

LUZ ULTRAVIOLETA: INACTIVACIÓN MICROBIANA EN FRUTAS

ULTRAVIOLET LIGHT: MICROBIAL INACTIVATION ON FRUITS

DIONELYS MILLÁN VILLARROEL, LUCÍA ROMERO GONZÁLEZ, MARBELLA BRITO, ANA YNDIRA RAMOS-VILLARROEL

*Universidad de Oriente, Núcleo de Monagas, Escuela de Zootecnia,
Departamento de Biología y Sanidad Animal, Maturín, Venezuela
E-mail: ay2170@gmail.com*

RESUMEN

La radiación ultravioleta es considerada una tecnología emergente que consiste en someter la superficie del alimento a iluminación con longitudes de onda que varían desde 200-280 nm, comprobándose que se presenta una mayor acción germicida a emisiones de 254 nm. Se utilizan dosis que abarcan un intervalo desde 0,2 hasta 20 kJ/m² y la distancia entre el producto y la lámpara varía desde 10 hasta 40 cm. La inactivación microbiana por luz ultravioleta se produce mediante la absorción directa de la energía ultravioleta por el microorganismo y una reacción fotoquímica intracelular resultante que cambia la estructura bioquímica de las moléculas (probablemente en las nucleoproteínas) que son esenciales para la supervivencia del microorganismo. A su vez, induce mecanismos de defensa en el tejido metabólicamente activo de frutas y hortalizas; provocando la producción de fitoalexinas. Este tratamiento es útil como alternativa para prolongar la vida útil de los productos, debido a que requiere una baja inversión, cortos tiempo de exposición y no afecta significativamente las características fisicoquímicas y sensoriales de las frutas frescas. En esta revisión, se presentan los principios, factores y mecanismos de acción que afectan la actividad antimicrobiana y la aplicación de la luz ultravioleta en frutas. Además, se tratan los aspectos que condicionan la eficacia y los efectos de la luz UV sobre la inactivación microbiana en frutas enteras o cortadas, los cambios fisicoquímicos que ocurren en estos sustratos una vez tratados y algunas investigaciones recientes en otros sustratos alimenticios.

PALABRAS CLAVE: Tratamiento no térmico, hormesis, inocuidad, tecnología emergente, vida útil.

ABSTRACT

The ultraviolet radiation is considered an emerging technology which consists in subjecting the surface of the food to light wavelengths ranging from 200-280 nm, and it was found that the greatest germicidal effect is achieved at emissions of 254 nm. The dose used are 0.2 to 20 kJ/m², and the distance between the product and the lamp varies from 10 to 40 cm. Microbial inactivation by ultraviolet light is produced by the direct absorption of ultraviolet energy by the microorganism, and a photochemical reaction resulting that changed the intracellular biochemical structure of the molecules (probably the nucleic acids) that are essential for the survival of the microorganism. In turn, it induces defense mechanisms in the metabolically active tissue of fruit and vegetables, causing the production of phytoalexins. This is useful as an alternative treatment to prolong the shelf life of products, because it requires a low investment, short exposure time and does not significantly affect the physicochemical and sensory characteristics of fresh fruits. In this review, the principles, factors and mechanisms of action affecting the antimicrobial activity and the application of ultraviolet light in fruit are discussed. In addition, the aspects that influence the effectiveness and impact of UV light on the microbial inactivation in whole or cut fruits, physicochemical changes that occur in these substrates once treated and some recent research in other food products are studied.

KEY WORDS: Non-thermal treatment, hormesis, safety, emerging technology, shelf life.

INTRODUCCIÓN

El importante valor nutricional y económico de las frutas frescas es bien conocido. Las frutas junto a las hortalizas son los mejores transportadores de vitaminas, minerales, fibra dietética, antioxidantes y otras sustancias bioactivas. Además proveen de carbohidratos y proteínas. Estos efectos nutricionales y promotores de la salud mejoran el bienestar humano y reducen el riesgo de varias enfermedades (Alzamora *et al.* 2004). El actual ritmo de vida, con escaso tiempo para preparar comidas

equilibradas, ha provocado la demanda de productos vegetales naturales, frescos, saludables y dispuestos para consumir, como los mínimamente procesados en fresco (MPF), denominados comercialmente “cuarta gama” (Artés-Hernández *et al.* 2009). La industria alimentaria al tratar de satisfacer las exigencias de los consumidores por obtener en el mercado productos mínimamente procesados y de larga duración ha impulsado el desarrollo y diseño de nuevas tecnologías, equipos, procesos y metodologías que permitan obtener productos con características semejantes a los alimentos frescos

(Raybaudi-Massilia *et al.* 2006).

