



Combinación de luz ultravioleta de onda corta (UVC)

con otras tecnologías como tratamientos de pasteurización de alimentos líquidos

D. L. Gómez-Sánchez*, N. Ramírez-Corona y A. López-Malo

*Trabajo de investigación de la Licenciatura en Ingeniería Química
Correo electrónico: nelly.ramirez@udlap.mx

RESUMEN

Durante las últimas décadas se han estudiado diferentes tecnologías emergentes para el procesamiento de alimentos líquidos con el fin de evitar los tratamientos térmicos que tienen la desventaja de modificar los atributos sensoriales del producto. Una tecnología aceptada actualmente por la FDA es el uso de luz ultravioleta de onda corta (uvc) que ha demostrado efectos esterilizantes en muchos productos líquidos; sin embargo, debido a las características particulares de cada fluido (alimento líquido), en especial en presencia de sólidos suspendidos, no se logra tener un aprovechamiento total de la luz uvc. Varios investigadores, por tanto, han buscado combinar esta tecnología con otras, tales como temperaturas moderadas, campos eléctricos pulsados, tratamientos químicos y ultrasonido, con el fin de mejorar la eficacia de los procesos. En esta revisión se presenta una comparación de la efectividad del uso de radiación uvc en combinación con otras tecnologías, sobre la inactivación de diversos microorganismos presentes en alimentos líquidos, discutiendo la existencia de efectos aditivos y/o sinérgicos durante los diferentes tratamientos.

Palabras clave: radiación uvc, tecnologías combinadas, alimentos líquidos.

ABSTRACT

During the last decades, the effectiveness of different emerging technologies for liquid foods processing have been studied, in order to avoid heat treatments that may alter the organoleptic properties of the product. Currently, a new technology accepted by the FDA is the use of short-wave ultraviolet light (uvc) that has showed sterilizing effects on many food products, however, due to the particular characteristics of each fluid in liquid foods, particularly the presence of suspended solids, it is not possible to have a full use of uvc light. Several researchers have therefore attempted to combine this technology with others such as mild temperatures, pulsed electric fields, chemical treatments and ultrasound in order to improve process performances. This review presents a comparison of the effectiveness of uvc radiation in combination with other technologies, on the inactivation of several microorganisms present in liquid foods, discussing the existence of additive and / or synergistic effects during the different treatments

Keywords: short wave ultraviolet radiation, combined technologies, liquid foods.

INTRODUCCIÓN

La radiación ultravioleta es una fuente ya muy conocida por sus efectos esterizadores, germicidas y de desinfección para superficies inertes, frutas, verduras y algunos productos líquidos transparentes como el agua (Bintsis, Litopoulou-Tzanetaki y Robinson, 2000). En estos casos se utiliza una longitud de onda corta de 254 nm, comúnmente llamada uvc. La radiación uvc para el uso en productos líquidos ha sido ampliamente estudiada y es de manejo versátil, ya que se puede variar la dosis ya sea aumentando el tiempo de exposición y reduciendo la intensidad, o disminuyendo el tiempo de exposición y aumentando la intensidad (Koutchma, Forney y Moraru, 2009).

Esta tecnología tiene un efecto antimicrobiano debido a que al absorber la radiación las células microbianas presentan una ruptura de ciertos enlaces en su ADN, específicamente entre timinas y citosinas que comprometen su reproducción y conducen a su muerte debido a la imposibilidad de realizar una correcta transcripción y replicación del ADN (Guerrero-Beltrán y Barbosa-Cánovas, 2011). Su amplia aplicación se debe a una relativa facilidad de uso, es un tratamiento no térmico y no genera residuos; sin embargo, su poder de penetración es bajo y, por lo tanto, se encuentra con limitantes cuando los líquidos contienen sólidos suspendidos o no son lo suficientemente traslúcidos (Koutchma, Parisi y Patazca, 2007). Debido a ello se ha buscado combinar con otras tecnologías con la finalidad de mejorar el efecto de la luz ultravioleta sobre los microorganismos. La combinación de tecnologías pretende reducir las desventajas que tienen estas al utilizarse de manera individual, logrando que en conjunto exista una múltiple inactivación de microorganismos gracias al aumento de los factores involucrados, garantizando al mismo tiempo la seguridad alimentaria y la aceptación sensorial (Leistner y Gorris, 1995).

