



# Principios y aplicaciones de luz ultravioleta

para el procesamiento de alimentos líquidos en operación continua: parámetros de diseño y operación

---

C. Pihen-Martínez\* y N. Ramírez-Corona

\*Programa de Doctorado en Ciencia de Alimentos  
Correos electrónicos: [christelle.pihenmz@udlap.mx](mailto:christelle.pihenmz@udlap.mx) • [nelly.ramirez@udlap.mx](mailto:nelly.ramirez@udlap.mx)

## RESUMEN

Los tratamientos con luz ultravioleta a baja presión (UV-BPU), diodos emisores de luz ultravioleta (UV-LEDs) y pulsos de luz (PL), son tecnologías no térmicas que utilizan radiación ultravioleta en diferentes arreglos y longitudes de onda electromagnética para la inactivación de microorganismos en sistemas alimentarios. A pesar de que cada uno de ellos presenta ventajas y desventajas en su aplicación a gran escala para el procesamiento de alimentos líquidos, diversos estudios han demostrado el potencial de estas tecnologías para reemplazar los tratamientos tradicionales de pasteurización. Su efectividad es dependiente de las características de la matriz de la muestra y de la optimización de los parámetros de operación. Además, se ha observado que la configuración de los equipos tiene un efecto importante en la eficiencia del tratamiento, y se ha reportado un efecto sinérgico cuando estas tecnologías que aplican radiación UV se combinan con tratamientos térmicos y no térmicos, incrementando la eficiencia tanto en la inactivación de microorganismos como en la preservación de características de calidad en los alimentos líquidos tratados. A pesar de los resultados favorables que estas tecnologías presentan, aún existen áreas de oportunidad referentes a la configuración de los equipos, combinación de tratamientos y escalamiento de los mismos, así como para la investigación de tratamientos de UV-LEDs, particularmente para sistemas con operación en continuo.

**Palabras clave:** radiación ultravioleta, UV-LEDs, pulso de luz, luz ultravioleta a baja presión, tratamiento térmico, sistema de operación continua, alimentos líquidos.

## ABSTRACT

Low pressure ultraviolet light (UV-LP), ultraviolet light emitting diodes (UV-LEDs) and pulsed light (PL) treatments are non-thermal technologies that use ultraviolet radiation in different arrangements and electromagnetic wavelengths for the inactivation of microorganisms in food systems. Even though each of them has advantages and disadvantages in their large-scale application for processing liquid food, several studies have demonstrated the potential of these technologies to replace traditional pasteurization treatments. Their effectiveness is dependent on the characteristics of the sample matrix and the optimization of the operating parameters. Moreover, it has been observed the effect of equipment configuration on the treatment effectiveness, as well as the synergistic effect between technologies that apply UV radiation combined with thermal and non-thermal treatment in increasing inactivation efficiency and preserving quality characteristics in treated liquid foods. Despite the favorable results of these technologies, there are still areas of opportunity regarding equipment configuration, combination of treatments and scaling up, as well as in research on UV-LEDs treatments, particularly for systems operating in a continuous mode.

**Keywords:** UV radiation, UV-LEDs, pulsed light, low pressure ultraviolet light, thermal treatment, continuous operation system, liquid food.

## INTRODUCCIÓN

La radiación ultravioleta (UV) forma parte del espectro electromagnético con una longitud de onda entre 100 y 400 nm (Gómez-López *et al.*, 2012). A pesar de ser una tecnología que se desarrolló en 1906 para la desinfección de agua potable (Masschelein y Rice, 2002), su estudio en el área alimentaria, así como el diseño de nuevos equipos que emplean radiación UV para el procesamiento de alimentos líquidos, es reciente (Ye *et al.*, 2007; Forney *et al.*, 2008; Mansor *et al.*, 2014; Jarvis *et al.*, 2019; Xu *et al.*, 2019). La actual demanda por parte de los consumidores respecto a la comercialización de alimentos inocuos, procesados mediante técnicas que tengan un impacto mínimo en las propiedades nutrimentales y sensoriales de los alimentos procesados, ha generado que la industria alimentaria busque reemplazar técnicas tradicionales de pasteurización de alimentos por tratamientos no térmicos, entre los cuales destacan los métodos que aplican rayos UV como fuente de irradiación, no solo por su potencial germicida, sino también por la retención de propiedades sensoriales y nutrimentales de interés para los consumidores (Bhavaya y Umesh Hebbar, 2017; A. Chevremont, Farnet da Silva, Coulomb, *et al.*, 2019; Koutchma, 2010; Rifna *et al.*, 2019; Vollmer *et al.*, 2020).

El tratamiento mediante luz UV es un método libre de productos químicos y efluentes residuales que utiliza radiación no ionizante como fuente de irradiación, lo cual lo hace amigable con el medio ambiente (Gómez-López *et al.*, 2007; Bhavaya y Hebbar, 2017; Minh *et al.*, 2019). Además, este tipo de tratamientos es adecuado para el procesamiento de alimentos líquidos, principalmente en operación continua, dado que, en los alimentos sólidos, los rayos UV solo logran penetrar la superficie del producto tratado, mientras que en alimentos líquidos tratados por flujo continuo se logra homogeneizar el producto y con ello alcanzar una mayor superficie de inactivación (Xu *et al.*, 2019; Kim y Kang, 2021; Pierscianowski *et al.*, 2021).

En vista de su gran potencial en la industria de alimentos líquidos, en los últimos años se han desarrollado nuevos equipos que utilizan este tipo de radiación como método de pasteurización, pero con variantes en la fuente de irradiación. Entre estas tecnologías se encuentran los equipos de pulsos de luz (PL), los cuales usan lámparas de xenón como fuente de luz de amplio espectro, o métodos más recientes como diodos emisores de luz ultravioleta (UV-LEDS), que emiten fotones en múltiples longitudes de onda dentro del rango UV, ambos como alternativa a la aplica-

ción de radiación UV a partir de lámparas con vapor de mercurio a baja presión (Kheyrandish *et al.*, 2018; Roobab *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2019; Mandal *et al.*, 2020; Kim y Kang, 2021).

Por otra parte, la eficiencia de cada una de estas tecnologías dependerá del diseño y parámetros de operación empleados en los tratamientos, la matriz del alimento, el tipo de microorganismo presente en el producto, así como en las condiciones de operación; entre ellos el tiempo de tratamiento, el rango de longitud de onda utilizado en cada equipo o la distancia entre la muestra y la fuente de irradiación (Krishnamurthy *et al.*, 2007; Keklik y Krishnamurthy, 2012; Levy *et al.*, 2012; Ouyang *et al.*, 2020).

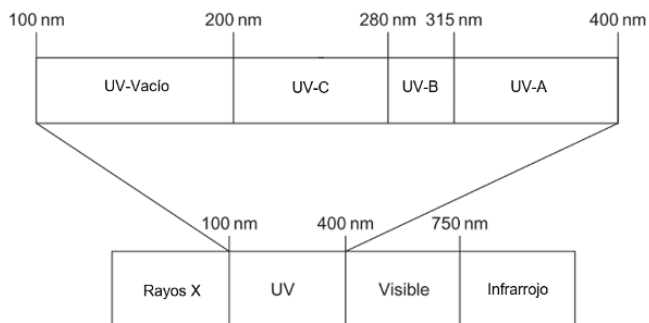
Finalmente, se ha comprobado que las tecnologías emergentes que emplean luz UV como fuente de irradiación no solo tienen un efecto positivo en los compuestos termosensibles, como la conservación de vitaminas y compuestos aromáticos, sino que también parecen no tener efecto negativo en algunas características fisicoquímicas como el color, el pH o los °Bx (Chaine *et al.*, 2012; Chemat *et al.*, 2017; Gabrić *et al.*, 2018; Koutchma, 2019a; Rifna *et al.*, 2019; Mandal *et al.*, 2020; Gouma *et al.*, 2020).

Este artículo proporcionará una descripción de los principios fundamentales de aplicación de UV-BP, PL y UV-LEDS para la pasteurización de alimentos líquidos, así como el mecanismo y eficiencia de la inactivación microbiana de cada uno, su efecto sobre los parámetros nutricionales y de calidad en los alimentos líquidos, los diseños y sistemas de operación disponibles, además de ejemplos de sus aplicaciones tanto de manera individual como en combinación con otras tecnologías emergentes, con el fin de analizar las ventajas y desventajas de los tratamientos que emplean radiación UV.

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 1. Principio de las tecnologías emergentes que emplean radiación ultravioleta

La luz UV es una forma de luz no visible para el ojo humano que está entre el espectro de los rayos X y la luz visible (figura 1). Constituye parte del espectro electromagnético que se encuentra entre el rango de 100 a 400 nm, el cual a su vez puede clasificarse en cuatro grupos dependiendo de la longitud de onda emitida o el nivel de energía en los fotones, los cuales corresponden a luz UV-A, UV-B, UV-C y UV de vacío, donde cada tipo de luz UV tiene un efecto específico a nivel microbiológico y macromolecular (tabla I).



**Figura 1.**

Niveles del espectro electromagnético a diferentes longitudes de onda de la luz ultravioleta. Adaptada de Gómez-López *et al.* (2012).

La acción bactericida de la luz uv depende de la longitud de onda aplicada, la cual a su vez es proporcional a la energía del fotón, donde longitudes de onda más largas dan lugar a una menor energía del fotón y, como consecuencia, a una menor profundidad de penetración en las células microbianas (tabla I) (Gómez-López *et al.*, 2007, 2012; Koutchma *et al.*, 2019; Souza y Koutchma, 2020).

El efecto germicida de la radiación uv no solo deriva del rango de luz aplicado a los microorganismos, sino también de la sensibilidad de cada microorganismo a la luz uv, dependiendo de la estructura de la pared celular, el espesor, la composición y la existencia o no de proteínas que absorben luz uv. Del mismo modo, la sensibilidad de los microorganismos a la radiación uv

se ve afectada por las diferencias en la estructura de los ácidos nucleicos y el mecanismo de reparación del ADN o fotorreactivación, cuando se aplican bajas dosis de uv. Existen dos tipos de reparación del ADN en los microorganismos: la fotorreactivación y la reparación oscura. La fotorreactivación es el principal proceso de reparación del ADN, donde las fotoenzimas son capaces de reparar dímeros de ciclobutano pirimidina (CPD) al absorber energía luminosa en la longitud de onda entre 310 y 480 nm (UV-A o luz visible parcial) (Li *et al.*, 2019). Por otro lado, la reparación oscura es un proceso que no requiere luz y es capaz de reemplazar los nucleótidos de ADN dañados con ADN nuevo, lo cual causa efectos germicidas mínimos en los productos tratados por uv (Bolton y Cotton, 2008).

Debido a lo anterior, se ha observado que el orden de resistencia de los microorganismos a la radiación uv se puede ordenar según la siguiente jerarquía: bacterias Gram negativas <bacterias Gram positivas <levaduras <esporas bacterianas <mohos <virus, donde las esporas de hongos o bacterias con pigmentaciones oscuras tienen mayor resistencia a los tratamientos por radiación uv (Rowan, Gregor, Anderson, Fouracre, e Ilvaney, 1999; Anderson, Rowan, MacGregor, Fouracre, y Parish, 2000; Levy, Aubert, Lacour, y Carlin, 2012; Souza y Koutchma, 2020).

Sin embargo, la eficiencia de los tratamientos mediante radiación uv no solo depende del tipo de microorganismo, sino también de la cepa, la etapa de cultivo y la densidad de cada uno, así como de las características del medio de crecimiento, siendo la transmitancia del producto uno de los factores más importantes de la muestra, pues determina la efectividad de los tratamientos por uv (Souza y Koutchma, 2020).

**Tabla I.** Clasificación de la luz ultravioleta en función del rango de espectro electromagnético, el nivel de energía de los fotones en cada tipo de luz uv y su efecto en las células de los microorganismos y a nivel macromolecular

Tipo de luz uv	Rango de espectro (nm)	Nivel de energía de los fotones (eV)	Efecto en la célula	Efecto a nivel macro
UV-A	400-315	3.10-3.87	Mayor producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) como radicales hidroxilos y oxígeno, provoca daño oxidativo a los lípidos de la membrana celular, proteínas de la membrana y efectos indirectos sobre el ADN.	Genera cambios de coloración en piel.
UV-B	315-280	3.87-4.43	Induce la formación de lesiones en el ADN (fotoproductos), lo que provoca daño directo en el ADN, bloquea la replicación del ADN y la transcripción del ARN e induce estrés oxidativo y daño de lípidos.	Genera quemaduras y en exposición prolongada puede provocar cáncer.

