una forma de estandarizar los tratamientos con PLAI. Una posible razón por la cual no se ha aceptado el uso de una variable como esta es por la amplia variación en la efectividad de los tratamientos, inclusive aplicados al mismo microorganismo, en función del tipo de alimento que se está tratando. Además, en muchas situaciones no ha sido posible alcanzar una reducción logarítmica cuando se han aplicado PLAI en sistemas distintos a los llamados sistemas modelo (ver la tabla I).

La primera consideración que se debe hacer al diseñar un proceso con PLAI es que el efecto desinfectante de la luz pulsada solo puede actuar sobre la superficie de un alimento. En casos en los que se aplica en alimentos líquidos, debe considerarse que el efecto desinfectante disminuye con el grosor de la capa del alimento que la luz debe atravesar (Artíguez, Lasagabaster y Martínez de Marañón, 2011), aunque, al igual que con tratamientos térmicos, se podría considerar la generación de turbulencia al interior del tubo como una solución para la desinfección homogénea del alimento. Se ha comprobado que, en leche en polvo reconstituida a diferentes concentraciones de sólidos solubles y leche comercial con diferentes contenidos grasos, los tratamientos en un sistema turbulento son significativamente ( $p < 0.05$ ) más efectivos que los tratamientos en un sistema estacionario (Miller, Sauer y Moraru, 2012). Chaine y colaboradores (2012) definieron la luz transmitida al fluido en función del área de la sección transversal del tubo mediante la ecuación 4:

$$F_T = \frac{Q_e}{A}$$

#### Ecuación 4.

Donde  $F_T$  ( $J/cm^2$ ) es la fluencia transmitida a un punto en particular del fluido,  $Q_e$  (J) es la energía luminosa emitida por la lámpara y  $A$  ( $cm^2$ ) es el área de la sección transversal del tubo en donde se quiere calcular la fluencia.

Otra consideración que se debe hacer al diseñar un proceso con PLAI es la clase de alimento que se intenta desinfectar. Como se puede ver en la tabla I, los tratamientos con PLAI tienden a ser más efectivos cuando se aplican sobre superficies uniformes (como los medios de cultivo o superficies inertes) o sobre líquidos transparentes o translúcidos (como soluciones de sacarosa o soluciones amortiguadoras) que cuando se aplican sobre superficies irregulares o fluidos turbios (Hwang, Cheigh y Chung, 2015; Sauer y Moraru, 2009). Por ejemplo, Luo, Chen, Chen, Dong y Hou (2014) lograron una inactivación de *E. coli* en agar bilis rojo violeta de 6.7 ciclos logarítmicos con una fluencia de tan solo  $0.0157 J/cm^2$ , mientras que Agüero y colaboradores (2016) lograron una inactivación sobre la misma bacteria de tan solo 2.3 ciclos logarítmicos con una fluencia de  $12 J/cm^2$  cuando aplicaron el tratamiento con PLAI sobre la superficie de espinacas. Hierro, Ganan, Barroso y Fernández (2012) encontraron resultados similares al aplicar PLAI sobre carpacho de salmón y res, con una inactivación máxima para *E. coli* O157:H7 de tan sólo 1.2 ciclos logarítmicos a una fluencia de  $11.9 J/cm^2$ . Otro ejemplo de este efecto se puede ver en el estudio realizado por Fernández, Hospital, Arias y Hierro (2016), en el que los autores lograron una inactivación contra *L. innocua* de hasta 3 ciclos logarítmicos con  $0.9 J/cm^2$  de fluencia al aplicar PLAI sobre la superficie de queso gouda, sin embargo, no lograron más de un ciclo logarítmico cuando aplicaron PLAI con la misma fluencia sobre queso manchego. Esto se debió a que la superficie del queso gouda es lisa, mientras que la del queso manchego es rugosa. Un resultado similar fue encontrado por Huang, Ye, Cao y Chen (2017), quienes lograron una inactivación de *Salmonella enterica* de 4.2 ciclos logarítmicos en mora azul, pero tan solo 2.1 ciclos logarítmicos en fresa debido a la superficie rugosa de esta última. Como se puede ver por estos últimos ejemplos, el hecho de que los PLAI sean menos efectivos sobre superficies rugosas no necesariamente significa que no se puedan aplicar sobre alimentos sólidos.

Otra consideración que se debe hacer al implementar tratamientos con PLAI es el número inicial de microorganismos en el alimento. Resulta evidente que si se utilizan los tratamientos con PLAI para desinfectar alimentos cuya carga microbiana

inicial es baja, es posible eliminar los microorganismos objetivo en su totalidad, mientras que si la carga microbiana inicial es alta, resulta muy probable que existan sobrevivientes (Aron Maftai, Ramos-Villaroel, Nicolau, Martín-Belloso y Soliva-Fortuny, 2014). En algunos estudios en los que se ha evaluado el efecto del tamaño de inóculo inicial se ha observado que si bien la reducción aumenta conforme aumenta el tamaño del inóculo, el conteo final de microorganismos se mantiene constante sin importar el tamaño del inóculo inicial. Se cree que esto se debe a que solo los microorganismos que son expuestos directamente a la luz mueren, mientras que un número de microorganismos sobrevive debido a que los microorganismos más superficiales bloquean la luz (Oms-Oliu *et al.*, 2010; Woodling y Moraru, 2007). Esto es de particular importancia en la desinfección de alimentos sólidos. Como se ha mencionado anteriormente, en el caso de los alimentos líquidos, la turbidez del medio afecta la efectividad del tratamiento con PLAI; sin embargo, no existen aún estudios en los que se reporte el efecto que pudiera llegar a tener la turbidez generada por el contenido microbiano de un alimento líquido y si esta tiene siquiera efectos relevantes sobre la efectividad de los tratamientos con PLAI.