Los alimentos líquidos son de fácil manejo, lo cual permite la aplicación de varios tratamientos a la vez o de manera secuencial. Sin embargo, cuando se utilizan de manera secuencial, es importante considerar el orden de aplicación de dichos tratamientos en su efectividad total, es decir que, si se busca combinar un tratamiento de radiación uvc con otra tecnología, será importante saber si los dos tratamientos son aditivos entre ellos

o si son sinérgicos. En el primer caso el orden de los tratamientos no afecta el resultado final en el procesamiento del producto y su efecto total es la suma de ambos; en el segundo caso sí importará la configuración de los equipos y la secuencia del tratamiento, es decir, si se procesa el alimento primero con la radiación uvc y luego con otra tecnología o viceversa, puesto que esto afectará al resultado final en términos de la inactivación de microorganismos, esperando un efecto total mayor que la suma de los efectos individuales (Wang *et al.*, 2011). Otro aspecto importante a considerar durante la combinación de tecnologías es la evaluación de los diferentes factores que pueden influir en la efectividad del proceso, tales como la turbidez, la viscosidad y la densidad del líquido, los sólidos suspendidos presentes, los caudales manejados, el área de exposición, la capacidad de absorción de luz uvc, entre otros factores.

La presente revisión bibliográfica está enfocada en la comparación de la efectividad del uso de diferentes tecnologías, tanto tradicionales como emergentes, en combinación con la radiación ultravioleta de onda corta sobre la inactivación de diversos microorganismos presentes en alimentos líquidos.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1. Luz ultravioleta de onda corta (uvc)

La luz ultravioleta de onda corta (uvc) es una tecnología que ofrece una alternativa a los tratamientos térmicos para el procesamiento de alimentos líquidos, pues, dado que no eleva significativamente la temperatura del producto, suele conservar los nutrientes y la percepción sensorial original que los consumidores buscan (López-Malo y Palou, 2005). A pesar de las múltiples aplicaciones y ventajas del uso de la radiación ultravioleta de onda corta, existen limitaciones que no permiten alcanzar las 5 reducciones logarítmicas de la población microbiana en ciertos alimentos líquidos que requiere la FDA (2000).

La limitación más importante suele ser la opacidad del producto, debido a la baja penetración de la radiación. Por lo tanto, durante el diseño de equipos uvc se busca que la luz se encuentre lo más cerca posible del medio a tratar, en caso de no ser posible, se sugiere incrementar la turbulencia en el flu-

jo para homogeneizar la radiación recibida (Koutchma, Keller, Chirtel y Parisi, 2004). A pesar de recomendaciones como esta, dado que no todos los productos líquidos son transparentes, resulta interesante buscar la combinación de otros métodos para mejorar la efectividad de los tratamientos UVC.

2. Combinación de radiación ultravioleta con tecnologías tradicionales

2.1. Tratamientos térmicos

La combinación de luz UVC con tratamientos térmicos ha sido una de las tecnologías combinadas más estudiadas, pues suele mostrar buenos resultados en la reducción lineal logarítmica de los microorganismos a tratar. Gayan *et al.* (2012) evaluaron esta combinación directamente en caldos de cultivo de soya triptona con *Salmonella enterica*, usaron 8 lámparas UVC de 8W, cada una distribuida en ocho reactores con capacidad de 56.2 ± 2.4 mL en los que se varió la radiación de UVC entre 12.8 y 18.0 J/mL. Para la combinación con el tratamiento térmico, todos los reactores fueron sumergidos en un baño con temperaturas de 45 a 60 °C. Los autores obtuvieron resultados de 0.5 reducciones logarítmicas para el tratamiento de luz UVC y de 2.3 reducciones logarítmicas para el tratamiento de luz UVC combinado con baños a 55 °C, siendo este último su mejor resultado.

