

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

Irradiación ultravioleta UV-C: aplicaciones en alimentos, dosis seguras y diseño de equipos. Una revisión.

Gisela Belén Criollo Criollo

Ingeniería en Alimentos

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniera en Alimentos

Quito, 3 de mayo de 2021

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

**Irradiación ultravioleta UV-C: aplicaciones en alimentos, dosis seguras y
diseño de equipos. Una revisión.**

Gisela Belén Criollo Criollo

Nombre del profesor, Título académico

Francisco E Carvajal Larenas, Ph. D.

Quito, 3 de mayo de 2021

DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Nombres y apellidos: Gisela Belén Criollo Criollo

Código: 00136985

Cédula de identidad: 1725210908

Lugar y fecha: Quito, mayo de 2021

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

RESUMEN

Los tratamientos térmicos reducen la carga microbiana, pero al mismo tiempo alteran las propiedades nutricionales y sensoriales de los alimentos. La luz UV-C de onda corta (200-280 nm) correctamente aplicada a alimentos poseería excelentes propiedades germicidas para inactivar una amplia gama de patógenos microbianos como bacterias, hongos, levaduras, mohos y virus, sin alterar significativamente sus propiedades sensoriales y nutricionales. El procesamiento de alimentos por radiación UV-C depende de una serie de factores como: las características microbianas, la geometría del alimento, la dosis de irradiación segura, el tipo de reactor (laminar o turbulento), entre otros. La presente revisión presenta a la luz ultravioleta como una técnica no térmica emergente en la descontaminación de frutas, jugos y productos lácteos. Para garantizar la seguridad de los operadores, así como la calidad de los alimentos y evitar efectos adversos como la oxidación lipídica, pérdida de vitaminas y aminoácidos esenciales, es imprescindible establecer límites adecuados de exposición UV-C, así como considerar todos estos elementos al momento de diseñar los equipos.

Palabras clave: ultravioleta, luz UV-C, radiación, alimentos, dosis, diseño, equipos

ABSTRACT

Heat treatments decrease the microbial load, but at the same time modify the nutritional and sensorial properties of foods. Short-wave UV-C light (200-280 nm) properly applied to food would possess excellent germicidal properties to inactivate a wide range of microbial pathogens such as bacteria, fungi, yeasts, molds and viruses, without significantly altering their sensory and nutritional properties. Food processing by UV-C radiation depends on several factors such as: microbial characteristics, food geometry, safe irradiation dosage, reactor type (laminar or turbulent), among others. This review presents ultraviolet light as an emerging non-thermal technique in the decontamination of fruits, juices and dairy products. To ensure operator safety and food quality and to avoid adverse effects such as lipid oxidation, loss of vitamins and essential amino acids, it is essential to establish adequate UV-C exposure limits, as well as to consider all these elements when designing the equipment.

Key words: ultraviolet, UV-C light, radiation, food, dosage, design, equipment

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción	9
2. Metodología	11
3. Desarrollo del Tema	12
3.1. Aplicaciones de un pasteurizador UV en la industria alimenticia	12
3.1.1. Frutas.....	12
3.1.2. Jugos.	13
3.1.3. Lácteos.	14
3.2. Límites de exposición segura en la industria de alimentos.....	21
3.3. Factores clave a considerar para el diseño de un pasteurizador UV	23
4. Conclusiones	25
5. Recomendaciones.....	26
6. Referencias bibliográficas	27

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Aplicaciones de luz UV-C en alimentos	17
----------	---	----

1. INTRODUCCIÓN

El acceso a alimentos saludables y nutritivos es un derecho del ser humano. Sin embargo, a nivel mundial cada año 420 000 individuos fallecen y cerca de 600 millones (uno de cada diez) se enferma por el consumo de comida contaminada con virus, parásitos y bacterias patógenas (FAO, 2019). El no garantizar la inocuidad puede ocasionar más de 200 enfermedades perjudiciales como: shigelosis, listeriosis, botulismo, fiebre tifoidea, cólera e inclusive cáncer (Jung & Skinner, 2017). La elaboración de productos de calidad sin riesgo para la salud del consumidor sigue siendo un desafío (Fung et al., 2018).

El procesamiento térmico mejora la vida útil de los alimentos debido a la naturaleza lábil de los microorganismo frente a la acción del calor (Asgar & Chauhan, 2019). Sin embargo, puede perjudicar la calidad de los alimentos al modificar sus propiedades físicas (color, forma, sabor u olor) o su valor nutritivo (oxidación de lípidos, pérdida de nutrientes e inactivación de enzimas) (Chia et al., 2012). Dado que este tipo de tecnologías demandan altos costos de energía y capital, resulta importante el desarrollo de nuevas técnicas para el procesamiento de alimentos (Fung et al., 2018). Como consecuencia, las tecnologías no térmicas han ganado mayor atención en este sector. Dentro de estas, el uso de la luz ultravioleta (UV) ha generado interés en la pasteurización de alimentos debido a su capacidad para inactivar microorganismos con un impacto mínimo en la calidad del producto con beneficios costo-efectivos, operativos y de mantenimiento sencillo (Santhirasegaram et al., 2015).

La longitud de onda para el procesamiento UV varía de 100 a 400 nm y se divide en: UV-A (315 a 400 nm), responsable del bronceado; UV-B (280 a 315 nm), causante del envejecimiento precoz, quemaduras graves y cánceres cutáneos; UV-C (200 a 280 nm), germicida por ser letal para muchos microorganismos (Koutchma et al., 2009). El tratamiento con UV-C se realiza a bajas temperaturas y se clasifica como método no térmico. Un estudio

concluyó que la irradiación UV no genera contaminantes y, por tanto, tienen el potencial de ser considerada una tecnología limpia (Pereira & Vicente, 2010). Además, en comparación con los procesos de pasteurización térmicos, el tratamiento con UV-C requiere menos energía y no origina olores ni sabores extraños en los alimentos (Koutchma et al., 2016).