Las tecnologías emergentes ofrecen productos en su estado más natural, aumentan la vida de anaquel y ofrecen sobre todo productos inocuos al reducir significativamente la cuenta total microbiana, principalmente los considerados patógenos y de putrefacción en los alimentos (Raybaudi-Massilia *et al.* 2006). Por lo tanto, existe la demanda de tecnologías de procesamiento mínimo tales, como la alta presión, irradiación, pulsos eléctricos, ultrasonidos de potencia, ozono y los campos magnéticos oscilantes. El interés reciente en esas tecnologías es no sólo para obtener alimentos de alta calidad con características frescas, sino también, para proporcionar alimentos con funcionalidades mejoradas (Rawson *et al.* 2011).

Al mismo tiempo, la radiación ultravioleta (UV) ejerce un efecto nocivo sobre el ADN de muchos microorganismos, principalmente la luz UV-C, por ello, inicialmente se utilizó para desinfectar en las industrias alimentarias de: cintas transportadoras, láminas, tapas de cierre, envases, agua, entre otros; posteriormente se ampliaron sus usos hacia los productos alimenticios, entre los cuales se encuentran los vegetales como frutas y hortalizas, induciendo mecanismos de defensa en su tejido metabólicamente activo, y provocando la producción de fitoalexinas (Douillet-Breuil *et al.* 1999). Asimismo, es elegida por tratarse de un proceso que no altera las propiedades sensoriales y reduce el uso de sustancias químicas (Domínguez y Parzanese 2011). La radiación UV como tecnología no térmica de conservación es un tratamiento simple, limpio, se realiza a bajas temperaturas y sin humectación del producto, requiere menos espacio que otros métodos, poco mantenimiento y tiene un bajo costo. Este método, además de poder ser incorporado fácilmente a una línea de procesamiento, requiere una

baja inversión para su implementación convirtiéndolo en una atractiva técnica de descontaminación (Guerrero-Ochoa 2013).

El uso de la radiación UV ha sido aprobado como control en el tratamiento superficial de alimentos, esterilización del agua usada en la producción de alimentos y reducción de patógenos humanos y otros microorganismos en jugos (FDA 2013).

La presente revisión consiste en el fundamento, factores críticos o no del proceso, mecanismos de acción, aplicación, cambios fisicoquímicos en frutas y últimos avances en el campo de la radiación ultravioleta.

GENERALIDADES DE LA APLICACIÓN DE LA LUZ ULTRAVIOLETA (UV-C)

La luz UV es la radiación electromagnética con longitud de onda más corta que la luz visible y más larga que los rayos X; se divide en UV-Cercano (380-200 nm), UV-Lejano (200-10 nm) y UV-Extremo (31-1 nm) (Pachua y Tiwari 2008). Considerando el efecto de la radiación sobre la salud humana y el medio ambiente, a una longitud de onda de 100 a 400 nm, se divide en: UV-A (320-400 nm), UV-B (280-320 nm), UV-C (200-280 nm) y Vacío-UV (100-200 nm) (a veces considerada UV-C o UV-Extremo). En la literatura, han sido documentadas variaciones en los intervalos y la nomenclatura. La luz UV-C posee el mayor efecto germicida, específicamente entre 250 y 270 nm, y la máxima eficiencia para la desinfección se sitúa específicamente a 254 nm (Christen *et al.* 2013). El componente UV en el espectro de radiación electromagnética se presenta en la Figura 1 (Russell 2010).