Gouma *et al.* (2015) realizaron un tratamiento similar al presentado por Gayán *et al.* (2012), pero evaluando el efecto de la combinación de UVC con calor sobre levaduras inoculadas en jugo de manzana comercial. Este experimento se desarrolló utilizando una dosis de UVC de 2.9 J/mL, se observaron mejores resultados con una combinación a una temperatura de 55 °C, teniendo como resultado una reducción logarítmica de 0.3 para el tratamiento con UVC y de 1.3 para el tratamiento combinado. En ambos estudios se concluyó que el pH no influye en la inactivación con luz UVC, con esta temperatura ambos reportan una sinergia entre tratamientos pues, en ambos casos, se observa que el incremento de temperatura sensibiliza al microorganismo a la luz UVC y se logra reducir la población microbiana en más de 1 log en tan solo 2.7 minutos de tratamiento.

En el estudio realizado por Gabriel *et al.* (2018) se combinó una lámpara UVC (15 W de potencia a una distancia del líquido

de 21.1 cm, logrando una dosis de entre 17.30 y 25.26 mJ/cm²), con rangos de exposición de 50 a 125 segundos. El tratamiento térmico se realizó a diferentes temperaturas (55, 57, 60 y 63 °C) para diferentes microorganismos inoculados en endospermo líquido de coco o agua de coco comercial. Los mejores resultados se obtuvieron a una temperatura de 55 °C, alcanzando más de 5 reducciones logarítmicas para los diferentes microorganismos probados, a pesar de que los patógenos muestran una mayor resistencia al tratamiento térmico. Las reducciones logarítmicas puntuales de cada microorganismo se resumen en la tabla I con el fin de compararlos con los resultados reportados en otros trabajos.

García, Ferrairo y Guerrero (2018) trataron jugo de naranja con zanahoria inoculado con la levadura *Saccharomyces cerevisiae* con dos lámparas UVC (30 W) conectadas en serie dentro de un tubo de vidrio, lo cual corresponde a una radiación de 10.6 kJ/m². El jugo fue irradiado en rangos de tiempo de 0 a 15 minutos en una cámara provista de recirculación para mantener la temperatura en 20 o 50 °C. Durante estos experimentos se monitoreó la integridad de las membranas celulares de la levadura, en donde se encontró que la combinación de tratamientos hace daños subletales como alteraciones en la coagulación y vacuolización de la célula. Se observó que el tratamiento daña las paredes celulares, causando una deformación de estas, lo cual provoca daños estructurales que no se observan en los tratamientos aislados. Dichos autores obtuvieron 2.6 reducciones logarítmicas con radiación UVC a 20 °C y 4.7 reducciones con los tratamientos a 50 °C, lo cual indica del efecto aditivo de estas dos tecnologías.

En general, varios autores reportan una mayor inactivación de los microorganismos probados cuando se combina el tratamiento UVC con tratamientos térmicos a temperaturas de 50 a 55 °C. En la tabla I se presenta una comparación de los resultados obtenidos por diferentes autores para la combinación del uso de radiación UVC con tratamientos térmicos.

2.2. Adición de antimicrobianos

La adición de otro componente busca que el medio en donde se encuentran los microorganismos deje de ser apto para su supervivencia; sin embargo, cuando se trata de medios ácidos como

Tabla I. Comparativo de luz ultravioleta de onda corta (UVC) en combinación con tecnologías tradicionales