La eficiencia de la luz UV depende de varios factores como: la transmisividad del producto, la potencia, la configuración del reactor, la longitud de onda, la disposición física de la fuente UV, la longitud del camino de la radiación el tipo de radiación aplicada, el tiempo de exposición y el nivel de penetración en el producto (Alothman et al., 2009; Bhattacharjee et al., 2019). Con los antecedentes expuestos, el presente estudio tiene como objetivos i) describir las aplicaciones de un pasteurizador UV en la industria alimenticia, ii) detallar los límites de exposición segura en la industria de alimentos y iii) recopilar y analizar los posibles factores clave a considerar para el diseño de un pasteurizador UV.

2. METODOLOGÍA

Este estudio ha sido realizado para evaluar analíticamente artículos de investigación y establecer puntos clave a considerar en la aplicación de la luz UV en alimentos. Los papers recopilados fueron publicados principalmente en el período 2009 a 2020. Los estudios más antiguos solo se incluyeron si agregaban información única a la revisión. Scopus fue la base de datos principalmente utilizada.

3. DESARROLLO DEL TEMA

3.1. Aplicaciones de un pasteurizador UV en la industria alimenticia

El uso de luz ultravioleta para procesar alimentos tiene distintas aplicaciones antimicrobianas a causa de las lesiones que genera en el ADN de los microorganismos irradiados. Las células que son incapaces de restaurar el ADN perjudicado perecen, mientras que las sobrevivientes mutan su nivel de reproducción (Choudhary & Bandla, 2012). La capacidad de penetración de la radiación UV-C es baja, por ende, el espesor del alimento a tratar influirá directamente en la efectividad del tratamiento (Morata, 2015). En la Tabla 1 se presenta los sistemas de procesamiento basados en irradiación UV-C de productos frescos, jugos de frutas y lácteos. Dependiendo de las propiedades ópticas del alimento, la luz UV puede penetrar varios milímetros el sustrato. En comparación a la leche y otros productos turbios como jugos, el agua es fácilmente penetrable a las longitudes de onda debido a su transparencia (Choudhary & Bandla, 2012). Estudios afirman que el color o la turbidez de un alimento determina el coeficiente de absorción óptica de manera directamente proporcional (Guerrero & Barbosa, 2004).

3.1.1. Frutas.

La contaminación microbiana de alimentos frescos se debe a su manipulación durante la cosecha, el almacenamiento, el transporte y la comercialización (Murray et al., 2017). Los brotes de las infecciones transmitidas por *Salmonella*, *Escherichia coli* y *Listeria monocytogenes* han aumentado en los últimos años principalmente por el consumo de productos frescos no inocuos (Callejón et al., 2015). La conservación por UV-C para este tipo de productos se ha demostrado apropiada solo para las superficies, pues la capacidad de penetración de la luz UV disminuye a medida que aumenta el coeficiente de absorción. Mejorar la profundidad de penetración de luz UV-C es un desafío potencialmente beneficioso para el tratamiento de alimentos con coeficientes de absorción altos (Choudhary & Bandla,

2012). El aumento de la eficiencia de la inactivación de microorganismos se podría lograr a través de la presentación de alimentos en una película delgada. En la Tabla 1 se resume estudios sobre el tratamiento UV en frutas. Así también Millán et al. (2015) estudiaron el efecto de las dosis de radiación UV-C (290-757 mJ/cm²) sobre la vida útil de los tomates y los duraznos, y evidenciaron una reducción de las pudriciones postcosecha (a 47% de la infección original en tomate) (Stevens et al., 2004), así como un retraso en la maduración hasta 4 días (en tomates tratados a 410 mJ/cm²) (Lu et al., 2016).

3.1.2. Jugos.

La luz UV se aplica de forma versátil en alimentos líquidos. Así, Fenoglio et al. (2020) investigaron jugos de diferente capacidad de absorción (pera, naranja+mandarina y naranja+plátano+kiwi+mango+fresa), inoculados con cepas patógenas como *Saccharomyces cerevisiae* KE 162, *Lactobacillus plantarum* ATCC 8014 y *Escherichia coli* ATCC 25922. Estos autores observaron que cuando se trataba de jugos inoculados con poblaciones de 10⁸ UFC/g y se les aplicaba 254 nm de UV-C, la población inicial decrece significativamente como se muestra en la Tabla 1. Por otro lado, Keyser et al. (2008) compararon el recuento de mesófilos aeróbicos (APC) así como de levaduras y mohos (YM) en muestras de 50 mL de néctares elaborados a partir de mango y frutilla, expuestos a dosis de luz ultravioleta de 0, 1403.89 y 2105.84 mJ/cm². El néctar de mango no irradiado mostró un recuento microbiano de 1.40 log APC y 2.8 log YM, mientras que tanto a 1403.89 como a 2105.84 mJ/cm², el recuento fue de 0 log APC y de 0 log YM. Respecto a la frutilla, su carga inicial fue de 2.36 log APC y 3.05 log YM. Tras recibir una dosis igual a 1403.89 mJ/cm², el recuento fue de 1.04 log APC y 0.60 log YM. Solo a 2105.84 mJ/cm² se obtuvo un recuento microbiano igual a 0 log para APC y YM.

De igual manera Koutchma et al. (2004) estudiaron también la eficacia de la luz UV-C en la aniquilación de *Escherichia coli* K-12 en jugo de manzana a través de reactores

ultravioleta de flujo laminar y turbulento. Ellos determinaron que a mayor tasa de flujo de la radiación UV, la inactivación de *E. coli* se incrementa con reactores ultravioleta de flujo turbulento como consecuencia de sus óptimas condiciones de mezclado. Más aún, para el jugo de manzana, en un reactor UV Aquionics con 12 lámparas de 42 W cada una, el flujo turbulento eficaz se consiguió con un número de Reynolds (Re) igual a 6997 (Geankoplis, 1993).

Adicionalmente, Keyser et al. (2008) reportaron dos sistemas UV de flujo turbulento para asegurar la penetración de luz UV-C en zumos. En el sistema a escala piloto, el líquido se bombea desde la cámara de entrada hasta el reactor, en el espacio entre la manga de cuarzo y el tubo espiral corrugado se moviliza un caudal mínimo de 3800 L/h con un $Re > 7500$. Dentro del tubo espiral se halla una lámpara UV germicida con 30 W de potencia UV-C que está protegida por cuarzo. En cuanto al reactor a escala comercial, el autor menciona que para caudales mayores a 3800 y menores a 4200 L/h se calcula un valor de Re superior a 7500. A diferencia del sistema a escala piloto, el sistema comercial contiene 10 lámparas, distribuidas en serie UV-C que irradian 254 nm.