Adicionalmente, existen algunos pretratamientos que pueden interferir con la efectividad de los PLAI. Gómez y colaboradores (2012) encontraron que la aplicación de un pretratamiento con ácido ascórbico al alimento (manzanas en rebanadas) disminuyó la efectividad del posterior tratamiento con PLAI debido al efecto antioxidante del ácido ascórbico. Es importante recordar que el daño al ADN de los microorganismos causado por el componente ultravioleta de los PLAI se debe también a la creación de especies reactivas de oxígeno, como el peróxido de hidrógeno y el ozono.

Las reducciones en el contenido microbiano encontradas por los diversos estudios con PLAI son similares o mayores a las logradas con otros tratamientos que actúan en la superficie de los alimentos, como las soluciones desinfectantes (DeVere y Purchase, 2007; Gonzalez, Luo, Ruiz-Cruz y Mc.Evoy, 2004; Gulati, Allwood, Hedberg y Goyal, 2001). Los PLAI tienen la ventaja añadida de no contaminar la superficie del alimento con sustancias como el hipoclorito de sodio, que pueden impartir

sabores y/o aromas desagradables al alimento, además de que se pueden aplicar directamente en alimentos líquidos, a diferencia de las soluciones desinfectantes.

Finalmente, al diseñar tratamientos con PLAI se debe considerar que los PLAI pueden tener ciertos efectos perjudiciales sobre la calidad del alimento. Este es uno de los campos en los que se está desarrollando la mayor cantidad de investigación en materia de PLAI en años recientes, por lo que se discutirá con mayor detalle a continuación.

### 3.1. Efectos de los PLAI sobre los alimentos

A pesar de tratarse de un tratamiento relativamente leve, se ha encontrado en múltiples estudios que los PLAI pueden tener algunos efectos perjudiciales sobre la calidad de los alimentos. Al igual que los efectos antimicrobianos de los PLAI, los efectos negativos sobre los alimentos se deben principalmente al componente UV de la luz pulsada. Esta radiación provoca principalmente cambios de color en los alimentos, y estos cambios son más pronunciados en alimentos con colores oscuros (Oms-Oliu *et al.*, 2010).

#### 3.1.1. Efectos sobre las cualidades sensoriales de los alimentos

En general, los efectos sobre las cualidades sensoriales de los alimentos tratados con PLAI son menores, comparados con procesos más tradicionales como los tratamientos térmicos. Ganan, Hierro, Hospital, Barroso y Fernández (2013) encontraron que los tratamientos con PLAI que aplicaron sobre salchichón y lomo curado de cerdo provocaron cambios en su color, aroma y sabor en las dos fluencias más altas que estudiaron (8.4 y 11.9 J/cm<sup>2</sup>). Estas diferencias se tradujeron en una ligera decoloración de los embutidos y en una calificación más negativa en sabor y aroma por un panel sensorial. Estos autores encontraron que, tanto instrumentalmente como por medio de paneles de jueces, estas diferencias sólo eran apreciables inmediatamente después del tratamiento con PLAI. Tras 15 días de almacenamiento, no se encontró una diferencia significativa ( $p > 0.05$ ) entre los embutidos que fueron tratados con PLAI y aquellos que no lo fueron.

Decoloraciones como las observadas por Ganan y colaboradores (2013) son reportadas, de manera similar, por otros estudios. Hierro y colaboradores (2012) encontraron que al aplicar tratamientos con fluencias menores a  $8.4 \text{ J/cm}^2$  no se provoca la pérdida de color apreciable en carpacho de res. Sin embargo, al utilizar una fluencia de  $11.9 \text{ J/cm}^2$ , un panel sensorial fue capaz de detectar una ligera decoloración. Por otro lado, se encontró también que fluencias de  $8.4 \text{ J/cm}^2$  o mayores provocaron cambios negativos en el aroma y sabor de este mismo producto, aunque el carpacho aún fue considerado aceptable por el panel sensorial a pesar de dichos cambios. En el mismo estudio se evaluó también carpacho de atún, el cual resultó más sensible al daño por PLAI, mostrando decoloración en tratamientos mayores a  $4.2 \text{ J/cm}^2$  y desarrollando sabores y aromas «sulfurosos» en tratamientos desde los  $8.4 \text{ J/cm}^2$ . En otros estudios también se han observado cambios en el color de los alimentos tras el tratamiento con PLAI. Can y colaboradores (2014) encontraron que los tratamientos con PLAI provocaron algunos cambios en el color de quesos, Agüero y colaboradores (2016) lo encontraron en espinaca, Wambura y Verghese (2011) en jamón en rebanadas, Hierro y colaboradores (2011) en productos cárnicos curados y Manzocco y colaboradores (2014) en tallarines de huevo. Los cambios en color reportados por los estudios siguen el mismo patrón de decoloración encontrado por Ganan *et al.* (2013) y Hierro *et al.* (2012).

En contraste, otros autores han reportado que los tratamientos con PLAI no afectan de manera significativa al color de los alimentos tratados. Aguiló-Aguayo y colaboradores (2013) no encontraron diferencias entre el color de jitomates tratados con PLAI y jitomates sin tratamiento; Hwang y colaboradores (2018) encontraron que los tratamientos con PLAI solo tuvieron un efecto menor sobre el color de semillas de casia y mijo; Cheigh y colaboradores (2013) no encontraron cambios de color en pescado y camarones tratados con PLAI y, finalmente, Macías-Rodríguez y colaboradores (2014) no encontraron diferencia significativa ( $p > 0.05$ ) en el color de huevo cocido tratado con PLAI y huevo sin tratamiento. Los estudios parecen indicar que los alimentos cárnicos son más susceptibles a los cambios de color debido a tratamientos con PLAI que los alimentos de origen vegetal. Esto puede deberse a que los pig-

mentos que dan color a los productos cárnicos son degradados por la luz ultravioleta de los PLAI (Hierro *et al.*, 2012; Wambura y Verghese, 2011).