Tecnología combinada	Medio/alimento	Microorganismo	Dosis		Reducción logarítmica		Referencia		
			UVC	Tecnología en combinación	UVC	UVC + combinación			
Temperatura media	Caldo de soya triptona adaptada	<i>Salmonella enterica</i>	12.8-18.0 J/mL	Baño de agua a 55 °C	0.5	2.3	Gayá et al., 2012		
	Jugo de manzana	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	2.9 J/mL		0.3	1.3	Gouma et al., 2015		
	Endospermo líquido de coco	<i>Escherichia coli</i>	0.2526 kJ/m ²		1.82	5.94	Gabriel et al., 2018		
		<i>Salmonella enterica</i>	0.173 kJ/m ²		0.16	5.62			
		<i>Listeria monocytogenes</i>	0.2465 kJ/m ²		2.02	6.20			
	Jugo de naranja con zanahoria	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	10.6 kJ/m ²	Baño de agua a 50 °C	2.6	4.7	García, Ferrairo y Guerrero, 2018		
Adición de antimicrobiano	Néctar de durazno	<i>Aspergillus flavus</i>	203 kJ/m ²	1000 ppm benzoato de sodio	2.8	3.2	Flores-Cervantes, et al., 2013		
		<i>Aspergillus niger</i>			1.5	2.9			
	Dongchimi	Bacterias aerobias	6 kJ/m ²	0.1 % extracto de semilla de uva	1.66	3.06	Choi et al., 2017		
		Bacterias ácido-lácticas			2.44	3.3			
		Levaduras y hongos			1.74	2.27			
Adición de desinfectante	Arándanos	<i>Salmonella enterica</i>	27.6-33.6 kJ/m ²	8 ppm cloro	1.72 ± 0.06	2.52 ± 0.10	Huang, Vries y Chen, 2018		
				2 % H ₂ O ₂		2.01 ± 0.27			
				80 ppm PPA		2.60 ± 0.16			
	Zanahoria cortada			8 ppm cloro	1.99 ± 0.22	3.40 ± 0.69			
				2 % H ₂ O ₂		1.93 ± 0.31			
				80 ppm PPA		3.65 ± 0.78			

los jugos, también existe una resistencia mayor de los microorganismos al tratamiento con aditivos. Flores-Cervantes, Palou y López-Malo (2013) adicionaron como antimicrobianos sorbato de potasio y benzoato de sodio en concentraciones de 250 a 2,000 ppm a un néctar de durazno inoculado con diferentes hongos, *Aspergillus flavus* y *Aspergillus niger*. El néctar fue irradiado con luz UVC en dosis máximas de 203 kJ/m² en diferentes momentos del tratamiento; los resultados mostraron que la combinación UVC-benzoato de sodio (1,000 ppm) provocó hasta 3 reducciones logarítmicas, específicamente con el antimicrobiano adicionado después del tratamiento de radiación y un caudal de proceso de 1.4 L/min. Los resultados únicamente con adición de benzoato de sodio mostraron una reducción logarítmica cercana a 2.6, mientras que la simple irradiación de UVC provocó reducciones logarítmicas de 2.8 y 1.5 para *A. flavus* y *A. niger*, respectivamente.

Choi, Park, Yang y Chun (2017) adicionaron un antimicrobiano proveniente del extracto de semillas de uvas (GSE, por sus siglas en inglés) a un caldo tradicional de China (*dongchimi*). Durante el tratamiento el caldo fue irradiado con 4 lámparas UVC de 20 W, cada una a una distancia de 15 cm, posterior a esto se disolvió el extracto en el caldo a diferentes concentraciones. Estos autores encontraron que la mejor combinación de UVC-GSE se obtiene al utilizar una dosis de 6 kJ/cm² de radiación UVC y al adicionar 0.1 % del extracto, aumentando las reducciones logarítmicas de diferentes tipos de bacterias y levaduras de un rango de 1.66-2.44 a rangos de 2.27-3.3. En este estudio se concluyó que la adición de antimicrobianos es más efectiva después de que el alimento ha sido irradiado con UVC, lo cual es consistente con lo reportado por Flores-Cervantes, Palou y López-Malo (2013).

Huang, Vries y Chen (2018) evaluaron la adición de agentes desinfectantes como cloro, peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y ácido peroxiacético (PPA). Estos autores realizaron sus experimentos con diferentes verduras sumergidas en caldos inoculados con *Salmonella enterica*, la fuente de luz UVC fue provista por cuatro lámparas de 90 cm y 265 W, cada una a 17 cm de distancia de la mezcla a tratar (dosis de 27.6-33.6 kJ/m²). Los resultados muestran que la adición de agentes desinfectantes o antimicrobianos resulta en una mejoría del proceso y que el tratamiento puede ser utilizado indirectamente para

alimentos sólidos. En la tabla I se muestran únicamente los resultados para el tratamiento con arándanos frescos y zanahoria cortada, en los que se observa que el cloro y el PPA en concentraciones de 8 ppm y 80 ppm, respectivamente, son de los desinfectantes más efectivos, y en combinación con UVC logran reducir la población microbiana de *S. enterica* en más de 2.5 ciclos logarítmicos.