Estos resultados indican que la respuesta a la dosis de luz UV aplicada varía en función del tipo de néctar, tipo de flujo (laminar o turbulento), así como el tipo y carga microbiana inicial del producto. Por ejemplo, Torkamani & Niakousari (2011) observaron que las levaduras y los mohos son más resistentes al tratamiento con UV-C que las bacterias, pues éstas son más pequeñas, lo que favorece el paso de los rayos ultravioleta. Otra razón probable para esto podría ser la diferencia en la pigmentación o por los sistemas de reparación de las levaduras y mohos.

De modo que será necesario estandarizar el tratamiento UV para cada producto tratado.

3.1.3. Lácteos.

Los métodos de descontaminación tradicionales, como la pasteurización térmica, afectan las propiedades fisicoquímicas y sensoriales de los lácteos. La luz UV-C es una alternativa a los conservantes químicos y procesos térmicos usados para aumentar la vida útil de la leche y el queso (Li et al., 2018). El dilema más habitual en los quesos es la presencia de moho, para ello, exponer la superficie del producto a irradiación UV-C previo a su envasado puede evitar el crecimiento de moho. Por ejemplo, el estudio de Koca et al. (2018) reporta una reducción logarítmica entre 1 a 2 ciclos de *Pseudomonas spp.* y *Enterobacteriaceae* sin cambios en el color y la textura del producto. Respecto a la leche bovina, Choudhary et al. (2011) evidenciaron que la carga microbiana de *E. coli* W1485 disminuyó en 7.78 log en la leche de vaca desnatada, pero en 4.1 log en leche de vaca entera con un reactor UV de tubo enrollado (dosis 11.187 mJ/cm²). Los investigadores también indicaron que las endosporas de *Bacillus cereus* fueron más resistentes que las de *E. coli* W1485 y que estas endosporas disminuyeron en 2.72 y 2.65 log en la leche desnatada y en la leche entera, respectivamente (dosis .187 mJ/cm²). Por su parte, Yin et al. (2015) observaron que la inactivación de *E. coli* O157: H7 en leche bovina entera irradiada a 254 nm fue superior en comparación a los procesos realizados a 222 y 282 nm. Las reducciones de *E. coli* O157:H7 aplicando 254 nm y dosis UV de 5, 10 y 20 mJ/cm² fueron de 1.81, 2.38 y 2.95 log respectivamente. Por su parte, Lacivita et al. (2016) reportaron una extensión de la vida útil en queso Fiordilatte del 80% tratado con dosis de 600 mJ/cm² de UV-C al reducir la carga microbiana de *Pseudomonas spp.*, siendo estos microorganismos los principales responsables de su decoloración anómala y deterioro. Respecto a la leche de cabra, Matak et al. (2005) menciona que la opacidad de este producto restringe la penetración de la luz UV-C, por tanto, el aumento de la turbulencia puede contribuir en la disminución de la carga microbiana al llevar los microorganismos a la superficie de la leche con la suficiente frecuencia como para ser expuestos y eliminados por la irradiación ultravioleta. Esto corroboraría la recomendación

de, Burton (1951) en leches, quien desde entonces sugirió aplicar una longitud de onda de 254 nm a 1 mm de profundidad por su opacidad y a través de un flujo turbulento que asegure su exposición homogénea.

Todos estos estudios sugerirían la importancia de tener flujos turbulentos en fluidos en general y más en aquellos opacos como la leche que expongan a los microorganismos el tiempo suficiente a la fuente de radiación a fin de reducir su carga a un nivel seguro. Resulta importante resaltar que la carga inicial y el tipo de microorganismos, así como probablemente el tipo de leche (su composición) serán factores a considerar en el diseño del equipo y la dosis a aplicar.

Tabla 1. Aplicaciones de luz UV-C en alimentos

Alimento tratado	Características de la muestra	Microorganismo	Concentración inóculo inicial (log UFC/g)	Condiciones del tratamiento UV-C						Reducción microbiana (log UFC/g)	Referencia
				Equipo	Longitud de onda (nm)	Distancia (cm)	Tiempo de exposición (min)	Intensidad de exposición (mW/cm ²)	Dosis de exposición reportada ¹ o calculada ² (mJ/cm ²)		
Frutas											
Arándano	Fruta entera (25 unidades por tratamiento)	<i>Colletotrichum acutatum, syn. C. gloeosporioides</i>	NR	Equipo con lámparas germicidas fluorescentes (30 W)	254	8	1 a 15	NR	100 a 400 ¹	NR	(Perkins et al., 2008)
Durazno	De fruta entera sin defecto se irradió la superficie equivalente a un disco de 5.7 cm de diámetro × 1 cm de altura	<i>Escherichia coli</i> ATTC23716	4.5±1.2x10 ₉	Cámara UV-C Emitter	254	NR	4	NR	756 ¹	2.91±0.284	(Syamaladevi et al., 2013)
Melón	Fruta sin semillas y piel, cortada en cubos de 2 a 3 cm x 2.5 cm con 2.5 cm de espesor	<i>Pseudomonas spp. Bacterias ácido-lácticas Aerobios mesófilos</i>	< 3 < 6 < 8	Equipo UV-C Steril-Aire EmitterTM	254	35	4	NR	240 ¹	< 2 < 3 < 2	(Lamikanra et al., 2005)
Papaya	Fruta cortada y empacada en bolsas de poliestireno (PS)	<i>Rhodotorula glutinis</i>	7	Equipo con lámparas germicidas UV-C de 15W	254	15	9	NR	864 ¹	6.3	(Calderón-Gabaldón et al., 2012)
Tomate	Fruta entera sin defecto	<i>Escherichia coli</i> ATCC 11775	8	1 lámpara germicida	253.7	31	60	1.6	5760 ¹	2.8	(Bermúdez & Barbosa, 2013)
Pera	De fruta entera sin defecto se irradió la superficie equivalente a un disco de 5.7 cm de diámetro × 1 cm de altura	<i>Escherichia coli</i> ATTC23716	4.5±1.2x10 ₉	Cámara UV-C Emitter	254	NR	4	3.15	756 ¹	3.70 ± 0.125	(Syamaladevi et al., 2013)
	Previo a la irradiación se usó una aguja estéril para herir la superficie del disco en la zona ecuatorial; 0.2 cm de diámetro y 0.1 cm de profundidad									3.10 ± 0.329	