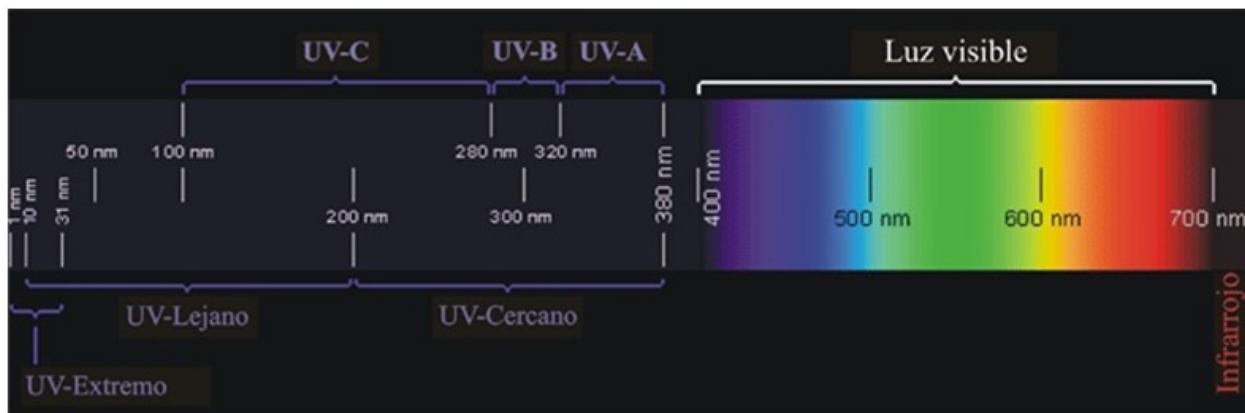


Figura 1. Componente ultravioleta del espectro electromagnético

Las lámparas típicamente usadas para la desinfección con UV-C consisten en tubos de cuarzo que contienen un gas inerte en su interior, como argón, y pequeñas cantidades de mercurio. Las fuentes de radiación usadas pueden ser clasificadas en lámparas de baja y media presión de descarga de mercurio (Pombo 2009).

Aunque los métodos y detalles sobre la desinfección con luz UV son bien conocidos, hasta el punto de que los sistemas de desinfección efectivos pueden ser diseñados e instalados con efectos predecibles, la naturaleza exacta del efecto de la luz UV sobre los microorganismos a nivel molecular es aún un tema de investigación intensiva (Kowalski 2009).

FACTORES CRÍTICOS DEL TRATAMIENTO POR LUZ ULTRAVIOLETA (UV-C) SOBRE LA INACTIVACIÓN MICROBIANA

La eficiencia de esta tecnología dependerá de muchos factores intrínsecos y extrínsecos del alimento, afectando la acción antimicrobiana y conservante de este método.

Dosis de destrucción microbiana

La inactivación del número de microorganismos depende principalmente de la dosis, pudiéndose compensar un menor tiempo de exposición con una mayor irradiación. La dosis necesaria para conseguir inactivaciones del 99, 99,9 y 99,99% son, respectivamente: 2, 3 y 4 veces la dosis (D_{10}) para un 90% de inactivación o un 10% de supervivencia (Osorio-Robles *et al.* 2010). En la mayoría de los casos las dosis usadas abarcan un intervalo desde los 0,2 hasta los 20 kJ/m² (Pombo 2009).

Ahora bien, igualmente la distancia entre la lámpara y el sustrato, el grado de turbidez de la vía de propagación de la luz, afectan la dosis que finalmente alcanza la muestra. Igualmente, este tipo de tratamiento requiere que toda la superficie del objeto quede expuesta a la luz UV durante el tiempo suficiente para que cualquier microorganismo presente pueda acumular la dosis letal. Por lo que es limitada la capacidad de predicción de la tasa de desinfección de la luz UV. Dado que pueden producirse interacciones complejas entre los microorganismos y la composición de la superficie, la eficacia de la luz UV depende de la estructura de la superficie o topografía y presenta su limitación debido al efecto sombra (Koutchma *et al.* 2008).