**Tabla 1.** Clasificación de la luz ultravioleta en función del rango de espectro electromagnético, el nivel de energía de los fotones en cada tipo de luz UV y su efecto en las células de los microorganismos y a nivel macromolecular (continuación)

Tipo de luz UV	Rango de espectro (nm)	Nivel de energía de los fotones (eV)	Efecto en la célula	Efecto a nivel macro
UV-C	280-200	4.43-6.20	Logra producir alteraciones en el ADN por los dímeros pirimidina, citocina y la elevada cantidad de dímeros de timina, los cuales inhiben la formación de nuevas cadenas de ADN en la replicación celular y la transcripción de ADN. Ello provoca la muerte de los microorganismos.	Inactivación de bacterias, virus, levaduras, mohos, esporas, protozoos y algas.
UV-vacío	200-100	-	Esta radiación solo puede estar presente en el vacío debido a que es rápidamente absorbida por el aire.	-

Kramer, Wunderlich, y Muranyi (2015); Ramos-Villarreal, Martín-Belloso, y Soliva-Fortuny (2011, 2015).

## 2. Mecanismo de inactivación microbiana de las tecnologías emergentes con luz UV

### 2.1. Luz ultravioleta a baja presión (UV-BP)

La luz ultravioleta emitida por lámparas de destellos de gas inerte es una fuente germicida monocromática que convierte la potencia eléctrica en radiación de alta potencia a partir de lámparas de mercurio de presión baja (LPB) o lámparas de mercurio de presión media (LMM) (Keklik y Krishnamurthy, 2012; Koutchma, 2010, 2019b).

Las lámparas de mercurio de baja presión son el único tipo de lámpara aprobado para su uso en la industria alimentaria por la FDA de EE. UU.; su funcionamiento se logra mediante el ingreso de energía a partir de un voltaje aplicado entre dos electrodos, lo que produce calor para vaporizar e ionizar el mercurio líquido dentro de un tubo de cuarzo. Posteriormente, el vapor de mercurio ionizado emite dos bandas en el rango de UV-C de 253.7 y 184 nm, donde únicamente la banda de luz de 253.7 nm logra irradiar a la muestra tratada, puesto que la banda de 184 nm es absorbida por el tubo de cuarzo y por la atmósfera (Souza y Koutchma, 2020).

Es por ello que este tipo de tratamiento ocupa únicamente como efecto germicida la región de onda corta (UV-C) en la longitud de 253.7 nm, la cual es absorbida por los ácidos nucleicos de los microorganismos. Los fotones UV-C absorbidos por las ba-

ses nitrogenadas del ADN microbiano desplazan de forma física a los electrones, lo cual rompe los enlaces conjugados, dando lugar a la formación de fotoproductos de reticulación covalente, como dímeros de pirimidina, que son enlaces entre pares adyacentes de pirimidina, timina y citosina en el ADN. Los enlaces formados provocan que el ADN no pueda descomprimirse para llevar a cabo la replicación, lo cual inhibe la reproducción celular y causa la muerte de los microorganismos (figura 2a) (Cassar *et al.*, 2020). Sin embargo, en algunos casos el daño producido por la luz UV puede repararse mediante los mecanismos de reparación del ADN o fotorreactivación (Bolton y Cotton, 2008; Cassar *et al.*, 2020).

La eficiencia del equipo depende de la potencia total de entrada o energía total (W), que se encuentra en función de la relación de la potencia media de salida y la entrada de voltaje total a la lámpara, además de la irradiancia o la cantidad de flujo incidente en un área específica expresada en mW/cm<sup>2</sup> y la irradiación a una distancia determinada (Koutchma, 2010; Keklik y Krishnamurthy, 2012; Gautam *et al.*, 2017; Antonio-Gutiérrez *et al.*, 2017; Dhahir *et al.*, 2020; Koutchma *et al.*, 2021). Adicionalmente, la eficiencia del tratamiento por UV en sistemas de operación continua también depende de la vida útil de la lámpara, la cual se encuentra en función del número total de horas de trabajo, con un máximo de 18,000 horas en funcionamiento continuo (Gómez-López *et al.*, 2012; Koutchma, 2010; Singh *et al.*, 2020; Koutchma *et al.*, 2021).

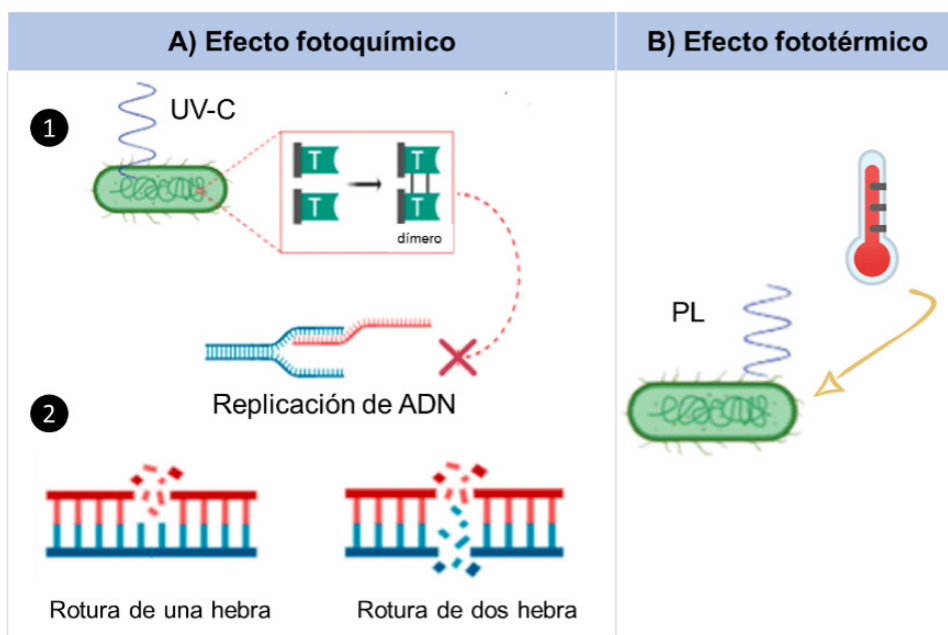


Figura 2.

Mecanismo de inactivación fotoquímico (a) y fototérmico (b) del ADN. Adaptada de Santamera *et al.* (2020).

## 2.2. Diodos emisores de luz ultravioleta (UV-LEDs)

Los diodos emisores de luz ultravioleta son un tipo de material semiconductor capaz de producir luz mediante electroluminiscencia. Los LEDs cuentan con dos uniones, la de tipo *n*, formado por un material rico en electrones, y la de tipo *p* (o agujeros), que son pobres en electrones. Cuando la corriente pasa a través del diodo, los electrones del material de tipo *n* pueden combinarse con los electrones del material de tipo *p*, lo cual provoca la excitación de los electrones y causa la liberación de energía como fotones (Koutchma *et al.*, 2019; Popovi y Koutchma, 2020). La longitud de onda de los fotones dependerá de la cantidad de energía requerida para promover un electrón desde la banda de valencia a la banda de conducción del material semiconductor (Hinds *et al.*, 2019; Kebbi *et al.*, 2020). Por otra parte, el mecanismo de inactivación microbiana de los UV-LEDs es el mismo que el de las lámparas de UV-BP a base de mercurio (figura 2a). La diferencia radica en el tipo de materiales semiconductores utilizados para realizar la inactivación, los cuales, dependiendo de sus propiedades, emitirán variaciones de longitudes de onda, desde 210 hasta 400 nm (UV-C a UV-A) (Kolbe *et al.*, 2011; Song *et al.*, 2016, 2019; Cassar *et al.*, 2020). Generalmente se utilizan aleaciones de nitruro III, in-

cluido el nitruro de galio (GaN) con longitudes de onda de 200 a 400 nm, el nitruro de aluminio (AlN) que cuenta con una longitud de onda de 210 nm y el nitruro de aluminio y galio (AlGaIn) que es una combinación entre AlN y GaN, el cual logra alcanzar longitudes de onda de 210 a 365 nm (Hinds *et al.*, 2019; Koutchma *et al.*, 2019; Cassar *et al.*, 2020).

A su vez, los equipos de luz UV-LEDs están compuestos por un circuito integrado (chips) de UV-LEDs que pueden ser empaquetados en múltiples formas, ya sea por chips únicos, que tienen un arreglo en conjunto con una misma longitud de onda, o en matriz de chips múltiples, los cuales pueden variar la longitud de onda del conjunto de chips. Ambos arreglos están formados por estructuras compactas, fácilmente comerciales, accesibles, pequeñas y flexibles, que otorgan una vida útil de alrededor de 100,000 horas de funcionamiento continuo (Koutchma *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2019). El arreglo de los chips y la longitud de onda seleccionados dependerán de cada producto a tratar y contribuirán al efecto germicida (Li *et al.*, 2019).

Entre los factores que afectan el rendimiento de inactivación en los tratamientos por UV-LEDs se incluye la densidad bacteriana, el pH, el tiempo de exposición a los rayos UV y la

longitud de onda única o la longitud de onda de acoplamiento de los chips LEDs (Chevremont, Farnet da Silva, Sergent, Coulomb, y Boudenne, 2019). Además, es importante considerar que la luz UV de los UV-LEDs penetra pocos milímetros la superficie del producto a tratar, por lo que el efecto de incidencia de la luz dependerá de las propiedades ópticas del alimento (Baykuş *et al.*, 2021; Koutchma *et al.*, 2021).

### 2.3. Pulsos de luz

Los pulsos de luz (PL) son una técnica que amplifica el mecanismo germicida producido por la luz UV mediante el uso de pulsos de corta duración y de amplio espectro electromagnético; comprende de 200 a 1100 nm (Gómez-López *et al.*, 2007). Los pulsos se generan cuando se aplica alto voltaje a un gas inerte, generalmente xenón, a partir de dos electrodos colocados en una lámpara de destellos, lo cual convierte la energía eléctrica en energía radiante pulsada (Mohamed y Eissa, 2012; Abida *et al.*, 2014; Demirci *et al.*, 2020). Este arreglo permite la producción de pulsos de luz, a partir de la magnificación de la energía pulsada en el orden de megavatios, que se almacena como electricidad en un capacitor durante algunos segundos y se libera de forma rápida, en una fracción de millonésima o milésima de segundo, lo cual provoca la excitación de las moléculas de gas dentro de la lámpara de destellos, dando como resultado pulsos de luz de alta intensidad (Cassar *et al.*, 2020; Dong *et al.*, 2020). La electricidad descargada en la lámpara de xenón produce picos de potencia elevados con altas repeticiones en el orden de 0.1 Hz, lo cual provoca que la intensidad de los PL sea de aproximadamente 20,000 veces la de la luz ultravioleta (Takeshita *et al.*, 2003; Gómez-López *et al.*, 2007; Vollmer *et al.*, 2020).

El mecanismo de inactivación se logra a partir del efecto fotoquímico y fototérmico, gracias al amplio espectro ocupado por este tratamiento, que abarca tres regiones del umbral electromagnético. La región ultravioleta (UV) con una longitud de onda de 200 a 400 nm, correspondiente al 25 % de luz emitida por los PL; la región visible (VIS) con un rango de 400 a 700 nm, que corresponde al 45 % de los PL; y la región de infrarrojo (IR) con una longitud de 700 a 1100 nm y un 30 % de la luz emitida por PL (Elmnasser *et al.*, 2007; Palgan *et al.*, 2011a; Shriver *et al.*, 2011). Ello, combinado con la corta duración de los pulsos y la frecuen-

cia emitida por la lámpara de destellos, contribuye al mecanismo de inactivación microbiana (Dunn, 1996; Takeshita *et al.*, 2003; Hinds *et al.*, 2019).

El efecto fotoquímico consiste en la dimerización de bases pirimidínicas en el ADN a causa de la irradiación UV-C, lo cual impide la replicación y, por lo tanto, la división celular de los microorganismos (figura 2a) (Roohinejad, Koubaa, *et al.*, 2018; Roohinejad, Parniakov, *et al.*, 2018). A su vez, el efecto fototérmico se debe a que a fluencias superiores a 0.5 J/cm<sup>2</sup> se logra la ruptura de la pared celular de los microorganismos por sobrecalentamiento temporal, debido a la absorción de la luz ultravioleta proveniente de la lámpara de destellos (figura 2b) (Roohinejad, Koubaa, *et al.*, 2018; Wekhof *et al.*, 2001), lo que provoca el colapso estructural de la célula y con ello la evacuación del contenido celular fuera de la membrana celular (Abida *et al.*, 2014; Bhavya y Hebbar, 2017; Mandal *et al.*, 2020).

Al igual que los tratamientos por UV-BP y UV-LEDs, la efectividad del tratamiento depende de la sensibilidad del tipo de microorganismos, siendo mayor para las bacterias vegetativas, seguido por las levaduras, esporas y finalmente los virus, los cuales presentan mayor resistencia a la inactivación (Anderson *et al.*, 2000; Pommerville, 2004; Levy *et al.*, 2012; Rowan *et al.*, 1999).

## 3. Efectos en las características de calidad de los alimentos líquidos tratados mediante tecnologías con rayos UV

El uso de tecnologías que aplican radiación UV como efecto germicida ha sido evaluado con la finalidad de contrarrestar cambios de calidad negativos en los alimentos. Entre las principales preocupaciones de los consumidores se encuentra la formación de subproductos tóxicos durante el procesamiento de alimentos, como el furano; esta es una inquietud en cualquier tecnología de conservación de alimentos, en vista de su capacidad como producto cancerígeno inducido por el procesamiento térmico. Dicho efecto se observa principalmente en alimentos con alto contenido de azúcares reductores y proteína, como la leche o jugos, pues pueden llevar a cabo la reacción de Maillard, lo que promueve la producción de compuestos furanos, cambios de color y reduce el valor nutricional de los alimentos (Koutchma, 2010; Hartyáni *et al.*, 2011; Putnik *et al.*, 2020).