Los cambios en sabor y aroma debido a los PLAI han sido evaluados solo en unos pocos estudios. Como se mencionó anteriormente, Hierro y colaboradores (2012) encontraron que los PLAI provocaron la aparición de aromas sulfurosos en carpacho de atún. El desarrollo de esta clase de aromas ha sido reportado en otros estudios con otras clases de alimentos, como queso manchego y gouda donde, de manera similar al estudio con carpacho, se encontró que los aromas indeseables desaparecieron a lo largo del almacenamiento (Fernández *et al.*, 2016). La aparición de aromas sulfurosos podría deberse a la degradación de proteínas causada por el tratamiento con PLAI. Fernández y colaboradores (2016) realizaron una evaluación de los gases en el espacio de cabeza de los quesos tratados en su estudio y encontraron algunos derivados de la degradación de aminoácidos, como el disulfuro de dimetilo.

### 3.1.2. Efectos sobre las cualidades nutricionales de los alimentos

En los pocos estudios en los que se han evaluado los cambios provocados por los PLAI en las cualidades nutricionales de los alimentos tratados, se ha encontrado que los efectos son sutiles y generalmente no afectan de manera negativa las propiedades nutritivas. En algunos estudios en los que se han evaluado alimentos derivados de plantas se ha encontrado que el tratamiento con PLAI provoca un incremento en la concentración de sustancias antioxidantes, como carotenoides en jitomate y mango (Aguiló-Aguayo *et al.*, 2013; Charles, Vidal, Olive, Filgueiras y Sallanon, 2013) y compuestos fenólicos en espinaca (Agüero *et al.*, 2016). Los autores atribuyen este aumento a una respuesta de la planta al estrés oxidativo provocado por el tratamiento.

Un efecto que se ha reportado, principalmente en alimentos de origen animal, es la degradación oxidativa de lípidos. En la sección anterior se discutió sobre los efectos sensoriales de los PLAI y se determinó que estos rara vez traen consigo cambios indeseables en el sabor y aroma de los alimentos. Una de las marcas más características de la degradación de lípidos es la

aparición de aromas y sabores relacionados con la rancidez, y en las evaluaciones sensoriales de alimentos tratados con PLAI, no se ha reportado que estos sabores aparezcan de manera prominente (Fernández *et al.*, 2016; Ganan *et al.*, 2013; Hierro *et al.*, 2011; Hierro *et al.*, 2012; Manzocco *et al.*, 2014). Esto es particularmente notable en el estudio de Fernández y colaboradores (2016), quienes encontraron un aumento significativo ( $p < 0.05$ ) en el contenido de sustancias derivadas de la degradación de lípidos en los quesos evaluados en su estudio. Se ha sugerido que la corta duración de los pulsos de luz evita la formación de una gran cantidad de esta clase de compuestos (Fine y Gervais, 2004; Hierro *et al.*, 2011). Otros autores han sugerido incluso que los pulsos de luz pueden ejercer un efecto protector sobre los lípidos durante el almacenamiento debido a la formación de compuestos antioxidantes por reacciones de pardeamiento no-enzimático propiciadas por la luz UV (Manzocco *et al.*, 2014).

Desde esta perspectiva, los PLAI parecen ser un tratamiento capaz de preservar de manera casi intacta las propiedades nutritivas de los alimentos. Es necesario realizar una mayor cantidad de estudios que se enfoquen en este aspecto, pues la cantidad de información disponible y la clase de alimentos que se han estudiado aún es reducida.

#### 4. Aplicaciones de los PLAI

De acuerdo con lo que se ha discutido hasta el momento, los PLAI presentan ciertas aplicaciones prometedoras para el tratamiento de alimentos. Se puede ver que el factor limitante más importante para su aplicación efectiva en alimentos sólidos es la textura de la superficie del alimento a tratar, pues los tratamientos más efectivos se han aplicado sobre alimentos con superficie lisa. Otro factor que se debe considerar es que el aparato de desinfección debe permitir la incidencia de luz sobre la mayor proporción posible de la superficie del alimento. A tal efecto, se han utilizado sistemas que permiten la rotación de las partículas alimentarias de tal forma que la luz incida sobre todas sus caras para incrementar significativamente la efectividad de los tratamientos con PLAI (Hwang *et al.*, 2018). Con estas consideraciones en mente, se puede ver en la tabla I que se han logrado inactivaciones de más de 1 ciclo logarítmico en frutas, hojas, semillas, productos lácteos, huevos, productos cárnicos, pescados,

mariscos y alimentos en polvo. Muchos de estos estudios se han hecho en condiciones que podrían considerarse no óptimas: a escala laboratorio, con sistemas en los que la luz incide en una sola cara del alimento y con inóculos grandes.

En alimentos líquidos, las aplicaciones de los PLAI son más evidentes. Se puede ver también en la tabla I que la efectividad de los tratamientos es mayor cuando se aplica sobre microorganismos en suspensión. En alimentos, los pulsos de luz se han aplicado efectivamente para pasteurizar leche en frío (Krishnamurthy *et al.*, 2004; Smith *et al.*, 2002), así como jugos de naranja y manzana (Pataro *et al.*, 2011). Debe de considerarse también la capacidad del fluido de absorber luz en el espectro UV, así como diseñarse el sistema de tal modo que la capa del fluido que la luz debe atravesar sea lo más delgada posible y considerar utilizar un sistema de enfriamiento para el alimento, a fin de evitar una elevación excesiva de la temperatura con los cambios sensoriales que esta conlleva (Oms-Oliu *et al.*, 2010; Pataro *et al.*, 2011).