La intensidad de irradiación (mW/cm²), se puede

calcular mediante la siguiente ecuación (López-Rubira *et al.* 2007):

$$D = \left[\frac{I \cdot t}{1000} \right]$$

D: dosis de irradiación aplicada (kJ/m²)

I: intensidad de irradiación bajo el área de emisión de luz UV-C (W/m²)

t: tiempo de exposición (s)

Cada microorganismo tiene una dosis letal. Algunas bacterias, virus y mohos requieren niveles relativamente bajos de luz UV para ser destruidos. Cuando hay organismos como las esporas de los mohos, la dosis debe ser respectivamente mayor que la necesaria para bacterias (Del Campo-Sacre 2009). Un punto muy importante que se debe tomar en cuenta es la aplicación de la dosis apropiada para asegurar la inocuidad del alimento y evitar la posibilidad de deterioro por fotorreactivación de las células (Del Campo-Sacre 2009). Sin embargo, algunas dosis de luz ultravioleta pueden provocar daños en frutos, como es el caso de dosis de 1,0 kJ/m² que según lo reportado por Baka *et al.* (1999), provocó daños en fresas frescas en las que se buscaba controlar la descomposición causada por *Botrytis cinerea*. Por otra parte, dosis de irradiación UV-C de 7 kJ/m² permiten obtener mejores características fisicoquímicas en mango y mamey y dosis 14 kJ/m² en piña, mínimamente procesadas durante 15 días de almacenamiento a 5°C. La dosis de irradiación UV-C de 14 kJ/m² permite obtener las mayores características antioxidantes y el menor recuento microbiano en las frutas tropicales, mango, piña y mamey, mínimamente procesadas, según lo reportado por Márquez y Pretell (2013). Además la exposición postcosecha de diferentes cultivos a bajas dosis de irradiación muestran una mejora en el almacenamiento (Allothman *et al.* 2009). También se ha reportado que la exposición a dosis bajas de UV-C retrasa la maduración y la senescencia de las manzanas, tomates, naranjas, las uvas de mesa, el mango y melocotones (González-Aguilar *et al.* 2007a)

Tiempo de acción

Como cualquier otro desinfectante, el tiempo de exposición es vital para asegurar un buen desempeño. No es fácil determinar con exactitud el tiempo de contacto (ya que éste depende del tipo de flujo y de las características del equipo), pero el período debería estar relacionado

con la dosificación necesaria (Solsona y Méndez 2002). Entonces se podría decir que cuanto mayor es el tiempo de exposición a una determinada dosis, tanto más eficaz es el tratamiento (Suárez 2001).

El tiempo de aplicación de UV-C oscila entre 1 y 5 min, periodo que no incrementa significativamente la temperatura del tejido (1-3°C), ni produce alteraciones o favorece los procesos deteriorativos del producto (Rivera-Pastrana *et al.* 2007). Sin embargo, González-Aguilar *et al.* (2007a) estudiaron el efecto de diversos tiempos de exposición a luz UV-C en mangos variedad “Haden” enteros, utilizando tiempos de 5 y 10 min de irradiación. La energía total por estos tiempos de tratamientos fue de 2,46 y 4,93 kJ/m², respectivamente, donde la fruta tratada durante 10 minutos se mostró mejor conservada que la fruta tratada durante 5 min. A su vez, Manzocco *et al.* (2011b) describieron el efecto de la luz UV-C en la descontaminación de la superficie de corte de manzanas (*Malus domestica* Borkh) “Pink Lady” frescas cortadas, donde utilizaron un tiempo de exposición de 20 min (con una dosis de 24,0 kJ/m²) y posteriormente redujeron el tiempo a 10, 5 y 1 min. Observándose un efecto germicida similar cuando el tiempo de exposición se redujo. Este resultado indicó que los tratamientos de intensidad leve de luz UV-C a tiempos entre 1 y 5 minutos son suficientes para impartir el efecto germicida para los microorganismos indicadores de contaminación (entre 1 y 2 ciclos log). También Perkins-Veazie *et al.* (2007), estudiaron el efecto de la luz UV-C en arándanos enteros (como tratamiento postcosecha) con tiempos de exposición que variaron de 1 a 15 min, obteniendo dosis de irradiación de 1, 2 y 4 kJ/m². Describiéndose que la dosis con mayor efectividad es la de 2 kJ/m², puesto que logra reducir eficazmente una enfermedad primaria presente en dos variedades de arándanos.

El tiempo de exposición a la luz ultravioleta dependerá no solo de la dosis que se desea alcanzar, puesto que a mayores tiempos de exposición (dependiendo de la intensidad), mayor dosis, sino de la capacidad del fruto para resistir este tratamiento. Se debe tener en cuenta el tipo de tejido vegetal expuesto (si posee una cutícula gruesa, cera protectora, superficie lisa o rugosa, entre otras).