Sin embargo, se ha observado que el tratamiento por PL no tiene un efecto significativo en el índice de oscurecimiento enzimático (Caminiti *et al.*, 2011; Mandal *et al.*, 2020; Muñoz, Caminiti, *et al.*, 2012; Palgan *et al.*, 2011b) ni en la composición de aminoácidos en productos lácteos (Elmnasser *et al.*, 2008), aunque aún se requieren mayores investigaciones. De igual manera, los alimentos con alto contenido de compuestos oxidantes tratados a partir de irradiación PL presentan una mayor reducción de la actividad enzimática tanto para polifenol oxidasa como de peroxidasa, en contraste con los alimentos pasteurizados mediante tratamientos térmicos (Manzocco *et al.*, 2013; Vollmer *et al.*, 2020). Sin embargo, se ha reportado que para minimizar este efecto es importante tomar en cuenta la distancia óptima entre la lámpara y la muestra, con el propósito de que este proceso no sea contraproducente ni se produzcan olores y/o sabores desagradables en el producto tratado por PL (Cassar *et al.*, 2020; Elmnasser *et al.*, 2008). Además, se han determinado menores pérdidas de la capacidad antioxidante, de 6 a 14 % (Palgan *et al.*, 2011b; Barba y Grimi, 2015; Vollmer *et al.*, 2020) al igual que en la concentración de ácido ascórbico, no mayor al 30 %, en los alimentos tratados mediante PL en comparación con aquellos pasteurizados mediante tratamientos térmicos, los cuales alcanzan pérdidas de hasta un 27 % en la capacidad antioxidante y del 60 % para vitamina C (Vollmer *et al.*, 2020).

Referente a los tratamientos mediante UV-BP, el efecto fotoquímico en los alimentos depende de la absorción de fotones y la cantidad de energía que se transmite a la superficie del producto. Estos equipos operan a una longitud de onda de 253.7 nm, rango en el cual los fotones contienen 112.8 kcal/fotón de energía radiante, que tiene la energía necesaria para interrumpir los puentes de hidrógeno, enlaces carbono-carbono, carbono-hidrógeno, carbono-nitrógeno, enlaces dihidrógeno y enlaces disulfuro (Juarez-Enriquez *et al.*, 2016; Koutchma, 2019a, 2019c; Souza *et al.*, 2019). Por lo tanto, la sensibilidad que presenta el producto a la radiación UV dependerá de la estructura química de cada alimento y estará también correlacionada con los nutrientes que presentarán mayor sensibilidad a la luz UV (Cassar *et al.*, 2020). Entre los nutrientes con mayor susceptibilidad se encuentran los compuestos termosensibles como la vitamina A, los carotenos, la cianocobalamina (vitamina B12), la vitamina D, el ácido fólico, la vitamina K, la riboflavina (vitamina B2), los tocoferoles (vita-

mina E), el triptófano y los ácidos grasos insaturados, al igual que algunos pigmentos naturales (Pirozzi *et al.*, 2020). Se ha reportado que la sensibilidad al uso de luz UV en estos compuestos se debe a altas dosis de energía emitidas al producto, tiempos prolongados de tratamiento y la relación existente entre la distancia del equipo y la dosis de energía suministrada a la muestra, lo cual provoca un efecto térmico que puede generar un incremento en la temperatura del medio, superando las temperaturas óptimas de tratamiento, y por lo tanto una degradación parcial o total de los compuestos termosensibles (Koutchma, 2008; Delgado *et al.*, 2012; Gómez-López *et al.*, 2012; Dhar y Chakraborty, 2020; Vollmer *et al.*, 2020).

A pesar de la sensibilidad de algunos nutrientes, se ha observado que los tratamientos mediante UV-BP pueden mejorar varias propiedades nutraceuticas en la fruta (Koutchma, 2019b; Cassar *et al.*, 2020), entre ellas, aumenta la cantidad de antioxidantes en frutas o verduras previamente cortadas, como uvas, peras, manzanas, arándanos, mangos, naranjas, toronjas y zanahorias (Du *et al.*, 2012; Cassar *et al.*, 2020); este efecto se debe a la activación de la síntesis de algunos aminoácidos, como la fenilalanina en uva y zanahoria, la cual es inducida por el corte de los productos. Ello, al combinarlo con una fuente de estrés abiótico, como la radiación UV, puede potencializar sinérgicamente la acumulación de compuestos fenólicos solubles y con ello incrementar la capacidad antioxidante de los productos. En este sentido, aún se requiere una investigación más exhaustiva respecto al rango de luz UV que contribuye en mayor medida a este incremento, así como determinar si dicho efecto es también observado en productos líquidos (Du *et al.*, 2014; Mäkilä *et al.*, 2016; Surjadinata *et al.*, 2017; Cassar *et al.*, 2020). También se ha observado que el tratamiento mediante luz UV previo a la extracción de jugos en frutas produce excelentes resultados en el contenido fitoquímico de los mismos (González-Barrio *et al.*, 2009; Juarez-Enriquez *et al.*, 2016; Vollmer *et al.*, 2020). Del mismo modo, se ha demostrado que los tratamientos con irradiación UV no afectan los parámetros de color en jugos y néctares tratados con una fluencia entre 30 y 2106 mJ/cm<sup>2</sup> (Gómez-López *et al.*, 2012; Akgün y Ünlütürk, 2017; Vipul *et al.*, 2018; Baykuş *et al.*, 2021); incluso se han observado mejoras en el color de jugos de manzana, melocotón y limón previamente tratados térmica-

mente para generar melanoidinas, por la reacción de fotólisis de estos compuestos poliméricos (Ibarz *et al.*, 2005). Adicionalmente, se ha determinado que los métodos que utilizan UV como fuente de irradiación no alteran el pH y los grados Brix de los productos tratados, ni las propiedades físicas de los alimentos líquidos, siempre y cuando no exista un efecto sinérgico en el aumento de la temperatura (Koutchma, 2008, 2019c; Palgan *et al.*, 2011b; Muñoz *et al.*, 2012; Ferrario y Guerrero, 2016; Akgün y Ünlütürk, 2017; Pierscianowski *et al.*, 2021). Sin embargo, en algunas ocasiones los tratamientos mediante UV pueden alterar las características sensoriales de ciertos productos, como es el caso de la leche de cabra, donde Matak *et al.* (2007) reportaron un aroma a estiércol, fétido y a corral en el producto tratado con una dosis mayor al 15.8 mJ/cm<sup>2</sup>. Por otro lado, Guevara *et al.* (2012) notificaron cambios sensoriales detectables cuando los jugos de guayaba y maracuyá recibían un tratamiento con 3640 mJ/cm<sup>2</sup>.

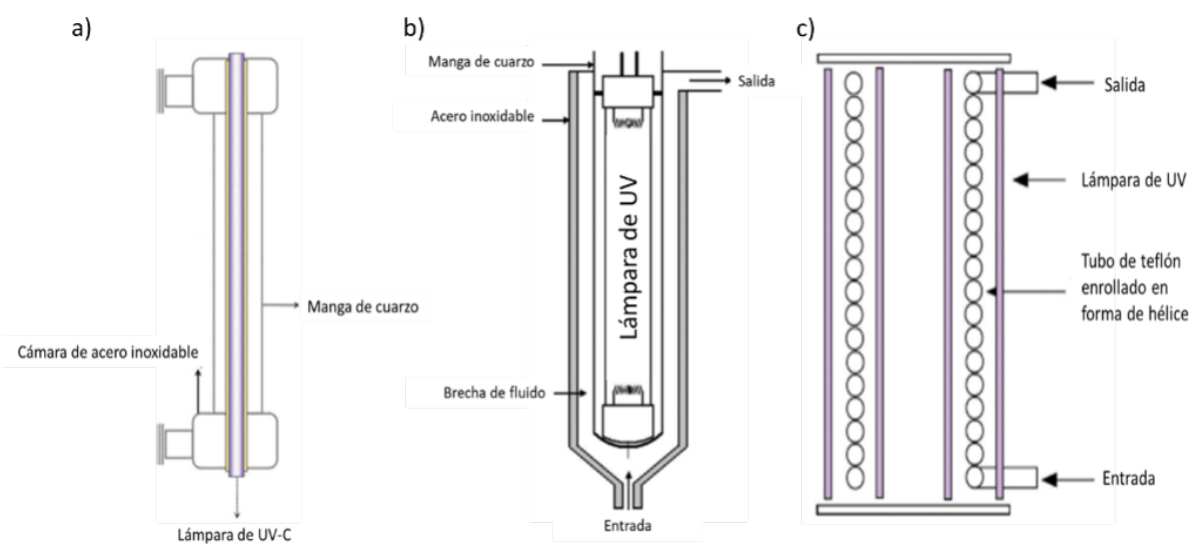
Adicionalmente, gracias a la baja emisión de calor que presentan los UV-LEDs, esta tecnología ha podido reducir los cambios asociados al calentamiento en la calidad de los alimentos, lo cual logra retrasar la senescencia y mejorar el contenido fitoquímico y nutricional (Nyangaresi *et al.*, 2018; Chevremont, Marie, *et al.*, 2019; Souza y Koutchma, 2020). A pesar de que aún es reciente el estudio de alimentos líquidos tratados mediante UV-LEDs, se ha observado que, al igual que los PL, este tratamiento es capaz de

reducir el oscurecimiento enzimático, aunque todavía es necesario investigar más sobre su efecto durante el procesamiento por operación continua (Akgün y Ünlütürk, 2017; Lante *et al.*, 2016).

#### 4. Diseño y operación de equipos para su implementación en sistemas de operación continua

##### 4.1. Luz ultravioleta a baja presión (UV-BP)

A la fecha se han desarrollado y validado diferentes equipos de UV-BP en sistema de flujo continuo para una gran variedad de bebidas, desde leche, proteína de suero, sidras, jugos y néctares (Koutchma, 2010; Gómez-López *et al.*, 2012; Hu *et al.*, 2018; Ahmed *et al.*, 2019; Dhahir *et al.*, 2020; Gouma *et al.*, 2020; Meléndez-Pizarro *et al.*, 2020). De igual manera, se han propuesto diferentes diseños de equipos para el procesamiento por operación continua, los cuales al optimizar los parámetros de operación han logrado una mayor efectividad en el tratamiento de fluidos alimenticios. Entre los diseños que han logrado incrementar el área de contacto entre la fuente de irradiación y la muestra se encuentran los equipos de tubo concéntrico (figura 3a) (Forney *et al.*, 2008; Ye *et al.*, 2007), el reactor anular de capa fina (figura 3b) (Ye *et al.*, 2007) y los equipos con tubo en espiral (figura 3c) (Mansor *et al.*, 2014).



**Figura 3.**

Esquema de equipos por UV-BP de tubo concéntrico (a), de película anular (b) y con tubo en espiral (c). Adaptada de Koutchma (2019b).

Durante la implementación de nuevos diseños de equipos, para cualquier conformación de UV-BP en el tratamiento de alimentos líquidos en sistema de operación en continuo, se debe considerar el tiempo de residencia del fluido que es irradiado mediante la luz UV, al igual que la distribución adecuada del fluido en función a la geometría del equipo; de igual manera, la dosis de energía o fluencia suministrada a la muestra ( $\text{mW}/\text{cm}^2$ ) y el caudal del flujo ( $\text{ml}/\text{min}$ ) determinan la efectividad de los tratamientos mediante UV-BP (Keklik y Krishnamurthy, 2012; Koutchma, 2019b, 2021; Souza *et al.*, 2019). En cambio, el campo de intensidad UV no uniforme, por la absorción de la radiación UV-C, varía dependiendo de las características ópticas del producto a tratar y determina el efecto de la inactivación en el fluido (Koutchma, 2008, 2019c).

Tomando en cuenta estas consideraciones, se observa que dependiendo del diseño del tubo de cuarzo por donde fluye la muestra, así como del tipo de fluido y los parámetros de operación, se ve alterado el efecto de inactivación de los microorganismos (tabla II). Del mismo modo, se ha observado que en fluidos

con comportamiento no newtoniano, como muestras de leche entera (Choudhary *et al.*, 2011; Ye *et al.*, 2007), aún en equipos que ayudan a maximizar el área de tratamiento, el efecto germicida mediante UV-BP es menor que en productos con comportamiento newtoniano, como agua de coco y algunos jugos (Ye *et al.*, 2007; Mansor *et al.*, 2014; Bhullar *et al.*, 2017). A su vez, Antonio-Gutiérrez *et al.* (2019) observaron que la recirculación continua del líquido a tratar y la distancia recorrida por el alimento a través de la lámpara de UV-C son variables que pueden afectar la inactivación mediante UV-C, por lo que su disposición debe evaluarse en función del efecto deseado en el alimento a tratar.