Recientemente se han comenzado a explorar algunas alternativas para la desinfección de polvos y granos por medio de tratamientos con PLAI. En algunos estudios se ha probado la efectividad de los PLAI para desinfectar esta clase de alimentos por medio de un sistema por lotes, logrando inactivaciones de entre 3.8 y 4 ciclos logarítmicos en trigo y harina de maíz, respectivamente (Jun, Irudayaraj, Demirci y Geiser, 2003; Aron Maftai *et al.*, 2014). Otros autores han intentado desarrollar sistemas continuos para el tratamiento de semillas. Por ejemplo, Hwang y colaboradores (2017, 2018), desarrollaron un sistema de luz pulsada con un componente neumático para el transporte de semillas. Los autores esperaban que la formación de un vórtice dentro de la cámara de tratamiento ayudara en exponer a las semillas a los pulsos de luz de manera más uniforme y así lograr incrementar la efectividad del tratamiento. En estos estudios se lograron inactivaciones de hasta 0.99 ciclos logarítmicos en ajonjolí, 0.74 en semillas de casia y 0.66 en mijo. En contraste, cuando los autores utilizaron un sistema en el que las semillas eran transportadas por medio de una banda, la reducción fue mayor en el caso de las semillas de casia (2.63 log), pero no en el caso del mijo (0.55 log). En este caso, los autores se cuestionaron si la razón por la cual el sistema de transporte neumático resultó menos efectivo

(en el caso de las semillas de casia) fue que las semillas no lograron rotar sobre su propio eje mientras se encontraban dentro de dicho sistema. Siendo que la fuente de luz se encontraba en el centro de la cámara y que las semillas giraban en torno a ella debido al efecto vórtice, la efectividad del sistema se habría visto reducida si las semillas no presentaron rotación y solo una cara de la semilla fue expuesta a la luz durante el tratamiento.

Una aplicación interesante de los PLAI es la desinfección del alimento post-empaque. La utilización de empaques transparentes a la luz UV permitiría procesar alimento que ya ha sido empacado. Algunos estudios han evaluado esta posibilidad. Por ejemplo, Can y colaboradores (2014) no encontraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) en la inactivación de *P. roqueforti* y *L. monocytogenes* en queso americano sin empacar y empacado en polipropileno. La mayoría de los estudios realizados sobre el tratamiento de alimentos post-empaque con PLAI apunta a que el uso de material de empaque plástico transparente no impide la desinfección del alimento; sin embargo, es posible que el empaque en material de vidrio sí lo haga (Heinrich, Zunabovic, Bergmair, Kneifel y Jäger, 2015). Can y colaboradores (2014) observaron ligeros cambios en las propiedades físicas del material de empaque después del tratamiento que sugieren que la degradación de este es posible, pero no afecta de manera importante su calidad del empaque. El hecho de que los PLAI se utilizan más comúnmente para la esterilización de material de empaque solo reafirma esta noción (Chen *et al.*, 2015).

En esta revisión se han expuesto únicamente las aplicaciones de la tecnología de PLAI por sí sola; sin embargo, existen algunos estudios en los que se ha utilizado en forma conjunta con otras tecnologías para un mayor efecto antimicrobiano (Caminiti *et al.*, 2011a; Caminiti *et al.*, 2011; Ferrario, Alzamora y Guerrero, 2015; Muñoz *et al.*, 2011; Muñoz *et al.*, 2012; Palgan *et al.*, 2011;). Por lo tanto, es importante considerar investigar la aplicación de PLAI en conjunto con otros tratamientos para la inactivación microbiana, tanto tradicionales como emergentes.

## CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

La tecnología de desinfección por pulsos de luz de alta intensidad aún está en su infancia. Presenta aplicaciones prometedoras en el campo de los alimentos mínimamente procesados y en los alimentos listos para consumir (RTE, por sus siglas en inglés), pero hace falta un mayor desarrollo de la tecnología y más investigaciones que vayan más allá de las pruebas *in vitro*. El diseño de sistemas y procesos para el tratamiento continuo de alimentos es un área en particular que no ha sido explorada con la profundidad necesaria. Estudios como los de Pataro y colaboradores (2011), Hwang y colaboradores (2017, 2018) y Chaine y colaboradores (2012) muestran, tanto que los tratamientos continuos son un desarrollo viable para la tecnología de PLAI, como la falta de investigación que hay en este campo de aplicación.

En un futuro es posible que los PLAI sean un método establecido más para la desinfección de alimentos gracias a la flexibilidad con la que se pueden incorporar a procesos ya existentes o utilizarse por sí solos. Impulsar el desarrollo de esta tecnología puede significar importantes ganancias, tanto científicas como económicas, así como mejorar la calidad de los alimentos que consumimos en el día a día y ayudar a la prevención del desperdicio alimentario. Los autores esperan que esta revisión sea de utilidad para aquellos interesados en los tratamientos con PLAI.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) —hoy Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)— y a la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) por los recursos aportados.