3. Combinación de radiación ultravioleta con tecnologías emergentes

Durante los últimos años diversos investigadores han evaluado métodos alternativos a los tratamientos térmicos, o bien a la adición de agentes germicidas, considerados la tecnología convencional más utilizada, con la finalidad de minimizar el cambio en las propiedades nutricionales y organolépticas de los alimentos tratados. Estas tecnologías, conocidas como tecnologías emergentes, incluyen el uso de fuentes de energía como luz ultravioleta, ultrasonido, pulsos eléctricos, pulsos de luz, microondas, o bien la combinación de dos o más de estos tratamientos, siendo los más efectivos el uso de luz ultravioleta, pulsos eléctricos y ultrasonido. En la siguiente sección se discutirán algunos resultados de la efectividad de tratamientos combinados al utilizar UVC con otras tecnologías emergentes.

3.1. Campos eléctricos pulsados

Una alternativa de combinación de tratamientos es el uso de campos eléctricos pulsados (PEF, por sus siglas en inglés), un tratamiento no térmico que tiene un mecanismo de inactivación que provoca daños celulares irreversibles por la formación de poros en la membrana celular de microorganismos deterioradores o patógenos presentes en alimentos, fenómeno llamado electroporación (Hamilton y Sale, 1967).

Gachovska *et al.* (2008) realizaron experimentos con jugo de manzana inoculado con *Escherichia coli* en el cual se alcanzaron las mayores reducciones con campos eléctricos de 162 J/mL y 11.3 pulsos, junto con un tratamiento de luz UVC con una lámpara de longitud de 30 cm y un tiempo de exposición de 2.94 segundos (caudal de 8 mL/min).

Noci *et al.* (2008) trajeron la flora microbiana nativa de un jugo de manzana fresco con una potencia de 30 W de luz UVC a 30 cm del jugo y 100 pulsos de 15 Hz y 1 µs, con un

caudal del líquido de 15.75 mL/min (tiempo de residencia de 6.67 segundos). Dichos autores reportaron reducciones logarítmicas mayores a 5 sin importar el orden para realizar el tratamiento, mientras que el solo uso de la luz uvc tuvo reducciones de 2 a 3.5 log.

Palgan *et al.* (2011) también realizaron combinaciones con este tipo de tecnologías, en donde utilizaron campos eléctricos pulsados de 18 Hz por un pulso de 1 μ s. El jugo de manzana y arándano utilizado, inoculado con *E. coli* o *Pichia fermentans*, se procesó a una temperatura de 20 °C con un flujo de 20.8 mL/min y se expuso a un campo eléctrico de 34 kV/cm por 93 μ s. El flujo volumétrico dentro de la lámpara uvc fue de 176 mL/min con un tiempo de residencia de 30 segundos dentro de la unidad. Después de su tratamiento, los investigadores alcanzaron resultados cercanos a 6 reducciones logarítmicas, sin que el orden de los tratamientos afectara este valor. Como puede observarse, la combinación de PEF-UVC muestra efectos aditivos, mas no sinérgicos entre ellos.

3.2. Ultrasonido

El ultrasonido (us), al igual que los campos eléctricos pulsados, ha sido considerado como método emergente y no térmico para el tratamiento de alimentos líquidos. Su mecanismo de inactivación consiste en la formación, evolución y posterior implosión de burbujas y microburbujas en el proceso, debido al fenómeno de cavitación que produce y que por consecuencia provoca daño celular (Knorr, Zenker, Heinz y Lee, 2004).

Autores como Char, Mitilinaki, Guerrero y Alzamora (2010), Palgan *et al.* (2011) y Antonio-Gurierrez, López-Malo, Ramírez-Corona y Palou (2017) han reportado un efecto sinérgico entre los tratamientos de luz ultravioleta junto con el uso de ultrasonido, en los cuales se alcanzan desde 2 hasta 6 reducciones logarítmicas.