Por lo tanto, uno de los parámetros que ayudan a determinar la efectividad de este tratamiento, que generalmente no se considera o evalúa, es la caracterización de las propiedades de transporte de la muestra previo al tratamiento, las cuales pueden ayudar a estimar el rendimiento del sistema de UV-BP y la dosis de energía requerida por cada producto (Gómez-López *et al.*, 2012; Gautam *et al.*, 2017; Jarvis *et al.*, 2019).

**Tabla II.** Estudios del efecto del procesamiento por luz ultravioleta a baja presión en operación continua en alimentos

Microorganismo	Producto	Tratamiento	Resultados	Referencia
<i>E. coli</i> W1485 y <i>Bacillus cereus</i>	Leche entera y descremada	Flujo: 25 a 100 $\text{ml}/\text{min}$ ; tiempo de residencia: 11.3 s; dosis de energía: $11.187 \text{ mJ}/\text{cm}^2$	7.8 log UFC/ml para <i>E. coli</i> en leche descremada 4.1 log UFC/ml para <i>E. coli</i> en leche entera 2.72 log UFC/ml	Choudhary, Watson, y Haddock (2011)
<i>Salmonella</i> , <i>Shigella spp.</i> , <i>Listeria monocytogenes</i> , <i>Staphylococcus spp.</i> , <i>Enterobacteriaceae</i> , bacterias ácido lácticas, <i>Pseudomonas</i> y bacterias aeróbicas totales	Leche	Flujo: 113 a 480 $\text{ml}/\text{min}$ ; tiempo de residencia: 1 a 20 s; dosis de energía: $5.3 \text{ a } 20.5 \text{ mJ}/\text{cm}^2$	3-4 log UFC/ml a $20.5 \text{ mJ}/\text{cm}^2$	Lu, Li, y Liu (2011)
<i>Salmonella typhimurium</i>	Jugo de piña	Flujo: 7.8 a 121 $\text{ml}/\text{min}$ ; tiempo de residencia: 15.14 a 23.36 s; dosis de energía: $13.75 \text{ a } 10.37 \text{ mJ}/\text{cm}^2$	5 log UFC/ml a $13.75 \text{ mJ}/\text{cm}^2$	Mansor, Shamsudin, Mohd, y Nizar (2014)
Virus (MS2, TIUV), <i>E. coli</i> ATCC 25922, <i>Salmonella typhimurium</i> ATCC 13311 y <i>Listeria monocytogenes</i> ATCC 19115	Agua de coco	Fluencia: 5 a 30 $\text{mJ}/\text{cm}^2$ ; flujo: 58.62 a 221 $\text{ml}/\text{min}$ ; dosis de energía: 0 a 400 $\text{mJ}/\text{cm}^2$	>5 log UFC/ml a $30 \text{ mJ}/\text{cm}^2$	Bhullar <i>et al.</i> (2017)

#### 4.2. Diodos emisores de luz ultravioleta (UV-LEDs)

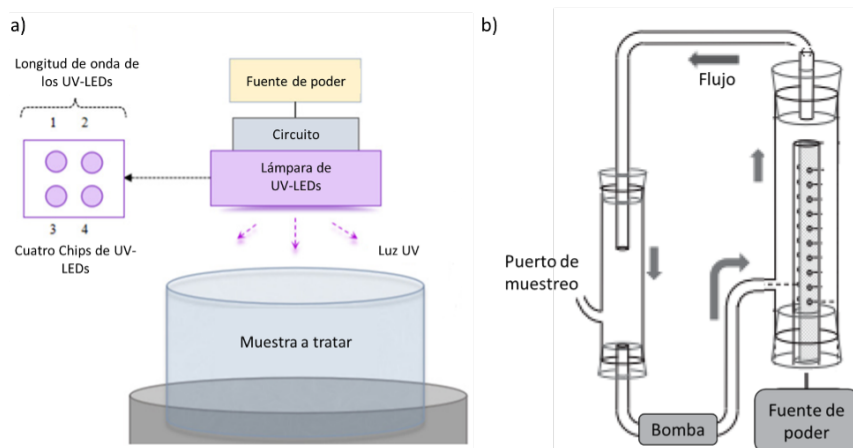
Como se describió anteriormente, los UV-LEDs son dispositivos que utilizan materiales para convertir la corriente continua (CC) en luz de longitud de onda de emisión variable mediante la unión de tipo *n* (electrón) y *p* (agujero). Dentro de las variables de diseño de los equipos se deben contemplar la longitud de onda electromagnética seleccionada dentro del espectro UV, la distancia entre la muestra y la fuente de luz y las condiciones ambientales dentro del equipo, que incluyen la temperatura del proceso y el plano claro/oscuro (Song *et al.*, 2016; Hinds *et al.*, 2019; Prasad *et al.*, 2019).

Generalmente los equipos de UV-LEDs en sistema por lote constan de un circuito integrado que contiene la lámpara junto con el arreglo de los chips de UV-LEDs, ya sea en el arreglo de chips únicos o en chips múltiples, cada uno con manejo térmico, los cuales emite la luz UV previamente seleccionada (UV-A, UV-B o UV-C) desde la fuente de poder hacia la muestra colocada debajo de la lámpara de UV-LEDs (figura 4a). A la fecha se han desarrollado reactores de flujo continuo, principalmente para la desinfección de agua potable a escala piloto; entre ellos destaca el diseño de Kolbe *et al.* (2010), que combina el tratamiento por lote, a partir de la acumulación del producto líquido a tratar en el tanque de capacitación, junto con el tratamiento por flujo continuo. En tanto que Oguma *et al.* (2013) desarrollaron un equipo a partir de tres matrices rectangulares, cada una con diez UV-LEDs, donde los tres conjuntos se agrupaban para construir un prisma triangular, que se colocaba en un manguito de cuarzo y era sumergido en el centro del cilindro (figura 4b). De igual manera, Jarvis *et al.* (2019) diseñaron un arreglo en espiral para el tratamiento en continuo de agua potable, el cual compara la eficiencia de un reactor de UV-LEDs en espiral a escala piloto de 3.15 l contra un reactor de haz colimado UV-BP,

donde se observó que los UV-LEDs a gran escala son igualmente eficientes que los reactores de UV con lámpara mercurio convencionales, tanto en las condiciones de calidad de agua como en la corriente de accionamiento.

A pesar de que existen reportes del escalamiento de equipos de UV-LEDs en sistemas de operación continua, la mayoría de las aplicaciones hasta ahora evalúan el tratamiento de agua potable, donde se han reportado inactivaciones de hasta 7 log UFC/ml para *E. coli* (Chevremont *et al.*, 2019; Kim y Kang, 2021). Aunque hay algunos estudios en alimentos líquidos (tabla III) donde, al igual que en el tratamiento de agua, se observan resultados favorables para su aplicación en el área alimentaria, obteniendo reducciones de hasta 7.5 log UFC/ml en *E. coli* para jugos y bebidas preparadas a base de frutas a diferentes longitudes de onda (Popovi y Koutchma, 2020; Pierscianowski *et al.* 2021), aún es necesario ampliar la investigación en este tipo de tratamientos en el ámbito alimenticio.

Por su parte, la efectividad de la inactivación por UV-LEDs se determina mediante la fluencia promedio emitida al microorganismo objetivo, que puede establecerse por la tasa de fluencia ( $\text{mW}/\text{cm}^2$ ) y la irradiancia ( $\text{mW}/\text{cm}^2$ ). La tasa de fluencia se define como la potencia radiante total incidente desde todas las direcciones sobre una pequeña esfera dividida por el área de la sección transversal de dicha esfera. Mientras que la irradiancia está definida como la potencia radiante de todas las longitudes de onda, que inciden desde todas las direcciones hacia arriba en un pequeño elemento de superficie que contiene el punto en consideración, dividido por el área del elemento (Kheyrandish *et al.*, 2018; Hinds *et al.*, 2019). De igual manera, si la tasa de fluencia es constante en el tiempo, la fluencia ( $\text{mJ}/\text{cm}^2$ ) se puede calcular como la tasa de fluencia multiplicada por el tiempo de exposición de la muestra (Kheyrandish *et al.*, 2018).



**Figura 4.**

Esquema de equipos UV-LEDs en sistema de operación por lote (a) y diseño de UV-LEDs en sistema de operación continua a partir del arreglo de diez chips UV-LEDs (b). Adaptada de Li *et al.* (2019) y Oguma *et al.* (2013).

**Tabla III.** Estudios del efecto del procesamiento por diodos emisores de luz ultravioleta en operación continua en alimentos

Microorganismo	Producto	Tratamiento	Resultados	Referencia
<i>E. coli</i>	Agua	Longitud de onda: 405, 254/365, 280/365, 280/405 nm; tiempo de residencia: 30 s	7 log UFC/ml a 254/365, 280/365, 280/405 nm	Chevremont, Farnet da Silva, Sergent, <i>et al.</i> (2019)
<i>E. coli</i> P36	Solución salina Jugo verde Jugo de remolacha Agua de coco Limonada azul Limonada rosa	Longitud de onda: 266, 276 y 281 nm; flujo: 8 y 16 ml/s; fluencia: 5 a 30 mJ/cm <sup>2</sup> ; tiempo de residencia: 0.19 y 0.38 s	7.5 log UFC/ml en limonada azul a 15 mJ/cm <sup>2</sup>	Popovi y Koutchma (2020)
<i>E. coli</i> P36	Jugo de kale	Longitud de onda: 253.7 nm; flujo: 2.32 ml/s; fluencia: 0 a 150 mJ/cm <sup>2</sup> ; tiempo de residencia: 30.2 s	5.8 log UFC/ml a 150 mJ/cm <sup>2</sup>	Pierscianowski <i>et al.</i> (2021)
<i>E. coli</i> O157:H7	Agua	Longitud de onda: 280 nm; flujo: 33.33 ml/s; dosis: 0 a 1406.2 mJ/cm <sup>2</sup> ; tiempo de residencia: 0.89s	7 log UFC/ml a 1406.2 mJ/cm <sup>2</sup>	Kim y Kang (2021)

### 4.3. Pulsos de luz

Los equipos de PL operados mediante flujo continuo (figuras 5a y 5b) están diseñados para procesar productos líquidos a partir del bombeo del sustrato por la cámara de tratamiento a través de un tubo de cuarzo, el cual permite la incidencia de destellos de luz mediante la lámpara de xenón (Popovi y Koutchma, 2020). La efectividad de los PL para la inactivación de microorganismos en alimentos depende de factores de procesamiento y diseño que son críticos para garantizar el tratamiento, en razón de que pueden llegar a afectar la homogeneidad del proceso y el nivel de energía aplicada a la muestra (Koutchma, 2008; Gómez-López *et al.*, 2012; Cassar *et al.*, 2020; Pirozzi *et al.*, 2020).

Los parámetros de procesamiento afectan considerablemente la inactivación de microorganismos; entre ellos, el factor más importante que determina la eficiencia es la fluencia total o la cantidad total de fotones incidentes en la muestra, por lo que la optimización del tratamiento por PL se obtiene mediante la selección adecuada de los parámetros que afectan la fluencia total. Los factores elementales a considerar son el volumen del tubo de cuarzo, el caudal del alimento líquido que pasa a través del tubo de cuarzo durante el tratamiento, la distancia entre la muestra y la lámpara, el tiempo de exposición, además del

número, la duración y la frecuencia de los pulsos impartidos por el equipo (Pirozzi *et al.*, 2020). Optimizar dichos parámetros de operación permite que la fluencia total aumente y el efecto germicida mejore. Del mismo modo, es necesario realizar mediciones en cuanto a la dosis de energía en la superficie o dentro de la muestra tratada por PL, ya que la energía en el producto es diferente a la energía entregada por la fuente de luz, debido a las pérdidas de radiación que existen durante la trayectoria de los pulsos de luz a causa de fenómenos de absorción y dispersión de la luz (Koutchma, 2009; Gómez-López *et al.*, 2012; Pirozzi *et al.*, 2020).

Los parámetros por considerar en el diseño de equipos de PL son la geometría y la configuración de la cámara de tratamiento, el número de lámparas y el deflector, los cuales influyen significativamente en la uniformidad del tratamiento y, por lo tanto, en la eficiencia del proceso y en la calidad del producto a tratar (Bhavva y Hebbar, 2017; Pirozzi *et al.*, 2020). También se debe tomar en cuenta el ajuste de la corriente eléctrica, ya que este parámetro ayuda a seleccionar los rangos de longitud de onda más adecuados emitidos por la lámpara, lo cual contribuye en el efecto germicida deseado y minimiza los cambios de las propiedades del sustrato (Orlowska *et al.*, 2013).