Distancia entre el producto y la lámpara de luz ultravioleta

Es importante destacar que al utilizar UV-C como desinfectante, el equipo debe estar localizado lo más cerca posible al producto en el sistema de proceso.

Debido a que la distancia es inversamente proporcional a la intensidad (Suárez 2001).

Márquez y Pretell (2013) reportaron la utilización de distancias de 12,5 cm en el tratamiento de mango (*Mangifera indica* L.) variedad “Kent”, piña (*Ananas comosus*) variedad “Golden” y Mamey (*Mammea americana*) mínimamente procesados, alcanzado dosis de 7 y 14 kJ/m². Mientras que González-Aguilar *et al.* (2007a) utilizaron para mangos enteros de variedad “Haden” una distancia de 15 cm. Fonseca y Rushing (2006), estudiaron el efecto de la luz UV-C en la calidad y población microbiana de la patilla recién cortada, en la cual utilizaron 15 cm y obtuvieron una reducción decimal de 1 log UFC/g. De igual forma, Artés-Hernández *et al.* (2010) estudiaron el efecto de la luz UV-C en cubos de patilla recién cortada a una distancia de 15 cm.

López-Rubira *et al.* (2005) estudiaron la vida útil y calidad de los arilos de granada envasados en atmosfera modificada tratados con luz UV-C, utilizando distancias de 15 cm entre las muestras y la fuente de luz, con dosis de irradiación que oscilaron entre 0,56 y 13,62 kJ/m². Pan *et al.* (2004) irradiaron fresas a una distancia de 30 cm obteniendo dosis de 1,3, 4,1 y 6,9 kJ/m², en combinación con tratamientos térmicos para mejorar la vida postcosecha de la fresa.

Longitud de onda utilizada

Las longitudes de onda con mayor efecto bactericida son las cercanas a 260 nm. Debido a que la composición del ADN varía entre las especies, se reporta que el pico de absorción de UV-C está en el rango de 260 a 265 nm, correspondiente a la principal emisión de onda de la lámpara de mercurio de baja presión (253,7 nm) y a la eficiencia de inactivación microbiana de estas fuentes de rayos UV-C (Del Campo-Sacre 2009)

La efectividad germicida de la luz UV-C, puede variar entre especies de microorganismos. En la Figura 2 se ilustra su efecto en *Escherichia coli*, donde se observa que la efectividad germicida se alcanza a un pico en alrededor 260-265 nm, que corresponde al pico de absorción ultravioleta para el ADN bacterial. Las lámparas UV de baja presión irradian alrededor del 95% de su energía a una longitud de onda de 253,7 nm; lo cual es coincidentemente cercano al pico de absorción para el ADN (260-265 nm) en el que se tiene alta efectividad germicida. La longitud de onda óptima para la inactivación de *E. coli*, es de aproximadamente 265 nm, la cual es alrededor del 15% más eficaz que el pico de UV-C de

254 nm. Por otra parte, la longitud de onda óptima para la inactivación de *Bacillus subtilis* es de 270 nm, y esto es aproximadamente 40% más eficaz que el pico de UV-C de 254 nm (Kowalski 2009), y la longitud de onda óptima para erradicar los oocistos de *Cryptosporidium parvum* es de 271 nm y esto es aproximadamente un 15% más eficaz que el pico de UV-C de 254 nm (Kowalski 2009).

Los tratamientos con luz UV son capaces de reducir la tasa de maduración de la fruta y activar la respuesta de defensa natural de la planta, por lo que logra aumentar la vida útil después de la cosecha de fruta. En este sentido, los tratamientos basados en la irradiación de UV-C (190-280 nm de longitud de onda), podrían tener los efectos anteriormente mencionados (González-Aguilar *et al.* 2007a)