Alimento tratado	Características de la muestra	Microorganismo	Concentración inóculo inicial (log UFC/g)	Condiciones del tratamiento UV-C						Reducción microbiana (log UFC/g)	Referencia
				Equipo	Longitud de onda (nm)	Distancia (cm)	Tiempo de exposición (min)	Intensidad de exposición (mW/cm ²)	Dosis de exposición reportada ¹ o calculada ² (mJ/cm ²)		
Jugos											
Mandarina + naranja	Muestra de 745 mL recién exprimida Flujo laminar, Re de 768	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> KE162	8	Equipo de flujo continuo con sistema de recirculación y 2 lámparas UV-C conectadas en serie	253.7	NR	0 a 15	NR	0 a 1720 ¹	3.9 a 4.3	(Fenoglio et al., 2019)
Pera (PJ)	Muestras sin conservantes. Flujo turbulento, Re de 2300 a 7000	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> KE 162, <i>Lactobacillus plantarum</i> ATCC 8014 y <i>Escherichia coli</i> ATCC 25922	8	Reactor de tubo enrollado con una cámara de acero inoxidable y 12 lámparas UV-C de 36 W	254	NR	19	NR	390 ¹	<i>L. plantarum</i> : 5.5 <i>E.coli</i> : 6.7	(Fenoglio et al., 2020)
Naranja+ mandarina (OT)										<i>S. cerevisiae</i> : 1.6 <i>L. plantarum</i> : 2.4 <i>E.coli</i> : 3.8	
Naranja+ plátano+ kiwi+ mango+ fresa (OBMKS)										<i>S. cerevisiae</i> : 1.3 <i>L. plantarum</i> : 3.6 <i>E.coli</i> : 3.7	
Uva blanca	Muestras cernidas 2 veces para eliminar la mayor parte de las partículas sólidas procedentes de la piel de la fruta. Se añadió 400 mg/L de ácido ascórbico para conservar color original del jugo	<i>Escherichia coli</i> K- 12	8	Sistema de flujo anular con sistema de recirculación y 7 lámparas de mercurio de baja presión (15 W)	254	NR	32	NR	9920 ¹	5.34±0.01	(Unluturk & Atilgan, 2015)

Alimento tratado	Características de la muestra		Microorganismo	Concentración inóculo inicial (log UFC/g)	Condiciones del tratamiento UV-C					Reducción microbiana (log UFC/g)	Referencia	
					Equipo	Longitud de onda (nm)	Distancia (cm)	Tiempo de exposición (min)	Intensidad de exposición (mW/cm ²)			Dosis de exposición reportada ¹ o calculada ² (mJ/cm ²)
Uva blanca	Muestras pasteurizadas. jugo de uva menos turbio que el de manzana		Esporas de <i>Alicyclobacillus acidoterrestris</i> DSM 3922	NR	Reactor de haz colimado con 1 lámpara UV-C de mercurio	254	0.15	0 a 15	NR	0 a 489 ¹	5.5	(Baysal et al., 2013)
Manzana				NR						0 a 539 ¹		
Naranja	Jugo industrializado certificado en ausencia de <i>Esporas de Alicyclobacillus spp.</i>		<i>Esporas de Alicyclobacillus acidoterrestris</i> , <i>A. herbarius</i> y <i>A. cycloheptanicus</i>	6	3 lámparas monocromáticas UV-C (15 W)	254	24	20	1.4	1680 ¹	< 4	(Prado et al., 2019)
								15		1260 ¹	1.7	
Lácteos												
Leche de vaca cruda entera	Muestra con 4±0.1% de grasa y 12.8±0.15% de sólidos totales	Flujo laminar, Re de 533 y de 713	<i>Escherichia coli</i> W1485 y <i>Bacillus cereus endospores</i>	SPC: 1.1x10 ⁴ <i>E.coli</i> : no detectado	Equipo de tubo enrollado en espiral construidos utilizando tubos de perfluoroalkoxy (PFA) con diámetro interno de 1.6 mm	254	NR	0.1883	1.375	11.187 ¹ 15.535 ²	A Re de 533 <i>E.coli</i> : 2.95 <i>B. cereus</i> : 2.26	(Choudhar y et al., 2011)
Leche de vaca desnatada		Flujo laminar, Re de 532 y de 1024		<i>Escherichia coli</i> W1485 y <i>Bacillus cereus endospores</i>							SPC: 4.2x10 ³ <i>E.coli</i> : no detectado	
Leche bovina entera pasteurizada	Muestra de 20 mL con 3.25% de grasa		<i>Escherichia coli</i> O157:H7	2 x 10 ⁷	3 lámparas monocromáticas y 1 lámpara de mercurio de baja presión	222	5	6 11.9 23.8	0.014 0.021 0.029	5.04 ² 14.9 ² 41.4 ²	0.72 1.56 2.40	(Yin et al., 2015)
						254		4 7.9 15.9		3.36 ² 9.95 ² 27.7 ²	1.81 2.38 2.95	
						282		2.9 5.7 10.5		6.41 ² 7.18 ² 18.3 ²	1.34 1.70 2.09	