## REFERENCIAS

- Abida, J., Rayees, B. y Masoodi, F. A. (2014). Pulsed light technology: a novel method for food preservation. *International Food Research Journal*, 21(3), 839-848.
- Agüero, V. M., Jagus, R. J., Martín-Belloso, O. y Soliva-Fortuny, R. (2016). Surface decontamination of spinach by intense pulsed light treatments: Impact on quality attributes. *Postharvest Biology and Technology*, 121, 118-125.
- Aguiló-Aguayo, I., Charles, F., Renard, C. M. G. C., Page, D. y Carlin, F. (2013). Pulsed light effects on surface decontamination, physical qualities and nutritional composition of tomato fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 86, 29-36.
- Aguirre, J. S., García de Fernando, G., Hierro, E., Hospital, X. F., Ordoñez, J. A. y Fernández, M. (2015). Estimation of the growth kinetic parameters of *Bacillus cereus* spores as affected by pulsed light treatment. *International Journal of Food Microbiology*, 202, 20-26.
- Anderson, J. G., Rowan, N. J., MacGregor, S. J., Fouracre, R. A. y Farish, O. (2000). Inactivation of Food-Borne Enteropathogenic Bacteria and Spoilage Fungi Using Pulsed-Light. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 28(1), 83-88.
- Aron Maftai, N., Ramos-Villarreal, A. Y., Nicolau, A. I., Martín-Belloso, O. y Soliva-Fortuny, R. (2014). Pulsed light inactivation of naturally occurring moulds on wheat grain. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94, 721-726.
- Artíguez, M. L., Lasagabaster, A. y Martínez de Marañón, I. (2011). Factors affecting microbial inactivation by Pulsed Light in a continuous flow-through unit for liquid products treatment. *Procedia Food Science*, 1, 786-791.
- Artíguez, M. L. y Martínez de Marañón, I. (2014). Process Parameters Affecting *Listeria innocua* Inactivation by Pulsed Light. *Food and Bioprocess Technology*, 7, 2759-2765.
- Caminiti, I. M., Noci, F., Muñoz, A., Whyte, P., Morgan, D. J., Cronin, D. A. y Lyng, J. G. (2011a). Impact of selected combinations of non-thermal processing technologies on the quality of an apple and cranberry juice blend. *Food Chemistry*, 124, 1387-1392.
- Caminiti, I. M., Palgan, I., Noci, F., Muñoz, A., Whyte, P., Cronin, D. A., ... y Lyng, J. G. (2011b). The effect of pulsed electric fields (PEF) in combination with high intensity light pulses (HILP) on *Escherichia coli* inactivation and quality attributes in apple juice. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 12(2), 118-123.
- Can, F. O., Demirci, A., Puri, V. M. y Gourama, H. (2014). Decontamination of Hard Cheeses by Pulsed uv Light. *Journal of Food Protection*, 77(10), 1723-1731.
- Chaine, A., Levy, C., Lacour, B., Riedel, B. y Carlin, F. (2012) Decontamination of Sugar Syrup by Pulsed Light. *Journal of Food Protection*, 75(5), 913-917.
- Charles, F., Vidal, V., Olive, F., Filguerias, H. y Sallanon, H. (2013). Pulsed light treatment as new method to maintain physical and nutritional quality of fresh-cut mangoes. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 18, 190-195.
- Chen, B. Y., Lung, H. M., Yang, B. B. y Wang, C. Y. (2015). Pulsed light sterilization of packaging materials. *Food Packaging and Shelf Life*, 5, 1-9.
- Cheigh, C. I., Hwang, H. J. y Chung, M. S. (2013). Intense pulsed light (IPL) and UV-C treatments for inactivating *Listeria monocytogenes* on solid medium and seafoods. *Food Research International*, 54, 745-752.
- DeVere, E. y Purchase, D. (2007). Effectiveness of domestic antibacterial products in decontaminating food contact surfaces. *Food Microbiology*, 24, 425-430.
- Duarte-Molina, F., Gómez, P. L., Castro, M. A. y Alzamora, S. M. (2016). Storage quality of strawberry fruit treated by pulsed light: fungal decay, water loss and mechanical properties. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 34, 267-274.
- Elmnasser, N., Guillou, S., Leroi, F., Orange, N., Bakhrouf, A. y Federighi, M. (2007). Pulsed-light system as a novel food decontamination technology: a review. *Canadian Journal of Microbiology*, 53, 813-821.
- Fernández, M., Hospital, X. F., Arias, K. y Hierro, E. (2016). Application of Pulsed Light to Sliced Cheese: Effect on *Listeria* inactivation, Sensory Quality and Volatile Profile. *Food and Bioprocess Technology*, 9(8), 1335-1344.
- Ferrairo, M., Alzamora, S. M. y Guerrero, S. (2013). Inactivation kinetics of some microorganisms in apple, melon, orange and strawberry juices by high intensity light pulses. *Journal of Food Engineering*, 118, 302-311.
- Ferrario, M., Alzamora, S. M. y Guerrero, S. (2015). Study of the inactivation of spoilage microorganisms in apple juice by pulsed light and ultrasound. *Food Microbiology*, 46, 635-642.
- Fine, F. y Gervais, P. (2004). Efficiency of Pulsed uv Light for Microbial Decontamination of Food Powders. *Journal of Food Protection*, 67(4), 787-792.
- Ganan, M., Hierro, E., Hospital, X. F., Barroso, E. y Fernández, M. (2013). Use of pulsed light to increase the safety of ready-to-eat cured meat products. *Food Control*, 32, 512-517.
- Gómez, P. L., García-Loredo, A., Nieto, A., Salvatori, D. M., Guerrero, S. y Alzamora, S. M. (2012a). Effect of pulsed light combined with an antibrowning pretreatment on quality of fresh cut apple. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 16, 102-112.
- Gómez, P. L., Salvatori, D. M., García-Loredo, A. y Alzamora, S. M. (2012b). Pulsed Light Treatment of Cut Apple: Dose Effect on Color, Structure and Microbiological Stability. *Food and Bioprocess Technology*, 5, 2311-2322.