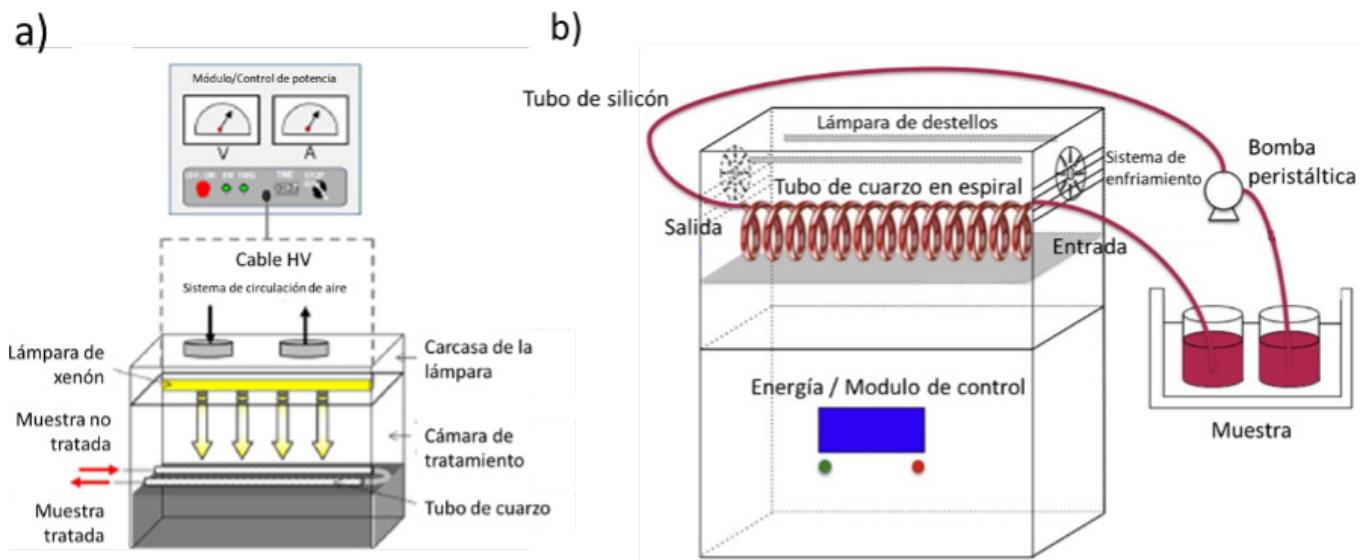


Figura 5.

Esquema de un sistema de PL en modo de operación continua para líquidos a partir de dos tubos de cuarzo (a) y con tubo de cuarzo en espiral (b). Adaptada de Pirozzi *et al.* (2020) y Xu *et al.* (2019).

Entre los equipos de PL convencionales se encuentran el estudiado por Krishnamurthy *et al.* (2007), donde el líquido es bombeado a través de un tubo de cuarzo a una velocidad entre 20 y 40 ml/min y la muestra es irradiada por la lámpara de xenón a diferentes números de pulsos, entre 1 y 3, con una fluencia de 1.27 J/cm<sup>2</sup>, lo cual logra una alta reducción microbiana, 7.5 log UFC/ml para *S. aureus*, a una baja tasa de flujo. La optimización de este tipo de tratamiento se puede lograr a partir del incremento de tubos de cuarzo, como se observa en el estudio de Pataro *et al.* (2011), donde a partir de la recirculación del alimento tratado por la luz incidente se logró reducir hasta 5 y 3 log UFC/ml para *L. innocua* y *E. coli* en jugo de manzana y naranja, respectivamente (tabla IV). De igual manera, entre los sistemas de operación más innovadores y que han presentado resultados favorables se encuentra el proceso propuesto por Xu *et al.* (2019); un ejemplo del ensamble se muestra en la figura 5b, que comprende un sistema en espiral a través del cual fluye el alimento y es irradiado por dos lámparas de xenón desde la parte superior de la cámara de tratamiento, lo cual logra una inactivación para *E. coli* hasta de 4 log UFC/ml en

jugo de uva. Comparando dichos resultados con los obtenidos por Pataro *et al.* (2011) —a pesar de no ser el mismo alimento estudiado— y tomando en cuenta que el jugo de naranja y el jugo de uva son dos de los productos que presentan mayor resistencia a la inactivación de microorganismos por sus características ópticas, se puede observar que el tratamiento en espiral aumenta el área de tratamiento y, por lo tanto, existe un mayor efecto en la inactivación de microorganismos.

Finalmente, entre los efectos que se deben contrarrestar en este tipo de tratamientos (UV-BP, UV-LEDs y PL) se encuentra el aumento de la temperatura en la muestra expuesta a la radiación UV, lo cual puede llegar a comprometer la calidad de los alimentos, principalmente en tratamientos prolongados, además de que es posible obtener un efecto sinérgico entre la irradiación UV y el tratamiento térmico. Para ello, se sugiere incorporar sistemas de refrigeración y establecer una adecuada velocidad de flujo de la muestra y repetición de los pulsos o de la dosis de energía suministrada a la muestra, además de la adecuada selección de la distancia entre el alimento y la fuente de luz (Xu *et al.*, 2019; Putnik *et al.*, 2020; Vollmer *et al.*, 2020).

**Tabla IV.** Estudios del efecto del procesamiento por pulsos de luz en operación continua en alimentos

Microorganismo	Producto	Tratamiento	Resultados	Referencia
<i>S. aureus</i>	Leche	Fluencia: 1.27 J/cm <sup>2</sup> /pulso; distancia: 5 a 11 cm; tasa de flujo: 0.33 a 0.66 ml/s	7.23 log UFC/ml a 8 cm y 0.33 ml/s	Krishnamurthy <i>et al.</i> (2007)
<i>Listeria innocua</i> 11288 y <i>Escherichia coli</i> DH5- $\alpha$	Jugo de manzana y jugo de naranja	Dosis de energía: 1.8 a 5.5 J/cm <sup>2</sup> ; distancia: 5.8 cm; tasa de flujo: 0.21 a 0.64 ml/s	Jugo de manzana: 5 log UFC/ml para <i>E. coli</i> a 5 J/cm <sup>2</sup> , 5.5 log UFC/ml para <i>L. innocua</i> a 5.5 J/cm <sup>2</sup> Jugo de naranja: 3 log UFC/ml para <i>E. coli</i> a 5 J/cm <sup>2</sup> , 0.93 log UFC/ml para <i>L. innocua</i> a 5.5 J/cm <sup>2</sup>	Pataro <i>et al.</i> (2011)
<i>L. innocua</i>	Agua	Fluencia total: 10 J/cm <sup>2</sup> ; espesor del líquido: 2.15 a 6.23 mm; tasa de flujo: 16.66 a 83.33 ml/s	>5 log UFC/ml a 16.66 ml/s	Artíguez, Lasagabaster, y Maraión (2011)
<i>L. innocua</i>	Suero de leche, suero desnatado y diluciones de suero	Fluencia: 0.11 y 11 J/cm <sup>2</sup> ; tasa de flujo: 83.33 ml/s	Suero y suero desnatado: 1.6 log UFC/ml a 11 J/cm <sup>2</sup> Diluciones de suero: >5 log UFC/ml en diluciones a 11 J/cm <sup>2</sup>	Artíguez y Martínez de Maraión (2015)
<i>E. coli</i>	Jugo de uva roja	Fluencia: 0.13, 0.40 y 0.66 J/cm <sup>2</sup> /pulso; distancia: 10 cm; flujo en espiral: 0, 0.5 y 1 ml/s; pulsos: 10, 2, 40, 60, 80 y 100	4 log UFC/ml a 0.66 J/cm <sup>2</sup> /pulso, 40 ml/min y 80 pulsos	Xu <i>et al.</i> (2019)

## 5. Combinación de tecnologías emergentes con radiación UV para el procesamiento de alimentos líquidos

La combinación de tratamientos no térmicos y/o térmicos en conjunto con los tratamientos por UV ha sido evaluada con la finalidad de aumentar el efecto germicida de estos procesos. Entre algunos de los estudios que han ayudado a incrementar la inactivación microbiana se encuentra el trabajo realizado por Muñoz *et al.* (2012) (tabla V) donde se evaluó la combinación de diferentes tratamientos no térmicos y antimicrobianos, tras lo cual se observó que una de las combinaciones más efectivas es mediante el uso de PL y campos eléctricos pulsados (PEF); así, el efecto germicida incrementó casi el doble respecto a lo obtenido únicamente mediante PL, alcanzando una inactivación para *E. coli*, de 3.6 log UFC/ml por el efecto de PL simple y de 6.6 log UFC/ml por la combinación de PL y PEF. A pesar de lo obtenido para *E. coli*, se observó que este efecto no fue el mismo para *Listeria innocua*, pues únicamente se logró una reducción no mayor a 2.8 log UFC/ml en la combinación por PL y PEF, probablemente porque las bacterias Gram positivas son menos sensibles a los tratamientos por UV.

También se ha analizado la combinación de PL y termosonicación (TS) en jugo de manzana para inactivar *E. coli*, donde se utilizó una tasa de flujo de 13.5 ml/min y una distancia entre la lámpara y la muestra de 1.9 cm para el tratamiento mediante PL, mientras que por TS se usó una tasa de flujo de 8 ml/min, con un tiempo de residencia de cinco minutos. La combinación de los tratamientos se realizó a partir de la colocación de forma seriada del equipo de TS seguido del equipo de PL. El diseño del equipo de PL utilizado por Muñoz *et al.* (2012) integraba dos tubos de cuarzo por donde se transportaba el fluido alimenticio, con el cual logró una reducción de 4.9 log UFC/ml para *E. coli*. En cambio, el tratamiento individual mediante TS solo logró inactivar 2.6 log UFC/ml de *E. coli*. Sin embargo, al evaluar el efecto combinado se obtuvo una reducción de 5.9 log UFC/ml para *E. coli*, lo cual sugiere que la combinación de tratamientos no térmicos con diferentes mecanismos tiene un efecto significativo en la inactivación de microorganismos.

Del mismo modo, el efecto combinado de tecnologías o tratamientos se ha estudiado en los procesos mediante UV-BP. La Cava y Sgroppo (2019) y Pagal y Gabriel (2020) estudiaron el efecto germicida mediante UV-C combinado con un tratamiento térmico leve o medio, de 53 a 63 °C. A pesar de la similitud en las investigaciones, se observó una reducción mayor a 6 log UFC/ml en el tratamiento realizado por Pagal y Gabriel (2020) para jugo de naranja, a diferencia de La Cava y Sgroppo (2019), los cuales solo lograron inactivar 4.99 log UFC/ml en jugo de uva; ello podría deberse al orden de aplicación del tratamiento por UV-C en la muestra. Debido a que Pagal y Gabriel (2020) realizaron primero un tratamiento térmico leve de 53°C, seguido del tratamiento por UV-C, de igual manera, la eficiencia en el efecto germicida en ambos estudios pudo ser causado por las características de la matriz de los alimentos tratados.

Por otra parte, Gómez-Sánchez *et al.* (2020) realizaron la combinación entre UV-C y microondas (MW), a partir de la implementación de sistemas en espiral, con la finalidad de evaluar el efecto sinérgico que existía entre ambas tecnologías, así como el efecto del arreglo durante la combinación de tratamientos en la inactivación de *Saccharomyces cerevisiae* y *E. coli*. Se observó que la combinación de ambos procesos aumenta la inactivación de los microorganismos, a causa de un efecto sinérgico. De igual manera, durante esta investigación se evidenció que el orden de aplicación de los distintos tratamientos, así como los patrones de flujo, eran significativos en el efecto germicida de la muestra, donde el arreglo UV-C seguido de MW con una tasa de flujo de 400 ml/min logra una mayor reducción en los microorganismos, alrededor de seis ciclos logarítmicos, en comparación con el arreglo inverso o de forma individual.

Finalmente, es importante resaltar que las investigaciones de los tratamientos por UV-LEDs en alimentos aún son limitadas y en su mayoría se han centrado en sistemas de operación por lote, sin la combinación con otros tratamientos térmicos y no térmicos. La incipiente aplicación de UV-LEDs abre la posibilidad para futuras investigaciones en sistema de operación continua y el efecto sinérgico al combinarse con otros tratamientos.