Alimento tratado	Características de la muestra	Microorganismo	Concentración inóculo inicial (log UFC/g)	Condiciones del tratamiento UV-C						Reducción microbiana (log UFC/g)	Referencia
				Equipo	Longitud de onda (nm)	Distancia (cm)	Tiempo de exposición (min)	Intensidad de exposición (mW/cm ²)	Dosis de exposición reportada ¹ o calculada ² (mJ/cm ²)		
Queso cheddar	Rodaja de 25 g empaquetada en película de polietileno (PP) y polipropileno (PP) de 0.07 mm de espesor	<i>Escherichia coli</i> O157:H7, <i>Salmonella Typhimurium</i> y <i>Listeria monocytogenes</i>	<i>E. coli</i> PP: 7.07±0.13 PE: 7.18±0.29 <i>S. Typhimurium</i> PP: 7.48±0.04 PE: 7.43±0.12 <i>L. monocytogenes</i> PP: 6.31±0.25 PE: 6.49±0.19	5 lámparas UV-C	254	10	1	3.04	182.4 ²	<i>E. coli</i> PP: 3.87±0.21 PE: 4.00±0.26 <i>S. Typhimurium</i> PP: 3.88 ± 0.09 PE: 3.91± 0.45 <i>L. monocytogenes</i> PP: 3.49±0.29 PE: 3.6±0.30	(Ha et al., 2016)
Queso Fiordilatte	Muestra de 30 g con 17% de proteína, 1% de CHO, 16.5% de calcio y 0.8% de sal, elaboradas con leche de vaca pasteurizada	<i>Pseudomonas putida</i> (DSM 591) y <i>Pseudomonas fluorescens</i> (DSM 50090)	4.7 ± 0.2	4 lámparas UV-C	257.3	2	12.5	2	1500 ¹	3.1±0.2	(Lacivita et al., 2016)

* NR: no reportado, UFC: unidades formadoras de colonias, Re: número de Reynolds, nm: nanómetro, J/cm²: milijulios por centímetro cuadrado, mW/cm²: milivatios por centímetro cuadrado, Dosis de exposición = intensidad (mW/cm²) x tiempo (s)

3.2. Límites de exposición segura en la industria de alimentos

La radiación UV-C, especialmente a 254 nm, forma dímeros de pirimidina que distorsionan la estructura de ADN y bloquean la replicación celular de microorganismos. Asimismo, a esa longitud de onda se ha evidenciado daños en estos que impiden la replicación y transcripción y por ende, evitan su multiplicación (Morata, 2015). Respecto al efecto sobre la salud humana, hay posiciones contradictorias. Por un lado, hay una posición que señala que el tratamiento de irradiación UV-C prolonga la vida útil de los alimentos líquidos y a su vez representa un peligro mínimo para la salud. Por ejemplo, la Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos (FDA) ha establecido que la luz UV-C es una técnica segura para pasteurizar, específicamente jugos de frutas y lograr una reducción de 5 log de los patógenos más resistentes (FDA, 2001). Adicionalmente, Torkamani & Niakousari (2011) demostraron que la dosis de 125 mJ/cm² es una forma eficaz de incrementar la vida útil de jugo de naranja fresco de 2 a 7 días; para una prolongación mayor, los autores sugieren aplicar dosis más altas. Respecto al jugo de uva blanca recién exprimido, la vida útil del producto se extendió hasta 7 días, tras reducir en 5.4 ciclos logarítmicos la población de *E. coli* K-12 a través de la exposición UV de 9920 mJ/cm² y un caudal de 0.90 mL/s (Unluturk & Atilgan, 2015).

Sin embargo, por otro lado, otros estudios han sugerido que con la exposición a la luz ultravioleta se podría inducir la formación de radicales libres como el peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y el superóxido reductasa (SOR) (Choudhary & Bandla, 2012). Los hidroperóxidos tienen efectos considerables sobre los alimentos. Por ejemplo en leche irradiada, dan lugar a reacciones de pardeamiento, aceleración de oxidación lipídica, cambios de textura debido a la desnaturalización de enzimas y proteínas que tienen aminoácidos con anillos aromáticos en su composición (Choudhary & Bandla, 2012). Más aún, Guneser & Karagul (2012) confirmarían estos problemas e incluyeron otros que serían ocasionados cuando el

tratamiento con luz UV se aplica a dosis altas. Por ejemplo, disminución de algunas vitaminas. Así, al exponer leche de vaca a una dosis de 12.6 J/mL en una sola pasada, los investigadores mencionan que la vitamina A, B₂, C y E del producto se redujo entre un 8-13%, 3-10%, 45-74% y 16-33% respectivamente. Con la misma intensidad, pero en 7 pasadas por el sistema ultravioleta, el contenido de vitamina A, B₂, C y E disminuyó entre un 30-32%, 20.3-31.2%, 91.4-100% y 66.3-70.3%. En leche de cabra, al aplicar 11.72 J/mL de luz UV en una sola pasada, el contenido de vitamina A, B₂, C y E decreció entre un 1-9%, 1-2%, 75-91% y 1-48% respectivamente. Como puede notarse, las pérdidas en ambos productos lácteos variaron en función de su contenido inicial vitamínico, la intensidad del tratamiento y el número de veces que la leche pasó a través del sistema ultravioleta. Por tanto, es imprescindible establecer adecuadamente los límites de exposición UV-C para garantizar la calidad de los alimentos. Preliminarmente se podría pensar que dosis de hasta 1 J/(cm² o mL) parecerían ser seguras para el alimento. Mientras que dosis de 12 J/(cm² o mL) podrían causar alguna alteración en el alimento. Sin embargo, estos valores deben ser considerados como preliminares y deben ser sujetos a comprobación.

En términos de seguridad del operador, se debe evitar la exposición de radiación UV-C a la piel, así como mirar directamente a la fuente que la emita (FDA, 2020). No se ha confirmado de manera concluyente la correlación positiva entre la radiación a corto plazo de 254 nm con cáncer de piel. Sin embargo, la radiación crónica puede generar eritema cutáneo, descamación y hallazgos histológicos anormales (Ploydaeng et al., 2021). El daño ocular suele comenzar con una fotoqueratitis, pero también puede dar lugar a una queratoconjuntivitis actínica (Koutchma et al., 2009). Con el fin de prevenir estas afecciones al usar lámparas UV-C en alimentos, la norma 15858:2016 de la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) menciona que se debe señalar las zonas sujetas a la exposición y promover el uso de cascos, gafas, respiradores u otros equipos diseñados para

proteger al personal (ISO, 2016). De igual manera sería conveniente aislar la fuente de radiación para evitar el contacto con los operadores; de la misma manera como se aíslan los sistemas de pasteurización por calor, para evitar quemaduras de los operadores y pérdidas de energía.