- Gómez-López, V. M., Ragaert, P., Debevere, J. y Devlieghere, F. (2007). Pulsed light for food decontamination: a review. *Trends in Food Science and Technology*, 18, 464-473.
- Gonzalez, R. J., Luo, Y., Ruiz-Cruz, S. y McEvoy, J. L. (2004). Efficacy of Sanitizers to Inactivate *Escherichia coli* O157:H7 on Fresh-Cut Carrot Shreds under Simulated Process Water Conditions. *Journal of Food Protection*, 67(11), 2375-2380.
- Gulati, B. R., Allwood, P. B., Hedberg, C. W. y Goyal, S. M. (2001). Efficacy of Commonly Used Disinfectants for the Inactivation of Calicivirus on Strawberry, Lettuce, and a Food-Contact Surface. *Journal of Food Protection*, 64(9), 1430-1434.
- Heinrich, V., Zunabovic, M., Bergmair, J., Kneifel, W. y Jäger, H. (2015). Post packaging application of pulsed light for microbial decontamination of solid foods: A Review. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 30, 145-156.
- Heinrich, V., Zunabovic, M., Varzakas, T., Bergmair, J. y Kneifel, W. (2016). Pulsed Light Treatment of Different Food Types with a Special Focus on Meat: A Critical Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(4), 591-613.
- Hierro, E., Barroso, E., de la Hoz, L., Ordóñez, J. A., Manzano, S. y Fernández, M. (2011). Efficacy of pulsed light for shelf-life extension and inactivation of *Listeria monocytogenes* on ready-to-eat cooked meat products. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 12, 275-281.
- Hierro, E., Ganan, M., Barroso, E. y Fernández, M. (2012). Pulsed light treatment of selected pathogens and the shelf-life extension of beef and tuna carpaccio. *International Journal of Food Microbiology*, 158, 42-48.
- Hierro, E., Manzano, S., Ordóñez, J. A., de la Hoz, L. y Fernández, M. (2009). Inactivation of *Salmonella enterica* serovar Enteritidis on shell eggs by pulsed light technology. *International Journal of Food Microbiology*, 135, 125-130.
- Huang, Y., Ye, M., Cao, X. y Chen, H. (2017). Pulsed light inactivation of murine norovirus, Tulane virus, *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella* in suspension and on berry surfaces. *Food Microbiology*, 61, 1-4.
- Hwang, H. J., Cheigh, C. I. y Chung, M. S. (2015). Relationship between optical properties of beverages and microbial inactivation by intense pulsed light. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 31, 91-96.
- Hwang, H. J., Cheigh, C. I. y Chung, M. S. (2017). Construction of a pilot-scale continuous-flow intense pulsed light system and its efficacy in sterilizing sesame seeds. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 39, 1-6.
- Hwang, H. J., Cheigh, C. I. y Chung, M. S. (2018). Comparison of bactericidal effects of two types of pilot-scale intense-pulsed-light devices on cassia seeds and glutinous millet. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 49, 170-175.
- Jun, S., Irudayaraj, J., Demirci, A. y Geiser, D. (2003). Pulsed uv-light treatment of corn meal for inactivation of *Aspergillus niger* spores. *International Journal of Food Science and Technology*, 38, 883-888.
- Kasahara, I., Carrasco, V. y Aguilar, L. (2015). Inactivation of *Escherichia coli* in goat milk using pulsed ultraviolet light. *Journal of Food Engineering*, 152, 43-49.
- Krishnamurty, K., Demirci, A. e Irudayaraj, J. (2004). Inactivation of *Staphylococcus aureus* by Pulsed UV Light Sterilization. *Journal of Food Protection*, 67(5), 1027-1030.
- Lamont, Y., Rzeżutka, A., Anderson, J. G., MacGregor, S. J., Given, M. J., Deppe, C. y Cook N. (2007). Pulsed uv-light inactivation of poliovirus and adenovirus. *Letters in Applied Microbiology*, 45, 564-567.
- Lasagabaster, A. y Martínez de Marañón, I. (2013). Impact of Process Parameters on *Listeria innocua* Inactivation Kinetics by Pulsed Light Technology. *Food and Bioprocess Technology*, 6, 1828-1836.
- Levy, C., Aubert, X., Lacour, B. y Carlin, F. (2012). Relevant factors affecting microbial surface decontamination by pulsed light. *International Journal of Food Microbiology*, 152, 168-174.
- Luo, W., Chen, A., Chen, M., Dong, W. y Hou, X. (2014). Comparison of sterilization efficiency of pulsed and continuous uv light using tunable frequency uv system. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 26, 220-225.
- Macias-Rodriguez, B., Yang, W., Schneider, K. y Rock, C. (2014). Pulsed uv light as a postprocessing intervention for decontamination of hard-cooked peeled eggs. *International Journal of Food Science and Technology*, 49, 2472-2480.
- Manzocco, L., Maifreni, M., Anese, M., Munari, M., Bartolomeoli, I., Zanardi, S., ... y Nicolì, M. C. (2014). Effect of Pulsed Light on Safety and Quality of Fresh Egg Pasta. *Food and Bioprocess Technology*, 7(7), 1973-1980.
- Marquenie, D., Geeraerd A. H., Lammertyn, J., Soontjens C., Van Impe, J. F., Michiels C. W. y Nicolai, B. M. (2003). Combinations of pulsed white light and uv-c or mild heat treatment to inactivate conidia of *Botrytis cinerea* and *Monilia fructigena*. *International Journal of Food Microbiology*, 85(1-2), 185-196.