**Tabla V.** Combinación de tratamientos por irradiación ultravioleta con tratamientos térmicos o no térmicos

Microorganismo	Producto	Tratamiento	Resultados	Referencia
<i>E. coli</i> y <i>L. innocua</i>	Sistema buffer	Pulsos de luz (PL): dosis de energía: 3.3 J/cm <sup>2</sup> ; distancia: 1.9 cm	PL: 3.6 log UFC/ml <i>E. coli</i> y 2.7 log UFC/ml <i>L. innocua</i> a 3.3 J/cm <sup>2</sup>	Muñoz et al. (2012)
		Combinación PL+campos eléctricos pulsados (PEF): intensidad de campo eléctrico: 24 kV/cm; frecuencia: 18 Hz; ancho de pulso: 1 μs	PL+PEF: 6.6 log UFC/ml para <i>E. coli</i> y 6.6 log UFC/ml para <i>L. innocua</i>	
		Combinación PL+ultrasonido (US): entrada de energía: 100J/ml; tiempo de residencia: 126 s; potencia de salida: 500 W; temperatura: 40 °C	PL+US: 3.9 log UFC/ml para <i>E. coli</i>	
		Combinación PL+antimicrobiano: ácido láctico (AL), nisina (Ni) 2.5 mg/l	PL+AL: 4.0 log UFC/ml con ácido láctico en <i>E. coli</i>	
			PL+Ni: 3.2 log UFC/ml con nisina en <i>L. innocua</i>	
Combinación de tres tratamientos: PL+AL+(PEF o US)	PL+AL+PEF: 6.6 log UFC/ml para <i>E. coli</i> PL+AL+US: 5.5 log UFC/ml			
<i>E. coli</i>	Jugo de manzana	Pulsos de luz (PL): fluencia: 1.21 J/cm <sup>2</sup> /pulso; distancia: 1.9 cm; tasa de flujo: 13.4 a 17 ml/min; dosis de energía: 4.03 y 5.10 J/cm <sup>2</sup>	PL: 4.9 log UFC/ml a 5.1 J/cm <sup>2</sup>	Muñoz et al. (2012b)
		Termosonificación (TS): tasa de flujo: 8 y 14 ml/min; tiempo de residencia: 171 y 300 s	TS: 2.6 log UFC/ml a 2531 J/ml en 5 min	
		Combinación de dos tratamientos: PL+TS	TS+PL o PL+TS: 5.9 log UFC/ml a 4.03 J/cm <sup>2</sup> mediante PL y 5 min a 2531 J/ml mediante TS	
Mesófilos aerobios y levaduras de la fruta	Jugo de uva	UV-C: dosis de energía: 39.6 J/L; tasa de flujo: 4.26 ml/min tubo en espiral	UV-C: 4.10 y 4.08 log UFC/ml para aerobios totales y levaduras, respectivamente	La Cava y Sgroppo (2019)
		Tratamiento térmico (TT): 65 °C	TT: 2.28 y 2.24 log UFC/ml para aerobios totales y levaduras, respectivamente	
		Combinación de dos tratamientos: UV-C+TT	UV-C+TT: 4.99 a 5.14 log UFC/ml para aerobios totales y levaduras, respectivamente	
<i>Escherichia coli</i> O157:H7	Jugo de naranja	Combinación UV-C+TT (53 °C); dosis de energía: 1.14 mW/m <sup>2</sup> ; tiempo de tratamiento: 0 a 5000 s	TT+UV-C: 6.35 log UFC/ml	Pagal y Gabriel (2020)

## 6. Ventajas y desventajas de las tecnologías emergentes que emplean radiación UV

Entre las ventajas que presenta el uso de PL (tabla VI) en comparación con otras tecnologías, se encuentra la eficiencia en la inactivación de una gran variedad de patógenos por su mecanismo de inactivación, que combina luz UV de amplio espectro junto con destellos de luz de alta potencia a partir de lámparas de xenón. Ello resulta en un tratamiento libre de mercurio, en contraste con el uso de luz UV a baja presión, y con mayor

eficiencia, en virtud de la transmisión instantánea de energía intensa suministrada al alimento tratado, traducido en tiempos cortos de procesamiento, entre segundos a milésimas de segundo, a pesar de que ambos equipos requieren de un previo calentamiento. Por otro lado, su combinación con otros tratamientos tanto térmicos como no térmicos o incluso con compuestos químicos consigue potencializar el efecto de los PL en la inactivación de microorganismos (Gómez-López *et al.*, 2007, 2012).

**Tabla VI.** Comparación entre fuentes de irradiación ultravioleta continua y pulsada

Fuente	Lámpara de UV de mercurio <sup>1,2</sup>	Lámpara LED <sup>4</sup>	PL xenón <sup>1,3</sup>
Tipo de irradiación	UV-C	UV-C a UV-A	UV-C a UV-A, luz visible e irradiación
Rango de espectro (nm)	253.7	250-400	170-1000
Tipo de irradiación	Continuo	Continuo	Pulsado
Espectro	Monocromático	Monocromático	Policromático
Eficiencia (%)	30-33	>5	10
Intensidad	mW/área	mW/área	kW/área
Salida de potencia óptica	5-80 W	0.1-100 mW	0-380 kW
Tiempo de tratamiento	Minutos	Minutos a horas	Milisegundos
Tiempo de encendido	Minutos	Instantáneo	Minutos
Durabilidad	Frágil	Riguroso	Frágil
Vida útil de la fuente de irradiación	18,000 horas	50,000 horas	80,000 horas

Gómez-López *et al.* (2012)<sup>1</sup>; Koutchma (2008<sup>2</sup>, 2019<sup>3</sup>); Koutchma *et al.* (2019)<sup>4</sup>.

Sin embargo, a pesar de que los PL presentan bajos costos de operación, el costo de inversión inicial y la corta vida útil de las lámparas de xenón utilizada en los tratamientos por PL convierten a esta tecnología en un método que requiere de una

inversión constante para el reemplazo de las lámparas, lo cual ha limitado su implementación a escala industrial (Gómez-López *et al.*, 2012). Además, algunos autores han reportado sobrecalentamiento durante el tratamiento de las muestras, al igual

que durante algunos tratamientos por UV continua, lo cual se puede contrarrestar colocando sistemas de enfriamiento previo y/o posterior a los procesos; la implementación de estos dispositivos de enfriamiento incrementa también el costo de operación (Gómez-López *et al.*, 2012; Orłowska *et al.*, 2013; Koutchma, 2019a; Cassar *et al.*, 2020).

Por su parte, algunas ventajas de los equipos de UV-BP son el corto tiempo de tratamiento, el rango del espectro utilizado y la alta eficiencia en su aplicación, entre 30 y 33 % de efectividad, a diferencia de los tratamientos por UV-LEDs y PL (Bolton y Cotton, 2008; Ye y Forney, 2008). Por el contrario, una desventaja de este tratamiento es el uso de lámparas de mercurio como fuente luminiscente, pues además de ser peligrosas porque emplean un compuesto tóxico, tienen cubiertas de vidrio susceptibles a fracturas, una corta vida útil para su funcionamiento y un alto costo de reemplazo. De igual manera, se ha observado que el potencial de salida de las lámparas de mercurio disminuye significativamente a bajas temperaturas y, por lo tanto, requieren de tiempo de calentamiento previo a su funcionamiento para poder alcanzar la irradiación máxima requerida (Koutchma, 2008; Gómez-López *et al.*, 2012).

Referente a los UV-LEDs, estos ofrecen una gran ventaja por su capacidad para emitir una amplia variedad de longitudes de onda UV discreta a un bajo consumo de energía. Asimismo, las UV-LEDs tienen picos de emisión más amplios en contraste con las lámparas de UV-BP, lo cual ayuda a aumentar su capacidad germicida (Koutchma, 2019b). Del mismo modo, el bajo costo de requerimiento de energía y el tipo de materiales utilizados para su fabricación provoca que las lámparas de UV-LEDs presenten una mayor vida útil en comparación con los PL y UV-BP. Además, estos dispositivos pueden ser diseñados para producir luz UV-C continua a la longitud de onda germicida óptima contra un microorganismo específico, a diferencia de los equipos de UV-BP, que están limitados a una única emisión de luz de 253.7 nm (Nyangaresi *et al.*, 2018; Koutchma *et al.*, 2019; Cassar *et al.*, 2020). No obstante, aún es limitada su aplicación para el procesamiento de alimentos, principalmente en sistemas

de operación continua, y estos equipos solo presentan una eficiencia mayor al 5 %, menor en comparación con los PL y UV-BP (Song *et al.*, 2016).

De manera general, durante la implementación de las tres tecnologías discutidas se ha observado que la radiación UV-A no logra ser absorbida por el ADN, por lo cual este tipo de longitud de onda no tiene un efecto significativo en la inactivación microbiana. Sin embargo, se ha determinado que la longitud de onda electromagnética de 315 nm a 400 nm puede producir radicales hidroxilos que logran dañar las proteínas de las membranas bacterianas y con ello promover la inactivación de microorganismos, aunque en algunas ocasiones puede existir la fotorreactivación de las células microbianas. Aun cuando la luz UV-A puede causar la fotorreactivación, se ha encontrado que la mezcla de luz UV-A con UV-C puede lograr exitosamente la inactivación de microorganismos, gracias al efecto germicida de la luz UV-C y la capacidad de penetración de la luz UV-A en los líquidos que presentan mayor turbidez (Chevremont, Boudenne, Coulomb, y Farnet, 2013; Akgün y Ünlütürk, 2017; Kheyrandish *et al.*, 2018; Chevremont, Farnet da Silva, Coulomb, *et al.*, 2019), lo cual es una ventaja para los equipos que cuentan con un rango en el espectro UV-A, como los PL y UV-LEDs (Koutchma, 2019b).

Sin embargo, a causa del efecto de la refracción y transmisión de la luz que estas tecnologías requieren para su adecuado funcionamiento, la composición y la opacidad de los productos a tratar inciden en gran medida en la eficacia de los tratamientos; al respecto, diversos autores han señalado que el color y la turbidez de un líquido influyen en el coeficiente de absorción óptica del líquido (Gómez-López *et al.*, 2007, 2012; Koutchma, 2019b; Koutchma *et al.*, 2019). Por lo tanto, la capacidad de penetración de la luz UV, mediante UV-BP, PL y UV-LEDs, se ve reducida a medida que aumenta el coeficiente de absorción. Mientras que a medida que disminuye la capacidad de penetración, la tasa de inactivación también disminuirá, ya que el tratamiento no logra alcanzar la profundidad total del medio/alimento. Por ello, para maximizar la

eficiencia del procesamiento mediante UV es recomendable que los alimentos a tratar se expongan en capas delgadas y homogéneas frente a la fuente de irradiación UV (Song *et al.*, 2018; Koutchma *et al.*, 2019).

Finalmente, como se mencionó anteriormente, la inactivación de microorganismos depende de la distribución de la longitud de onda del pico de absorción, la cual varía entre cada microorganismo. Pero se ha observado que ciertos microorganismos presentan más de un pico de absorción de luz UV en diferentes longitudes de onda (Li *et al.*, 2019). Por lo tanto, el uso de equipos que operen a diferentes longitudes de onda aumenta la eficiencia del efecto germicida. A pesar de requerir mayores estudios respecto a este tema, es necesario implementar futuras investigaciones en el tratamiento de alimentos mediante equipos que utilicen diferentes longitudes de onda o la combinación de tratamientos no térmicos para la conservación de alimentos (Hinds *et al.*, 2019).

## CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

Diversos estudios han demostrado que los tratamientos mediante UV-BP, UV-LEDs y PL tienen el potencial de reemplazar los métodos tradicionales de pasteurización, aunque su efectividad depende de las características de la matriz de la muestra a tratar y de los parámetros de operación de los equipos, tales como la dosis de energía, la tasa del flujo del fluido y la distancia entre la fuente de luz. Por ello, la optimización de los parámetros de operación es importante para incrementar el efecto germicida de los tratamientos por radiación UV. Por otra parte, se ha observado que la combinación entre tecnologías que aplican

radiación UV junto con tratamientos térmicos y/o no térmicos puede aumentar la eficiencia en la inactivación. De igual forma, se ha determinado que el orden de aplicación de los tratamientos combinados tiene un efecto significativo en la pasteurización, pues el efecto puede ser aditivo o sinérgico dependiendo del tipo de tecnología implementada y los microorganismos presentes.

A pesar de que los resultados obtenidos por diversos autores en la aplicación de tecnologías emergentes mediante radiación UV en alimentos líquidos han sido favorables, todavía existen áreas de oportunidad en torno a la configuración de nuevos equipos, arreglos para la combinación de tratamientos, modelación y escalamiento de los mismos. Tal como se mostró en esta revisión, la tecnología con un mayor grado de desarrollo e implementación es el tratamiento mediante UV-BP, pues su efecto para la pasteurización de alimentos únicamente está determinado por una longitud de onda fija de 253.7 nm; seguido por el tratamiento mediante PL, ya que esta tecnología tiene la ventaja de reducir el tiempo del tratamiento de pasteurización a causa de la aplicación de radiación UV de amplio espectro y destellos de luz; pero el estudio de tratamientos mediante UV-LEDs es todavía incipiente, lo cual abre un área de oportunidad para su investigación e implementación en el procesamiento de alimentos líquidos.

## AGRADECIMIENTOS

C. Piñen Martínez agradece 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 el financiamiento de sus estudios de posgrado.