3.3. Factores clave a considerar para el diseño de un pasteurizador UV

En el sector alimentario, el tratamiento UV a aplicarse dependerá de las características físico-químicas de los alimentos (composición, densidad, conductividad, espesor (en sólidos), turbidez, viscosidad, sólidos disueltos (en líquidos), así como de las características microbianas (naturaleza del microorganismo, recuento inicial y capacidad de reparación del ADN microbiano) (Singh et al., 2020). Así, los dos mecanismos de reparación del ADN lesionado como consecuencia de la radiación ultravioleta solar son: i) (reparación oscura) que no precisa de luz, y en la que las bacterias utilizarían el material enzimático de la célula para reconstruir el ADN perjudicado. En las esporas, la reparación inicia tras la germinación. Debido a que los virus no pueden reparar su genoma por si mismos, algunos emplean enzimas de las células huésped. Según los resultados emitidos por Nwachuku et al. (2005), los adenovirus son los microorganismos más resistentes a la inactivación por luz ultravioleta la que dependería de su ADN de doble cadena, el cual es capaz de usar los mecanismos de reparación de la célula huésped (Morata, 2015). ii) En el segundo mecanismo (fotoreactivación), los dímeros de pirimidina formados por la luz UV-C se invierten con la exposición prolongada de luz visible (UV-A) (Cleaver, 1994). Adicionalmente, se ha demostrado que el estado fisiológico de los microorganismos afecta la resistencia a la luz UV-C. Por ejemplo, Malley et al (2004) demostraron que la menor resistencia de las bacterias a tratamientos UV se produce en la fase de crecimiento bacteriano, con la mayor sensibilidad en la fase de crecimiento activo, incremento en la resistencia en la fase estacionaria y la

máxima resistencia con la presencia de envolturas celulares densas (que no permiten la penetración de la radiación al interior) como en el caso de las esporas.

En función de todo lo anterior se deberán fijar los parámetros de procesamiento UV que consideren que toda la superficie del alimento quede expuesta a la luz UV durante un periodo de tiempo suficiente para que cualquier microorganismo presente pueda recibir la dosis letal. Por ejemplo, la dosis de irradiación UV-C de 1400 mJ/cm^2 permite obtener características antioxidantes y el menor recuento microbiano en las frutas tropicales como mango y piña, mínimamente procesadas, según lo reportado por Márquez & Pretell (2013). Respecto al tiempo de exposición, la luz UV no solo dependerá de la dosis que se desea alcanzar, sino también de la capacidad del fruto para resistir al tratamiento, es decir, se debe tener en consideración el tipo de tejido expuesto (se debe analizar si posee una cutícula gruesa, cera protectora, superficie lisa o rugosa, entre otras). En cuanto a la distancia entre el producto y la lámpara de luz UV, estudios sugieren que el equipo debe estar localizado lo más cerca posible al producto durante la irradiación, pues la distancia es inversamente proporcional a la intensidad (Millán et al., 2015).

Entonces, al diseñar el equipo factores a considerar son la intensidad de la fuente UV, dosis de la radiación, tiempo de exposición, y distancia entre el alimento y la fuente de irradiación (para alimentos sólidos). Mientras que en alimentos líquidos, la turbulencia también se debe considerar. Finalmente, y a fin de cumplir con los parámetros de proceso el número y posición de las fuentes de luz UV serán factores determinantes del diseño, así como la seguridad del alimento y del operador del equipo.

4. CONCLUSIONES

- La potencia de la luz UV-C se ve afectada por la geometría de los alimentos, la dosis de irradiación y la distancia entre la lámpara de luz ultravioleta y el alimento.
- La tecnología ultravioleta es una tecnología emergente no térmica prometedora para la desinfección de alimentos. Con la aprobación de la FDA, las industrias alimenticias están probando y validando varias aplicaciones nuevas del procesamiento UV. La irradiación de jugos y lácteos puede proporcionar productos con una calidad organoléptica superior a la pasteurización térmica a una inversión inicial y costos operativos más bajos. Respecto a la agroindustria, el uso de UV-C representa una posibilidad para minimizar pérdidas postcosecha, actividad antioxidante y ofrecer productos estables microbiológicamente.
- La dosis por área es función de la intensidad (mW/cm^2) y del tiempo de exposición (s), para la desinfección de un alimento. La dosis a aplicarse depende del efecto final requerido. La radiación UV-C de onda corta es letal para la mayoría de los microorganismos y puede aplicarse para obtener productos alimenticios seguros. La tasa de reducción microbiana puede obtenerse aplicando una baja intensidad por largos periodos o una alta intensidad durante cortos periodos de tiempo.

5. RECOMENDACIONES

- Debido a que la penetración de luz UV es baja y está asociada con la geometría del alimento, el aumento de la eficiencia de la inactivación de microorganismos se podría lograr a través de la presentación de alimentos en una película delgada. Por ejemplo, Ha et al. (2016) utilizó luz UV-C para inactivar patógenos (*E. coli* O157:H7, *S. Typhimurium* y *L. monocytogenes*) en queso cheddar rebanado y envasado con diferentes tipos y espesores de películas plásticas. Se descubrió que cuando las rebanadas de queso se empaquetaban en películas PP o PE de 0.10 o 0.13 mm de espesor, los niveles de reducción UV-C de los tres patógenos en el alimento, disminuyeron en comparación con los de las muestras no empaquetadas o empaquetadas con películas de 0.07 mm. La película de 0.13 mm generó la menor reducción de carga microbiana y no se determinó diferencia significativa entre la película PP o PE de 0.07mm.

- Cuando se trabaje con alimentos líquidos se debe preferir el flujo turbulento en vez del flujo laminar para la mejor homogenización del producto en el reactor.