- Miller, B. M., Sauer, A. y Moraru, C. I. (2012). Inactivation of *Escherichia coli* in milk and concentrated milk using pulsed-light treatment. *Journal of Dairy Science*, 95, 5597-5603.
- Muñoz, A., Caminiti, I. M., Palgan, I., Pataro, G., Noci, F., Morgan, D. J., ... y Lyng, J. G. (2012). Effects on *Escherichia coli* inactivation and quality attributes in apple juice treated by combinations of pulsed light and thermosonication. *Food Research International*, 45(1), 299-305.
- Muñoz, A., Palgan, I., Noci, F., Morgan, D. J., Cronin, D. A., Whyte, P. y Lyng, J. G. (2011). Combinations of High Intensity Light Pulses and Thermosonication for the Inactivation of *Escherichia coli* in Orange Juice. *Food Microbiology*, 28(6), 1200-1204.
- Martín-Belloso, O., Oms-Oliu, G. y Soliva-Fortuny, R. (2010). Pulsed Light Treatments for Food Preservation. A review. *Food and Bioprocess Technology*, 3(1), 13-23.
- Palgan, I., Caminiti, I. M., Muñoz, A., Noci, F., Whyte, P., Morgan, D. J., ... y Lyng, J. G. (2011). Combined effect of selected non-thermal technologies on *Escherichia coli* and *Pichia fermentans* inactivation in apple and cranberry juice blend and on product shelf life. *International Journal of Food Microbiology*, 151(1), 1-6.
- Pataro, G., Muñoz, A., Palgan, I., Noci, F., Ferrari, G. y Lyng, J. G. (2011). Bacterial inactivation in fruit juices using a continuous flow Pulsed Light (PL) system. *Food Research International*, 44, 1642-1648.
- Proulx, J., Hsu, L. C., Miller, B. M., Sullivan, G., Paradis, K. y Moraru, C. I. (2015). Pulsed-light inactivation of pathogenic and spoilage bacteria on cheese surface. *Journal of Dairy Science*, 98, 5890-5898.
- Rajkovic, A., Tomasevic, I., Smigic, N., Uyttendaele, M., Radovanovic, R. y Devlieghere, F. (2010). Pulsed uv light as an intervention strategy against *Listeria monocytogenes* and *Escherichia coli* O157:H7 on the surface of a meat slicing knife. *Journal of Food Engineering*, 100, 446-451.
- Ramos-Villaroel, A. Y., Aron-Maftei, N., Martín-Belloso, O. y Soliva-Fortuny, R. (2012). The role of pulsed light spectral distribution in the inactivation of *Escherichia coli* and *Listeria innocua* on fresh-cut mushrooms. *Food Control*, 24, 206-213.
- Ringus, D. L. y Moraru, C. I. (2013). Pulsed Light inactivation of *Listeria innocua* on food packaging materials of different surface roughness and reflectivity. *Journal of Food Engineering*, 114, 331-337.
- Sauer, A. y Moraru, C. I. (2009). Inactivation of *Escherichia coli* ATCC 25922 and *Escherichia coli* O157:H7 in Apple Juice and Apple Cider, Using Pulsed Light Treatment. *Journal of Food Protection*, 72(5), 937-944.
- Sharma, R. R. y Demirci, A. (2003). Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 on Inoculated Alfalfa Seeds with Pulsed Ultraviolet Light and Response Surface Modeling. *Journal of Food Science*, 68(4), 1448-1453.
- Smith, W. L., Lagunas-Solar, M. C. y Cullor, J. S. (2002). Use of Pulsed Ultraviolet Laser Light for the Cold Pasteurization of Bovine Milk. *Journal of Food Protection*, 65(9), 1480-1482.
- Takeshita, K., Shibato, J., Sameshima, T., Fukunaga, S., Isobe, S., Arihara, K. e Itoh, M. (2003). Damage of yeast cells induced by pulsed light irradiation. *International Journal of Food Microbiology*, 85, 151-158.
- Turtoi, M. y Nicolau, A. (2007). Intense light pulse treatment as alternative method for mould spores destruction on paper-polyethylene packaging material. *Journal of Food Engineering*, 83, 47-53.
- Uesugi, A. R., Hsu, L. C., Worobo, R. W. y Moraru, C. I. (2016). Gene expression analysis for *Listeria monocytogenes* following exposure to pulsed light and continuous ultraviolet light treatments. *LWT - Food Science and Technology*, 68, 579-588.
- Valdivia-Nájar, C. G., Martín-Belloso, O., Giner-Seguí, J., Soliva-Fortuny, R. (2017). Modeling the Inactivation of *Listeria innocua* and *Escherichia coli* in Fresh Cut Tomato Treated with Pulsed Light. *Food and Bioprocess Technology*, 10, 166-274.
- Wambura, P. y Verghese, M. (2011). Effect of pulsed ultraviolet light on quality of sliced ham. *LWT - Food Science and Technology*, 44, 2173-2179.
- Wekhof, A., Trompeter, F. J. y Franken, O. (2001). Pulsed uv Disintegration (PUVD): a new sterilization mechanism for packaging and broad medical-hospital applications. *The First International Conference on Ultraviolet Technologies*. Washington D. C. <https://pdfs.semanticscholar.org/b2b4/c4ba5de85cd99efee776da9b71c93b6761e5.pdf>
- Wuytack, E. Y., Phuong, D. T., Aertsen, A., Reyns, K. M. F., Marquenie, D., De Ketelaere, B., ... y Michiels, C. W. (2003). Comparison of Sublethal Injury Induced in *Salmonella enterica* Serovar Typhimurium by Heat and by Different Nonthermal Treatments. *Journal of Food Protection*, 66(1), 31-37.