## 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.
- Ahmed, J., Ismail, M. y Farid, M. (2019). Investigate the efficacy of UV pretreatment on thermal inactivation of *Bacillus subtilis* spores in different types of milk. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 52, 387-393. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.02.002>
- Akgün, M. P. y Ünlütürk, S. (2017). Effects of ultraviolet light emitting diodes (LEDs) on microbial and enzyme inactivation of apple juice. *International Journal of Food Microbiology*, 260, 65-74. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2017.08.007>
- Anderson, J. G., Rowan, N. J., MacGregor, S. J., Fouracre, R. A. y Parish, O. (2000). Inactivation of food-borne enteropathogenic bacteria and spoilage fungi using pulsed-light. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 28(1), 83-88. <https://doi.org/10.1109/27.842870>
- Antonio-Gutiérrez, O., López-Díaz, A., Palou, E., López-Malo, A. y Ramírez-Corona, N. (2019). Characterization and effectiveness of short-wave ultraviolet irradiation reactors operating in continuous recirculation mode to inactivate *Saccharomyces cerevisiae* in grape juice. *Journal of Food Engineering*, 241, 88-96. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.08.011>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.10.019>
- Artíguez, Mari L., Lasagabaster, A. y Martínez, I. (2011). Factors affecting microbial inactivation by Pulsed Light in a continuous flow-through unit for liquid products treatment. *Italian Oral Surgery*, 1, 786-791. <https://doi.org/10.1016/j.profoo.2011.09.119>
- Artíguez, Mari L. y Martínez, I. (2015). Improved process for decontamination of whey by a continuous flow-through pulsed light system. *Food Control*, 47, 599-605. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.08.006>
- Barba, F. J. y Grimi, N. (2015). New approaches for the use of non-conventional cell disruption technologies to extract potential food additives and nutraceuticals from microalgae. *Food Eng Rev*, 45-62. <https://doi.org/10.1007/s12393-014-9095-6>
- Baykuş, G., Akgün, M. P. y Unluturk, S. (2021). Effects of ultraviolet-light emitting diodes (UV-LEDs) on microbial inactivation and quality attributes of mixed beverage made from blend of carrot, carob, ginger, grape and lemon juice. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 67. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102572>
- Bhavya, M. L. y Umesh Hebbar, H. (2017). Pulsed light processing of foods for microbial safety. *Food Quality and Safety*, 1(3), 187-201. <https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyx017>
- Bhullar, M. S., Patras, A., Kilanzo-nthenge, A., Pokharel, B., Yannam, S. K., Rakariyathamb, K., Pan, C., Xiao, H. y Sasges, M. (2017). Microbial inactivation and cytotoxicity evaluation of UV irradiated coconut water in a novel continuous flow spiral reactor. *Food Research International*. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.10.004>
- Bolton, J. R. y Cotton, C. A. (2008). Mechanism of UV disinfection. *The Ultraviolet Disinfection Handbook, American W*, 25-40.
- Caminiti, I. M., Noci, F., Muñoz, A., Whyte, P., Morgan, D. J., Cronin, D. A. y Lyng, J. G. (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. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.07.096>
- Cassar, J. R., Ouyang, B., Krishnamurthy, K. y Demirci, A. (2020). *Food Safety Engineering*. Springer.
- Chaine, A., Levy, C., Lacour, B. y Riedel, C. (2012). Decontamination of sugar syrup by pulsed light. *Journal of Food Protection*, 75(5), 913-917. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-11-342>
- Chemat, F., Rombaut, N., Meullemiestre, A., Turk, M., Perino, S. y Abert-vian, M. (2017). Review of green food processing techniques. Preservation, transformation, and extraction. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 41, 357-377. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.04.016>
- Chevremont, A. C., Boudenne, J. L., Coulomb, B. y Farnet, A. M. (2013). Impact of watering with UV-LED-treated wastewater on microbial and physico-

- chemical parameters of soil. *Water Research*, 47(6), 1971-1982. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.01.006>
- Chevremont, A., Farnet da Silva, A. M., Sergent, M., Coulomb, B. y Boudenne, J. (2019). Multivariate optimization of fecal bioindicator inactivation by coupling UV-A and UV-C LEDs. *DES*, 285, 219-225. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.10.006>
- Chevremont, A., Farnet da Silva, M. A., Coulomb, B. y Boudenne, J. (2019). Effect of coupled UV-A and UV-C LEDs on both microbiological and chemical pollution of urban wastewaters. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.043>
- Choudhary, R., Watson, D. G. y Haddock, J. (2011). Performance of coiled tube ultraviolet reactors to inactivate *Escherichia coli* W1485 and *Bacillus cereus* endospores in raw cow milk and commercially processed skimmed cow milk. *Journal of Food Engineering*, 107(1), 14-20. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.06.009>
- Delgado, A., Kulisiewicz, L., Rauh, C. y Wierschem, A. (2012). Fluid dynamics in novel thermal and non-thermal processes. In *Novel Thermal And Non-Thermal Technologies For Fluid Foods*, 2. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381470-8.00002-5>
- Dhahir, N., Feugang, J., Witrick, K., Park, S., White, S. y Abughazaleh, A. (2020). The effect of different ultraviolet-c light doses on microbial reduction and the components of camel milk. *Food Science and Technology International*, 1-13. <https://doi.org/10.1177/1082013220935230>
- Dhar, R. y Chakraborty, S. (2020). Influence of voltage and distance on quality attributes of mixed fruit beverage during pulsed light treatment and kinetic modeling. *J Food Process Eng.*, 1-14. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13517>
- Dong, X., Wang, J. y Raghavan, V. (2020). Critical reviews and recent advances of novel non-thermal processing techniques on the modification of food allergens. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(2), 196-210. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1722942>
- Du, W., Avena-Bustillos, R. J., Breksa, A. P. y Mchugh, T. H. (2012). Effect of uv-B light and different cutting styles on antioxidant enhancement of commercial fresh-cut carrot products. *Food Chemistry*, 134(4), 1862-1869. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.03.097>
- Du, W., Avena-Bustillos, R. J., Iii, A. P. B. y Mchugh, T. H. (2014). UV-B light as a factor affecting total soluble phenolic contents of various whole and fresh-cut specialty crops. *Postharvest Biology and Technology*, 93, 72-82. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2014.02.004>
- Dunn, J. (1996). Pulsed light and pulsed electric field for foods and eggs. *Poultry Science*, 75(9), 1133-1136. <https://doi.org/10.3382/ps.0751133>
- Elmnasser, N., Dalgalarroondo, M., Orange, N., Bakhrouf, A., Haertlé, T., Federighi, M. y Chobert, J. M. (2008). Effect of pulsed-light treatment on milk proteins and lipids. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(6), 1984-1991.
- Elmnasser, N., Ritz, M., Leroi, F., Orange, N., Bakhrouf, A. y Federighi, M. (2007). Bacterial inactivation using pulsed light. *Acta Alimentaria*, 36(3), 373-380. <https://doi.org/10.1556/AAlim.36.2007.3.9>
- Ferrario, M. y Guerrero, S. (2016). Effect of a continuous flow through pulsed light system combined with ultrasound on microbial survivability, color and sensory shelf life of apple juice. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 34, 214-224. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.02.002>
- Forney, L. J., Ye, Z. y Koutchma, T. (2008). uv disinfection of *E. coli* between concentric cylinders: effects of the boundary layer and a wavy wall. *Ozone: Science & Engineering: The Journal of the International Ozone Association*, 37-41. <https://doi.org/10.1080/01919510802473872>
- Gabrić, D., Barba, F., Roohinejad, S., Gharibzadeh, S. M. T., Radojčin, M., Putnik, P. y Bursač-Kovačević, D. (2018). Pulsed electric fields as an alternative to thermal processing for preservation of nutritive and physicochemical properties of beverages: A review. *Journal of Food Process Engineering*, 41(1).
- Gautam, D., Umagiliyage, A. L., Dhital, R., Joshi, P., Watson, D. G., Fisher, D. J. y Choudhary, R. (2017). Nonthermal pasteurization of tender coconut water using a continuous flow coiled UV reactor. *LWT - Food Science and Technology*, 83, 127-131. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.05.008>
- Gómez-López, V. M., Koutchma, T. y Linden, K. (2012). Ultraviolet and Pulsed Light Processing of Fluid Foods. In *Novel Thermal And Non-Thermal Technologies For Fluid Foods*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381470-8.00008-6>
- 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(9), 464-473. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2007.03.010>
- Gómez-Sánchez, D. L., Antonio-Gutiérrez, O., López-Díaz, A. S., Palou, E., López-Malo, A. y Ramirez-Corona, N. (2020). Performance of combined technologies for the inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* and *Escherichia coli* in pomegranate juice: The effects of a continuous-flow UV-Microwave system. *J Food Process Eng.*, 1-13. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13565>
- González-Barrio, R., Vidal-Guevara, M. L., Tomás-Barberán, F. A. y Espín, J. C. (2009). Preparation of a resveratrol-enriched grape juice based on ultraviolet c-treated berries. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 10(3), 374-382.
- Gouma, M., Álvarez, I., Condón, S. y Gayán, E. (2020). Pasteurization of carrot juice by combining uv-c and mild heat: Impact on shelf-life and quality compared to conventional thermal treatment. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 64. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102362>
- Guevara, M., Tapia, M. S. y Gómez-López, V. M. (2012). Microbial inactivation and quality of guava and passion fruit nectars treated by uv-c light. *Food and Bioprocess Technology*, 5(2), 803-807.
- Hartyáni, P., Dalmadi, I., Cserhalmi, Z., Kántor, D. B., Tóth-Markus, M. y Sassi-Kiss, Á. (2011). Physical-chemical and sensory properties of pulsed electric field and high hydrostatic pressure treated citrus juices. *Innovative*

- Food Science and Emerging Technologies*, 12(3), 255-260. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2011.04.008>
- Hinds, L., Donnell, C. P. O., Akhter, M. y Brijesh, K. (2019). Principles and mechanisms of ultra violet light emitting diode technology for food industry applications. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.04.006>
- Hu, G., Liu, H., Zhu, Y., Hernandez, M., Koutchma, T. y Shao, S. (2018). Suppression of the formation of furan by antioxidants during UV-C light treatment of sugar solutions and apple cider. *Food Chemistry*, 342-346.
- Ibarz, A., Pagán, J., Panadés, R. y Garza, S. (2005). Photochemical destruction of color compounds in fruit juices. *Journal of Food Engineering*, 69(2), 155-160.
- Jarvis, P., Autin, O., Goslan, E. H. y Hassard, F. (2019). Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LED) to full-scale drinking-water disinfection. *Water (Switzerland)*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/w11091894>
- Juarez-Enriquez, E., Salmerón, I. y Gutierrez-Mendez, N. (2016). *Ultraviolet irradiation effect on apple juice bioactive*, 2-9. <https://doi.org/10.3390/foods5010010>
- Kebbi, Y., Muhammad, A. I., Liu, D. y Ana, A. S. S. (2020). Recent advances on the application of UV-LED technology for microbial inactivation: Progress and mechanism. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 19, 3501-3527. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12645>
- Keklik, N. M. y Krishnamurthy, K. (2012). Microbial decontamination of food by ultraviolet (uv) and pulsed uv light. *Microbial decontamination in the food industry: Novel methods and applications*. <https://doi.org/10.1533/9780857095756.2.344>
- Kheyrandish, A., Mohseni, M. y Taghipour, F. (2018). Protocol for determining ultraviolet light emitting diode (UV-LED) fluence for microbial inactivation studies. *Environmental Science & Technology*, 52, 7380-7398. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05797>
- Kim, D. y Kang, D. (2021). Investigation of a new UVC LEDs array continuous type water disinfection system for inactivating *Escherichia coli* O157:H7 according to flow rate and electrical energy efficiency analysis. *Food Control*, 119. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107470>
- Kolbe, T., Lipsz, M., Ku, A., Weyers, M., Kneissl, M. y Jekel, M. (2011). Application of GaN-based ultraviolet-C light emitting diodes –UV LEDs– for water disinfection. *Water Research*, 45, 1481-1489. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.11.015>
- Koutchma, T. (2008). UV light for processing foods. *Ozone: Science and Engineering*, 30(1), 93-98. <https://doi.org/10.1080/01919510701816346>
- Koutchma, T. (2009). Advances in ultraviolet light technology for non-thermal processing of liquid foods. *Food Bioprocess Technol*, 138-155. <https://doi.org/10.1007/s11947-008-0178-3>
- Koutchma, T. (2010). Challenges of UV light processing of low UVT foods and beverages. *Laser Beam Shaping XI*, 77890H. <https://doi.org/10.1117/12.860259>
- Koutchma, T. (2019a). Global regulations on ultraviolet and pulsed light technology for food related applications. *Innovative Food Processing Technologies: A Comprehensive Review*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.22945-4>
- Koutchma, T. (2019b). *Technology for food applications from farms to kitchens*. Academic P.
- Koutchma, T. (2019c). *Ultraviolet light in food technology*. CRC Press.
- Koutchma, T. (2021). Fluence concept, theoretical evaluation and practical validation in UVC preservation of opaque food liquids and beverages. *Innovative Food Processing Technologies: A Comprehensive Review*, 2. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.22961-2>
- Koutchma, T., Bissonnette, S. y Popović, V. (2021). An update on research, development and implementation of UV and pulsed light technologies for nonthermal Preservation of milk and dairy products. *Innovative Food Processing Technologies*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100596-5.22680-2>
- Koutchma, T., Popović, V. y Green, A. (2019). Overview of ultraviolet (UV) LEDs technology for applications in food production. *Ultraviolet LED Technology for Food Applications: From Farms to Kitchens*, 1-23. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817794-5.00001-7>
- Kramer, B., Wunderlich, J. y Muranyi, P. (2015). Pulsed light decontamination of endive salad and mung bean sprouts and impact on color and respiration activity. *Journal of Food Protection*, 78(2), 340-348. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-14-262>
- Krishnamurthy, K., Demirci, A. y Irudayaraj, J. M. (2007). Inactivation of *Staphylococcus aureus* in milk using flow-through pulsed UV-Light treatment system. *Journal of Food Science*, 72(7), 233-239. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00438.x>
- La Cava, E. L. M. y Sgroppo, S. C. (2019). Combined effect of UV-C light and mild heat on microbial quality and antioxidant capacity of grapefruit juice by flow continuous reactor. *Food and Bioprocess Technology*.
- Lante, A., Tinello, F. y Nicoletto, M. (2016). UV-A light treatment for controlling enzymatic browning of fresh-cut fruits. *Innovative Food Sci Emerg Technol*, 34, 141-147. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.12.029>
- 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(3), 168-174. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2011.08.022>
- Li, X., Cai, M., Wang, L., Niu, F., Yang, D. y Zhang, G. (2019). Evaluation survey of microbial disinfection methods in UV-LED water treatment systems. *Science of the Total Environment*, 659, 1415-1427. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.344>