- En comparación a la pasteurización térmica, la irradiación UV-C conserva mejor los atributos organolépticos de jugos, sin embargo, hay ciertas limitaciones y defectos asociados con la tecnología como la disminución del contenido de vitaminas y de aminoácidos esenciales en leche. Para contrarrestar este defecto se debería combinar la luz UV-C con otras tecnologías como: campos eléctricos pulsados, atomización ultrasónica, plasma frío y homogeneización por ultra alta presión.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allothman, M., Bhat, R., & Karim, A. A. (2009). Effects of radiation processing on phytochemicals and antioxidants in plant produce. *Trends in Food Science and Technology*, 20(5), 201–212. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.02.003>
- Asgar, S., & Chauhan, M. (2019). Contextualization of traditional dairy products of India by exploring multidimensional benefits of heating. *Trends in Food Science and Technology*, 88(March), 243–250. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.03.033>
- Baysal, A. H., Molva, C., & Unluturk, S. (2013). UV-C light inactivation and modeling kinetics of Alicyclobacillus acidoterrestris spores in white grape and apple juices. *International Journal of Food Microbiology*, 166(3), 494–498. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.08.015>
- Bermúdez, D., & Barbosa, G. (2013). Disinfection of selected vegetables under nonthermal treatments: Chlorine, acid citric, ultraviolet light and ozone. *Food Control*, 29(1), 82–90. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.05.073>
- Bhattacharjee, C., Saxena, V. K., & Dutta, S. (2019). Novel thermal and non-thermal processing of watermelon juice. *Trends in Food Science and Technology*, 93(August), 234–243. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.09.015>
- Calderón-Gabaldón, M., Raybaudi-Massilia, R., Mosqueda-Melgar, J., & Tapia, M. (2012). Efecto de la luz UV-C y ácido málico sobre poblaciones de Rhodotorula glutinis y vida útil de rebanadas de papaya “Maradol.” *Bioagro*, 24(2), 103–114.
- Callejón, R. M., Rodríguez-Naranjo, M. I., Ubeda, C., Hornedo-Ortega, R., Garcia-Parrilla, M. C., & Troncoso, A. M. (2015). Reported foodborne outbreaks due to fresh produce in the united states and European Union: Trends and causes. *Foodborne Pathogens and Disease*, 12(1), 32–38. <https://doi.org/10.1089/fpd.2014.1821>
- Chia, S. L., Rosnah, S., Noranizan, M. A., & Wan Ramli, W. D. (2012). The effect of storage on the quality attributes of ultraviolet-irradiated and thermally pasteurised pineapple juices. *International Food Research Journal*, 19(3), 1001–1010.
- Choudhary, R., & Bandla, S. (2012). Ultraviolet Pasteurization for Food Industry. *International Journal of Food Science and Nutrition Engineering*, 2(1), 12–15. <https://doi.org/10.5923/j.food.20120201.03>
- Choudhary, R., Bandla, S., Watson, D. G., Haddock, J., Abughazaleh, A., & Bhattacharya, B. (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>
- Cleaver, J. (1994). Repair Processes for Photochemical Damage in Mammalian Cells. *Advances in Radiation Biology*, 4, 1–75. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-035404-7.50008-5>

- FAO. (2019). *The Future of Food Contents*. 1–26.
- FDA. (2001). Hazard Analysis and Critical Control Point (HAACP); Procedures for the Safe and Sanitary Processing and Importing of Juice. *U.S. Environmental Protection Agency, Proposed Rules*, 66 No. 2(13), 6138–6202.
- FDA. (2020). *Ultraviolet (UV) Radiation*. <https://www.fda.gov/radiation-emitting-products/tanning/ultraviolet-uv-radiation#UVC>
- Fenoglio, D., Ferrario, M., Schenk, M., & Guerrero, S. (2019). UV-C light inactivation of single and composite microbial populations in tangerine-orange juice blend. Evaluation of some physicochemical parameters. *Food and Bioproducts Processing*, 117, 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.07.005>
- Fenoglio, D., Ferrario, M., Schenk, M., & Guerrero, S. (2020). Effect of pilot-scale UV-C light treatment assisted by mild heat on *E. coli*, *L. plantarum* and *S. cerevisiae* inactivation in clear and turbid fruit juices. Storage study of surviving populations. *International Journal of Food Microbiology*, 332(June), 108767. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108767>
- Fung, F., Wang, H. S., & Menon, S. (2018). Food safety in the 21st century. *Biomedical Journal*, 41(2), 88–95. <https://doi.org/10.1016/j.bj.2018.03.003>
- Geankoplis, C. (1993). *Transport Processes and Unit Operations* (Third). Pentice-Hall International, Inc.
- Guerrero, J. A., & Barbosa, G. V. (2004). Review: Advantages and limitations on processing foods by UV light. *Food Science and Technology International*, 10(3), 137–147. <https://doi.org/10.1177/1082013204044359>
- Guneser, O., & Karagul, Y. (2012). Effect of ultraviolet light on water- and fat-soluble vitamins in cow and goat milk. *Journal of Dairy Science*, 95(11), 6230–6241. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-5300>
- Ha, J. W., Back, K. H., Kim, Y. H., & Kang, D. H. (2016). Efficacy of UV-C irradiation for inactivation of food-borne pathogens on sliced cheese packaged with different types and thicknesses of plastic films. *Food Microbiology*, 57, 172–177. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2016.02.007>
- ISO. (2016). *UV-C Devices — Safety information — Permissible human exposure*. <https://www.iso.org/obp/ui/es/#iso:std:iso:2631:-1:ed-2:v2:en>
- Jung, J., & Skinner, K. (2017). Foodborne and waterborne illness among Canadian Indigenous populations: A scoping review. *Canada Communicable Disease Report*, 43(1), 7–13. <https://doi.org/10.14745/ccdr.v43i01a02>
- Keyser, M., Muller, I. A., Cilliers, F. P., Nel, W., & Gouws, P. A. (2008). Ultraviolet radiation as a non-thermal treatment for the inactivation of microorganisms in fruit juice. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 9(3), 348–354. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2007.09.002>