Char, Mitilinaki, Guerrero y Alzamora (2010) evaluaron el efecto de combinar uvc con us durante el tratamiento de jugo de naranja inoculado con *E. coli*, encontrando un efecto sinérgico cuando se irradió primeramente el jugo (utilizando una lámpara

uvc, 90 cm de 100 W) por períodos de 5 a 20 minutos y posteriormente se utilizó un ultrasonido (20 kHz con amplitud de 95 μ m) con un flujo de 0.2 L/min. Dichos autores obtienen reducciones logarítmicas de *E. coli* cercanas a 1.8 y 1.9 con los tratamientos individuales de uvc y us respectivamente, y una reducción muy similar cuando realizan el tratamiento consecutivo uvc-us. Sin embargo, al realizar los dos tratamientos de forma simultánea, logran aumentar las reducciones logarítmicas hasta 3.5, demostrando una sinergia entre ambos.

Palgan *et al.* (2011) evaluaron el efecto de ambas tecnologías (uvc y us) para el tratamiento de jugo de manzana y arándano inoculado con *E. coli* o *Pichia fermentans*. Dado que el ultrasonido provoca aumento de temperatura en la muestra, el jugo se mantuvo en un baño de -15 °C para ser tratado con un ultrasonido de 20 kHz con una amplitud de 23 μ m y 750 W de potencia. La dosis de energía de la lámpara uvc con una potencia de 30 W fue de 5.3 J/cm² para un flujo de 176 mL/min con un tiempo de residencia de 30 segundos dentro de la unidad. Al combinar ambas tecnologías se observaron reducciones logarítmicas mayores a 6 para los 2 microorganismos probados.

Antonio-Gutiérrez, López-Malo, Ramírez-Corona y Palou (2017) evaluaron el efecto de la atomización ultrasónica (20 kHz al 100 % de amplitud) en combinación con luz uvc, para el tratamiento de jugos de toronja y mandarina comercial inoculados con *S. cerevisiae*. Los jugos tratados fueron bombeados y atomizados por el us directamente a la luz uvc a una velocidad de 1.1 mL/s y procesado 3 veces. Los autores evaluaron 6 configuraciones con lámparas uvc de 35 cm de largo y diferentes espacios anulares entre la lámpara y la carcasa de acero inoxidable, evaluando también la conveniencia de utilizar o no dicha carcasa. El arreglo más efectivo se obtuvo al utilizar la lámpara dentro de la carcasa de acero inoxidable con el espacio anular más grande (5 cm de diámetro), logrando una mayor superficie de contacto de las moléculas atomizadas con el ultrasonido, además de mejorar la distribución de la luz uvc gracias al reflejo. Como resultado en esta última

configuración se obtuvieron casi 3 reducciones logarítmicas de *S. cerevisiae*, mientras que los otros arreglos alcanzaban un máximo de 1.5 reducciones.

En la tabla II se muestra un resumen de estas tecnologías combinadas, se observa que la combinación tanto de ultra-

sonido como de campos eléctricos pulsados junto con la luz UVC da mejores resultados en cuanto a la reducción de población microbiana. Sin embargo, cabe destacar que para los casos con mayor inactivación los tiempos de radiación continúan siendo altos (de 20 a 30 minutos de exposición).

Tabla II. Comparativo de luz ultravioleta de onda corta en combinación con tecnologías emergentes

Tecnología combinada	Medio	Microorganismo	Dosis		Reducción logarítmica		Referencia
			UVC	Tecnología en combinación	UVC	UVC + combinación	
Campos eléctricos pulsados	Jugo de manzana	<i>Escherichia coli</i>	30 cm*	60 kV/cm	3.46	5.33-5.35	Gachovska <i>et al.</i> , 2008
	Jugo de manzana fresco	Flora microbiana nativa	30 min*	40 kV/cm	2.2	6.2-7.1	Noci <i>et al.</i> , 2008
	Jugo de arándano y manzana	<i>Escherichia coli</i>	53 kJ/m ²	34 kV/cm	1.9	6.1	Palgan <i>et al.</i> , 2011
		<i>Pichia fermentans</i>			1.8	6.0	
Ultrasonido	Jugo de naranja	<i>Escherichia coli</i>	20 min*	20 kHz	1.8	3.5	Char <i>et al.</i> 2010
	Jugo de arándano y manzana	<i>Escherichia coli</i>	53 kJ/m ²	20 kHz	1.9	6.1	Palgan <i>et al.</i> , 2011
		<i>Pichia fermentans</i>			1.8	6.0	
	Jugo de toronja	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	3.13 J/mL	20 kHz	0.23 ± 0.02	2.77 ± 0.08	Antonio-Gutiérrez <i>et al.</i> , 2017
	Jugo de mandarina				0.35 ± 0.11	2.88 ± 0.02	

*No se reporta dosis.