- Lu, G., Li, C. y Liu, P. (2011). UV inactivation of milk-related microorganisms with a novel electrodeless lamp apparatus. *Eur Food Res Technol*, 233, 79-87. <https://doi.org/10.1007/s00217-011-1498-5>
- Mäkilä, L., Laaksonen, O., Kallio, H. y Yang, B. (2016). Effect of processing technologies and storage conditions on stability of black currant juices with special focus on phenolic compounds and sensory properties. *Food Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.10.079>
- Mandal, R., Mohammadi, X., Wiktor, A., Singh, A. y Singh, A. P. (2020). Applications of pulsed light decontamination technology in food processing: An overview. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/app10103606>
- Mansor, A., Shamsudin, R., Mohd, N. y Nizar, M. (2014). Efficacy of ultraviolet radiation as non-thermal treatment for the inactivation of *Salmonella typhimurium* TISTR 292 in pineapple fruit juice. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2, 173-180. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2014.11.025>
- Manzocco, L., Panozzo, A. y Nicoli, M. C. (2013). Inactivation of polyphenoloxidase by pulsed light. *Journal of Food Science*, 78(8), 1183-1187. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12216>
- Masschelein, W. y Rice, R. (2002). Use of ultraviolet light for disinfection of drinking Water. *Ultraviolet Light in Water and Wastewater Sanitation*.
- Matak, K. E., Sumner, S. S., Duncan, S. E., Hovingh, E., Worobo, R. W., Hackney, C. R. y Pierson, M. D. (2007). Effects of ultraviolet irradiation on chemical and sensory properties of goat milk. *Journal of Dairy Science*, 90(7), 3178-3186. <https://doi.org/10.3168/jds.2006-642>
- Meléndez-Pizarro, C. O., Calva-Quintana, A., Espinoza-Hicks, J. C., Sánchez-Madrigal, M. Á. y Quintero-Ramos, A. (2020). Continuous flow UV-C irradiation effects on the physicochemical properties of aloe vera gel and pitaya (*Stenocereus spp.*) blend. *Food*, 9, 1068.
- Minh, T., Nguyen, H., Suwan, P., Koottatep, T. y Beck, S. E. (2019). Application of a novel, continuous-feeding ultraviolet light emitting diode (UV-LED) system to disinfect domestic wastewater for discharge or agricultural reuse. *Water Research*, 153, 53-62. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.01.006>
- Mohamed, M. y Eissa, A. (2012). Pulsed Electric Fields for Food Processing Technology. *Structure and Function of Food Engineering*, 32. <https://doi.org/10.5772/1615>
- Muñoz, A., Caminiti, I. M., Palgan, I., Pataro, G., Noci, F., Morgan, D. J., Cronin, D. A., Whyte, P., Ferrari, G. 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. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.08.020>
- Muñoz, A., Palgan, I., Noci, F., Cronin, D. A., Morgan, D. J., Whyte, P. y Lyng, J. G. (2012). Combinations of selected non-thermal technologies and antimicrobials for microbial inactivation in a buffer system. *FRIN*, 47(1), 100-105. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.02.001>
- Nyangaresi, P. O., Qin, Y., Chen, G., Zhang, B., Lu, Y. y Shen, L. (2018). Effects of single and combined UV-LEDs on inactivation and subsequent reactivation of *E. coli* in water disinfection. *Water Research*, 147, 331-341. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.10.014>
- Oguma, K., Kita, R., Sakai, H., Murakami, M. y Takizawa, S. (2013). Application of UV light emitting diodes to batch and flow-through water disinfection systems. *DES*, 328, 24-30. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.08.014>
- Orlowska, M., Koutchma, T., Grapperhaus, M., Gallagher, J., Schaefer, R. y Defelice, C. (2013). Continuous and pulsed ultraviolet light for nonthermal treatment of liquid foods. Part 1: Effects on quality of fructose solution, apple juice, and milk. *Food and Bioprocess Technology*, 6(6), 1580-1592. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0779-8>
- Ouyang, B., Demirci, A. y Patterson, P. H. (2020). Inactivation of *Escherichia coli* K-12 in liquid egg white by a flow-through pulsed UV light treatment system. *Journal of Food Protection*, 83(3), 418-425. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.jfp-19-386>
- Pagal, G. A. y Gabriel, A. A. (2020). Individual and combined mild heat and UV-C processes for orange juice against *Escherichia coli* O157:H7. *LWT - Food Science and Technology*, 126. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109295>
- Palgan, I., Caminiti, I. M., Muñoz, A., Noci, F., Whyte, P., Morgan, D. J., Cronin, D. A. y Lyng, J. G. (2011a). 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2011.07.019>
- Palgan, I., Caminiti, I. M., Muñoz, A., Noci, F., Whyte, P., Morgan, D. J., Cronin, D. A. y Lyng, J. G. (2011b). Effectiveness of high intensity light pulses (HILP) treatments for the control of *Escherichia coli* and *Listeria innocua* in apple juice, orange juice and milk. *Food Microbiology*, 28(1), 14-20. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2010.07.023>
- 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(6), 1642-1648. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.04.048>
- Pierscianowski, J., Popovi, V., Biancanello, M., Bissonnette, S., Zhu, Y. y Koutchma, T. (2021). Continuous-flow UV-C processing of kale juice for the inactivation of *E. coli* and assessment of quality parameters. *Food Research International*, 140. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.110085>
- Pirozzi, A., Pataro, G. y Donsi, F. (2020). Edible coating and pulsed light to increase the shelf life of food products. *Food Engineering Reviews*.
- Pommerville, J. C. (2004). *Alcama's fundamentals of microbiology*. J. & B. Learning.
- Popovi, V. y Koutchma, T. (2020). Characterizing the performance of a continuous-flow UV-LED system for treatment of juices and beverages using multiple wavelengths. *Food Engineering Reviews*.
- Prasad, A., Gänzle, M. y Roopesh, M. S. (2019). Inactivation of *Escherichia coli* and *Salmonella* using 365 and 395 nm high intensity pulsed light emitting diodes. *Foods*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/foods8120679>

- Putnik, P., Pavlič, B., Šojić, B., Zavadlav, S., Žuntar, I., Kao, L., Kitonić, D. y Kovačević, D. B. (2020). Innovative hurdle technologies for the preservation of functional fruit juices. *Foods*, 9(6), 1-36. <https://doi.org/10.3390/foods9060699>
- Ramos-Villarroel, A. Y., Martín-Belloso, O. y Soliva-Fortuny, R. (2011). Bacterial inactivation and quality changes in fresh-cut avocado treated with intense light pulses. *European Food Research and Technology*, 233(3), 395-402. <https://doi.org/10.1007/s00217-011-1533-6>
- Ramos-Villarroel, A. Y., Martín-Belloso, O. y Soliva-Fortuny, R. (2015). Combined effects of malic acid dip and pulsed light treatments on the inactivation of *Listeria innocua* and *Escherichia coli* on fresh-cut produce. *Food Control*, 52, 112-118. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.12.020>
- Rifna, E. J., Singh, S. K., Chakraborty, S. y Dwivedi, M. (2019). Effect of thermal and non-thermal techniques for microbial safety in food powder: Recent advances. *Food Research International*, 126. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108654>
- Roobab, U., Aadil, R. M., Madni, G. M. y Bekhit, A. E. (2018). The impact of nonthermal technologies on the microbiological quality of juices: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17, 437-457. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12336>
- Roohinejad, S., Koubaa, M., S. Sant'Ana, A. y Greiner, R. (2018). Mechanisms of microbial inactivation by emerging technologies. In *Innovative Technologies for Food Preservation*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811031-7.00004-2>
- Roohinejad, S., Parniakov, O., Nikmaram, N., Greiner, R. y Koubaa, M. (2018). Energy saving food processing. In *Sustainable Food Systems From Agriculture to Industry*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811935-8.00006-8>
- Rowan, N. J., Gregor, S. J. M. A. C., Anderson, J. G., Fouracre, R. A. y Ilvaney, L. M. C. (1999). *Pulsed-Light Inactivation of Food-Related Microorganisms*. 65(3), 1312-1315.
- Santamera, A., Escott, C., Loira, I., del Fresno, J. M., González, C. y Morata, A. (2020). Pulsed light: Challenges of a non-thermal sanitation technology in the wine-making industry. *Beverages*, 6(3), 45.
- Shriver, S., Yang, W., Chung, S. Y. y Percival, S. (2011). Pulsed ultraviolet light reduces immunoglobulin E binding to Atlantic white shrimp (*Litopenaeus setiferus*) extract. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 8(7), 2569-2583. <https://doi.org/10.3390/ijerph8072569>
- Singh, H., Bhardwaj, S. K., Khatri, M., Kim, K. y Bhardwaj, N. (2020). UVC radiation for food safety: An emerging technology for the microbial disinfection of food products. *Chemical Engineering Journal*, December. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.128084>
- Song, K., Mohseni, M. y Taghipour, F. (2016). Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) for water disinfection: A review. *Water Research*. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.03.003>
- Song, K., Taghipour, F. y Mohseni, M. (2018). Microorganisms inactivation by continuous and pulsed irradiation of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs). *Chemical Engineering Journal*, 343, 362-370. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.03.020>
- Song, K., Taghipour, F. y Mohseni, M. (2019). Microorganisms inactivation by wavelength combinations of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs). *Science of the Total Environment*, 665, 1103-1110. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.041>
- Souza, V. R. y Koutchma, T. (2020). Ultraviolet light microbial inactivation in liquid foods. In *Innovative Food Processing Technologies: A Comprehensive Review*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.22971-5>
- Souza, V. R., Koutchma, T. y Gerai, M. (2019). Repair mechanisms of UV-induced damage of microorganism in foods. In *Innovative Food Processing Technologies: A Comprehensive Review*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.22943-0>
- Surjadinata, B. B., Jacobo-Velázquez, D. A. y Cisneros-Zevallos, L. (2017). UVA, UVB and UVC light enhances the biosynthesis of phenolic antioxidants in fresh-cut carrot through a synergistic effect with wounding. *Molecules*, 22(4), 668.
- Takeshita, K., Shibato, J., Sameshima, T., Fukunaga, S., Isobe, S., Arihara, K. y Itoh, M. (2003). Damage of yeast cells induced by pulsed light irradiation. *International Journal of Food Microbiology*, 85(1-2), 151-158. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(02\)00509-3](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(02)00509-3)
- Vipul, V., Gopisetty, S., Patras, A., Pendyala, B. y Kilonzo, A. (2018). UV-C Irradiation as an alternative treatment technique: Study of its effect on microbial inactivation, cytotoxicity, and sensory properties in cranberry-flavored water. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 52, 66-74.
- Vollmer, K., Chakraborty, S., Bhalariao, P. P., Carle, R., Frank, J. y Steingass, C. B. (2020). Effect of pulsed light treatment on natural microbiota, enzyme activity, and phytochemical composition of pineapple (*Ananas comosus* [L.] Merr.) juice. *Food and Bioprocess Technology*, 13(7), 1095-1109. <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02460-7>
- Wekhof, A., Trompeter, F.-J. y Franken, O. (2001). Pulsed UV disintegration (PUVD): a new sterilisation mechanism for packaging and broad medical-hospital applications. *The First International Conference on Ultraviolet Technologies*, Table 1, 1-15.
- Xu, F., Wang, B., Hong, C., Tebielaigen, S., Nsor-Atindana, J., Duan, Y. y Zhong, F. (2019). Optimization of spiral continuous flow-through pulse light sterilization for *Escherichia coli* in red grape juice by response surface methodology. *Food Control*, 105, 8-12. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.04.023>
- Ye, Z. y Forney, L. J. (2008). Optimum UV disinfection between concentric cylinders. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2008, 3444-3452.
- Ye, Z., Koutchma, T., Parisi, B., Larkin, J. y Forney, L. J. (2007). Ultraviolet inactivation kinetics of *Escherichia coli* and *Yersinia pseudotuberculosis* in annular reactors. *Food Engineering and Physical Properties Ultraviolet*, 72(5). <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00397.x>