- Koca, N., Uргу, M., & Saatli, T. E. (2018). Ultraviolet Light Applications in Dairy Processing. *Technological Approaches for Novel Applications in Dairy Processing*, 3–22. <https://doi.org/10.5772/intechopen.74291>
- Koutchma, T., Forney, L., & Moraru, C. (2009). *Ultraviolet Light in Food Technology Principles and Applications* (D.-W. Sun (ed.)). CRC Press Taylor & Francis Group.
- Koutchma, T., Keller, S., Chirtel, S., & Parisi, B. (2004). Ultraviolet disinfection of juice products in laminar and turbulent flow reactors. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 5(2), 179–189. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2004.01.004>
- Koutchma, T., Popović, V., Ros-Polski, V., & Popielarz, A. (2016). Effects of Ultraviolet Light and High-Pressure Processing on Quality and Health-Related Constituents of Fresh Juice Products. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(5), 844–867. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12214>
- Lacivita, V., Conte, A., Manzocco, L., Plazzotta, S., Zambrini, V. A., Del Nobile, M. A., & Nicoli, M. C. (2016). Surface UV-C light treatments to prolong the shelf-life of Fiordilatte cheese. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 36, 150–155. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.06.010>
- Lamikanra, O., Kueneman, D., Ukuku, D., & Bett-Garber, K. L. (2005). Effect of processing under ultraviolet light on the shelf life of fresh-cut cantaloupe melon. *Journal of Food Science*, 70(9). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.tb08301.x>
- Li, Y., Joyner, H. S., Carter, B. G., & Drake, M. A. (2018). Effects of fat content, pasteurization method, homogenization pressure, and storage time on the mechanical and sensory properties of bovine milk. *Journal of Dairy Science*, 101(4), 2941–2955. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13568>
- Lu, H., Li, L., Limwachiranon, J., Xie, J., & Luo, Z. (2016). Effect of UV-C on ripening of tomato fruits in response to wound. *Scientia Horticulturae*, 213, 104–109. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.10.017>
- Márquez, L., & Pretell, C. (2013). UV-C Irradiation in tropical fruits minimally processed. *Scientia Agropecuaria*, 4, 147–161.
- Matak, K. E., Churey, J. J., Worobo, R. W., Sumner, S. S., Hovingh, E., Hackney, C. R., & Pierson, M. D. (2005). Efficacy of UV light for the reduction of *Listeria monocytogenes* in goat's milk. *Journal of Food Protection*, 68(10), 2212–2216. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-68.10.2212>
- Millán, D., Romero, L., Brito, M., & Ramos, A. (2015). Ultraviolet Light : Microbial Inactivation on Fruits. *Saber, Universidad de Oriente*, 27(3), 454–469. <http://www.redalyc.org/pdf/4277/427743080011.pdf>
- Morata, A. (2015). *Nuevas Tecnologías de Conservación de Alimentos* (Segunda, Issue June). Publidisa. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4187.6641>
- Murray, K., Wu, F., Shi, J., Jun Xue, S., & Warriner, K. (2017). Challenges in the microbiological food safety of fresh produce: Limitations of post-harvest washing and

- the need for alternative interventions. *Food Quality and Safety*, 1(4), 289–301.
<https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyx027>
- Nwachuku, N., Gerba, C. P., Oswald, A., & Mashadi, F. D. (2005). Comparative inactivation of adenovirus serotypes by UV light disinfection. *Applied and Environmental Microbiology*, 71(9), 5633–5636. <https://doi.org/10.1128/AEM.71.9.5633-5636.2005>
- Pereira, R. N., & Vicente, A. A. (2010). Environmental impact of novel thermal and non-thermal technologies in food processing. *Food Research International*, 43(7), 1936–1943. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.09.013>
- Perkins, P., Collins, J. K., & Howard, L. (2008). Blueberry fruit response to postharvest application of ultraviolet radiation. *Postharvest Biology and Technology*, 47(3), 280–285. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.08.002>
- Ploydaeng, M., Rajatanavin, N., & Rattanakaemakorn, P. (2021). UV-C light: A powerful technique for inactivating microorganisms and the related side effects to the skin. *Photodermatology Photoimmunology and Photomedicine*, 37(1), 12–19.
<https://doi.org/10.1111/phpp.12605>
- Prado, D. B. do, Szczerepa, M. M. dos A., Capeloto, O. A., Astrath, N. G. C., Santos, N. C. A. dos, Previdelli, I. T. S., Nakamura, C. V., Mikcha, J. M. G., & Abreu Filho, B. A. de. (2019). Effect of ultraviolet (UV-C) radiation on spores and biofilms of *Alicyclobacillus* spp. in industrialized orange juice. *International Journal of Food Microbiology*, 305(May). <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2019.108238>
- Santhirasegaram, V., Razali, Z., George, D. S., & Somasundram, C. (2015). Comparison of UV-C treatment and thermal pasteurization on quality of Chokanan mango (*Mangifera indica* L.) juice. *Food and Bioproducts Processing*, 94(August 2013), 313–321.
<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2014.03.011>
- Singh, H., Bhardwaj, S. K., Khatri, M., Kim, K.-H., & Bhardwaj, N. (2020). UVC radiation for food safety: An emerging technology for the microbial disinfection of food products. *Chemical Engineering Journal*, 128084. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.128084>
- Stevens, C., Liu, J., Khan, V. A., Lu, J. Y., Kabwe, M. K., Wilson, C. L., Igwegbe, E. C. K., Chalutz, E., & Droby, S. (2004). The effects of low-dose ultraviolet light-C treatment on polygalacturonase activity, delay ripening and *Rhizopus* soft rot development of tomatoes. *Crop Protection*, 23(6), 551–554.
<https://doi.org/10.1016/j.cropro.2003.10.007>
- Syamaladevi, R. M., Lu, X., Sablani, S. S., Insan, S. K., Adhikari, A., Killinger, K., Rasco, B., Dhingra, A., Bandyopadhyay, A., & Annature, U. (2013). Inactivation of *Escherichia coli* Population on Fruit Surfaces Using Ultraviolet-C Light: Influence of Fruit Surface Characteristics. *Food and Bioprocess Technology*, 6(11), 2959–2973.
<https://doi.org/10.1007/s11947-012-0989-0>
- Torkamani, A. E., & Niakousari, M. (2011). Impact of UV-C light on orange juice quality and shelf life. *International Food Research Journal*, 18(4), 1265–1268.

- Unluturk, S., & Atilgan, M. R. (2015). Microbial Safety and Shelf Life of UV-C Treated Freshly Squeezed White Grape Juice. *Journal of Food Science*, 80(8), M1831–M1841. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12952>
- Yin, F., Zhu, Y., Koutchma, T., & Gong, J. (2015). Inactivation and potential reactivation of pathogenic *Escherichia coli* O157: H7 in bovine milk exposed to three monochromatic ultraviolet UVC lights. *Food Microbiology*, 49, 74–81. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2015.01.014>