4. Factores que afectan en la combinación de tecnologías con la radiación uvc

De la revisión presentada se observa que todos los tratamientos siguen siendo dependientes de las características del fluido, sobre todo en factores de absorbancia y turbidez. Como se discutió a lo largo de la presente revisión, cuando los medios que utilizan los diferentes autores presentan una mayor turbidez y absorbancia (jugos de naranja, zanahoria, mandarina y néctar de durazno), la inactivación que se puede lograr es menor que los casos en los que se trabaja con medios que tienen una menor absorbancia y turbidez (jugos de arándano, manzana y agua de coco). Este resultado es debido a que a mayor turbidez existe una menor transmitancia de la luz (Koutchma, Forney y Moraru, 2009), es decir, que la opacidad del producto se torna en una protección al microorganismo al que se quiere eliminar y afecta el aprovechamiento de la radiación ultravioleta. Si bien las características ópticas del jugo continúan siendo una limitante, las condiciones de procesamiento tales como velocidad y régimen de flujo, espesor de la película a tratar, intensidad de la radiación y configuración del equipo pueden contribuir a mejorar el área de contacto de la luz con el líquido y la penetración de la radiación a través de este.

Por otro lado, se ha observado que la efectividad de la luz uvc se puede mejorar cuando se combina con otras tecnologías, particularmente cuando actúan de manera sinérgica. En muchos casos los autores mencionan una mejoría del proceso si la aplicación de la tecnología alternativa, ya sea tradicional o emergente, se realiza después de la radiación de la muestra. Esto puede deberse a los mecanismos de acción a niveles de ADN que provoca la luz ultravioleta; una vez que la radiación uvc ha causado rupturas en los enlaces del ADN, la posterior exposición de los microorganismos a otra tecnología, como la adición de componentes antimicrobianos (o desinfectantes), o bien el uso de calor, ultrasonido o PEF, daña aún más a las células gracias a sus mecanismos de inestabilización celular. En el caso particular de los PEF combinados con el uvc, se observa que el orden de los procesos no afecta en el rendimiento del tratamiento, proba-

blemente debido a que el daño por la electroporación, así como el daño a nivel de ADN, es efectivo solo para aquellas células sanas, por lo que el deceso de los microorganismos es el mismo sin importar si la electroporación se hace previa o posteriormente al daño causado por la luz uvc.

CONCLUSIONES

El uso de luz uvc ha sido estudiado en los últimos años como una alternativa no térmica para el procesamiento de alimentos líquidos, particularmente para jugos de frutas inoculados con diferentes microorganismos de interés. Las dosis reportadas en los diferentes trabajos varían desde los 0.1 a los 203 kJ/m², de 2 a 18 J/mL y de 20 a 30 minutos de exposición, algunos autores reportan que es posible obtener buenos resultados con dosis bajas. Sin embargo, su aplicación se encuentra limitada por las propiedades ópticas del alimento a procesar, ya que la presencia de sólidos suspendidos y/o componentes colorantes puede reducir significativamente el correcto aprovechamiento de la radiación ultravioleta. Con la finalidad de incrementar el efecto de la luz uvc, o aprovechar más un factor de inactivación de manera simultánea, se ha evaluado la combinación de diferentes tecnologías junto con la uvc. Si bien es difícil comparar los tratamientos en términos de dosis recibidas, ya que depende de diferentes factores como el tipo de lámpara, arreglo, tiempo de residencia, espesor de película, etc., queda claro que la combinación de tratamientos mejora la eficiencia en la inactivación de diferentes microorganismos que deterioran los alimentos líquidos, particularmente en aquellos casos en los que se observan efectos sinérgicos, como la combinación de UVC con PEFs.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) por el apoyo y el financiamiento.

REFERENCIAS

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