## REFERENCIAS

- Antonio-Gutiérrez, O., López-Malo, A., Ramírez-Corona, N. y Palou, E. (2017). Enhancement of uvc-light treatment of tangerine and grapefruit juices through ultrasonic atomization. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 39, 7-12.
- Bintsis, T., Litopoulou-Tzanetaki, E. y Robinson, R. K. (2000). Existing and potential applications of ultraviolet light in the food industry: A critical review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80(6), 637-645.
- Caminiti, I. et al. (2011). Impact of selected combinations of non-thermal processing technologies on the quality of an apple and cranberry juice blend. *Food Chemistry*, 124(4), 1387-1392.
- Char, C. D., Mitilinaki, E., Guerrero, S. N. y Alzamora, S. M. (2010). Use of high-intensity ultrasound and uv-c light to inactivate some microorganisms in fruit juices. *Food Bioprocess Technology*, 3(6), 797-803.
- Choi, E. J., Park, H. W., Yang, H. S. y Chun, H. H. (2017). Effects of combined treatment with ultraviolet-c irradiation and grape seed extract followed by supercooled storage on microbial inactivation and quality of dongchimi. *LWT-Food Science and Technology*, 85(A), 110-120.
- FDA (Food Drug Administration). (2000). 21 CFR Part 179: irradiation in the production, processing and handling of food.
- Flores-Cervantes, D. X., Palou, E. y López-Malo, A. (2013). Efficacy of individual and combined uvc light and food antimicrobial treatments to inactivate *Aspergillus flavus* or *A. niger* spores in peach nectar. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 20, 244-252.
- Gabriel, A. A., Ostonal, J. M., Cristobal, J. O., Pagal, G. A. y Armada, J. V. E. (2018). Individual and combined efficacies of mild heat and ultraviolet-c radiation against *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella enterica*, and *Listeria monocytogenes* in coconut liquid endosperm. *International Journal of Food Microbiology*, 277, 64-73.
- Gachovska, T. K., Kumar, S., Thippareddi, H., Subbiah, J. y Williams, F. (2008). Ultraviolet and pulsed electric field treatments have additive effect on inactivation of *E. coli* in apple juice. *Journal of Food Science*, 73(9), 412-417.
- García, M. G., Ferrairo, M. y Guerrero, S. (2018). Effectiveness of uv-c light assisted by mild heat on *Saccharomyces cerevisiae* KE 162 inactivation in carrot-orange juice blend studied by flow cytometry and transmission electron microscopy. *Food Microbiology*, 73, 1-10.
- Gouma, M., Gayán, E., Raso, J., Condón, S. y Álvarez, I. (2015). Inactivation of spoilage yeasts in apple juice by uv-c light and in combination with mild heat. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 32, 146-155.
- Guerrero-Beltrán, J. A. y Barbosa-Cánovas, G. V. (2011). Ultraviolet-c light processing of liquid food products. En H.Q. Zhang, G.V. Barbosa-Cánovas, V. M. Balasubramaniam, C. P. Dunne, D.F. Farkas, J.T.C. Yuan, *Nonthermal Processing Technologies for Food* (1a Ed., 262-270). Inglaterra: Wiley-Blackwell and IFT Press.
- Hamilton, W. A. y Sale, A. J. H. (1967). Effects of high electric fields on microorganisms. II. Mechanism of action of the lethal effect. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)*, 148(3), 789-800.
- Huang, R., de Vries, D. y Chen, H. (2018). Strategies to enhance fresh produce decontamination using combined treatments of ultraviolet, washing and disinfectants. *International Journal of Food Microbiology*, 283, 37-44.
- Knorr, D., Zenker, M., Heinz, V. y Lee, D. U. (2004). Applications and potential of ultrasonics in food processing. *Trends in Food Science and Technology*, 15(5), 261-266.
- Koutchma, T., Keller, S., Chirtel, S. y Parisi, B. (2004). Ultraviolet disinfection of juice products in laminar and turbulent flow reactors. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 5(2), 179-189.
- Koutchma, T. N., Forney, L. J. y Moraru, C. I. (2009). *Ultraviolet Light in Food Technology Principles and Applications* (1a ed.). Florida: CRC Press.
- Koutchma, T. N., Parisi, B. y Patazca, E. (2007). Validation of uv coiled tube reactor for fresh juices. *Journal of Environmental Sciences*, 6(3), 319-328.
- Leistner, L. y Gorris, L. (1995). Food preservation by hurdle technology. *Trends in Food Science & Technology*, 6(2), 41-46.
- López-Malo, A. y Palou, E. (2005). Ultraviolet light and food preservation. En Barbosa-Cánovas, G. V., Tapia, M. S. y Cano, M. P., *Novel Food Processing Technologies*. (1a ed., 405-422). Madrid: CRC Press.
- Noci, F., Riener, J., Walkling-Ribeiro, M., Cronin, D. A., Morgan, D. J. y Lyng, J. G. (2008). Ultraviolet irradiation and pulsed electric fields (PEF) in a hurdle strategy for the preservation of fresh apple Juice. *Journal of Food Engineering*, 85, 141-146.
- Palgan, I., Caminiti, I. M., Muñoz, A., Noci, F., Whyte, P., Morgan, D. J., ... y Lyng, J. G. (2011). Combined effect of selected non-thermal technologies on *Escherichia coli* and *Pichia fermentans* inactivation in an apple and cranberry juice blend and on product shelf life. *International Journal of Food Microbiology*, 151(1), 1-6.
- Wang, S., Meckling, K. A., Marcone, M. F., Kakuda, Y. y Tsao, R. (2011). Synergistic, additive, and antagonistic effects of food mixtures on total antioxidant capacities. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(3), 960-968.

**UDLAP<sup>®</sup>**

Departamento de Ingeniería Química,  
Alimentos y Ambiental