En cuanto a las longitudes de ondas utilizadas para el tratamiento de frutas, Manzocco *et al.* (2011a) estudiaron el efecto de la luz UV en manzanas, melones y piñas frescas cortadas, utilizando específicamente una longitud de onda de 253,7 nm, ubicándose en el pico de emisión de la luz UV-C. De igual forma en otro estudio realizado por Manzocco *et al.* (2011c) en melón mínimamente procesado se utilizó la misma longitud de onda. Por otra parte, Fonseca y Rushing (2006), utilizaron una lámpara de luz UV con aproximadamente el 95% de emisión de luz UV en el pico de absorción de 254 nm para tratar patilla fresca cortada. Mientras que en el tratamiento

post-cosecha con luz ultravioleta de mangos variedad “Haden” se utilizó aproximadamente una emisión entre los 250-280 nm, en el 82% de los tratamientos (González-Aguilar *et al.* 2007a). Por lo que se puede evidenciar que el rango de luz ultravioleta UV-C es el más utilizado para la inactivación bacteriana en frutas tanto mínimamente procesadas como enteras, debido principalmente a su efectividad bactericida.

Composición del fruto

La constitución del objeto o material que es irradiado, influye de forma muy importante en la eficacia del tratamiento (Suárez 2001). La mayoría de información sugiere que la matriz (composición química y ordenamiento estructural) propia del alimento, juega un papel importante en el daño causado por la irradiación UV-C en el ADN de los microorganismos, ya que dosis similares de UV-C tienen efectos diferentes en el crecimiento de una misma especie microbiana (Rivera-Pastrana *et al.* 2007). Por ello resulta relevante la evaluación de esta tecnología en cada producto en particular y así poder definir las condiciones óptimas de aplicación y los posibles cambios en calidad.

El agua y almidón no presentan una variación particular en el proceso de descontaminación (Gómez-López *et al.* 2005).

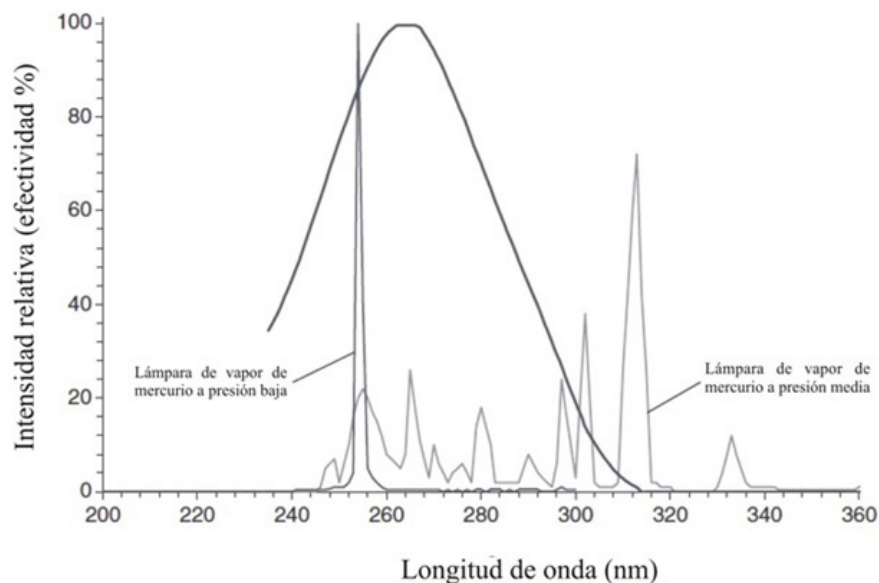


Figura 2. Efectividad germicida de longitudes de onda ultravioleta comparando lámparas UV a presión baja y media con la efectividad germicida para *Escherichia coli*.

La inactivación bacteriana de la luz UV-C, es dependiente de la matriz de la fruta. Las frutas que presentan una superficie plana y lisa están generalmente asociadas a una mayor eficiencia de inactivación bacteriana al ser tratadas con luz UV-C. En cambio, para aquellas frutas con intensa rugosidad en su superficie, como es el caso de la piña, se espera que por el efecto sombra no se logre inactivar ciertas células microbianas, afectando así el efecto germicida. Por otra parte, se supone que la exposición a luz UV promueve la modificación de la estructura celular de la fruta, lo cual conduce a la ruptura de las membranas de las células y favorece la deshidratación progresiva de la muestra. Según el estudio realizado por Manzocco *et al.* (2011a) en frutas como melón, manzana y piña. Por lo que la posibilidad de explotar la luz UV-C como tecnología para extender la vida útil de las frutas frescas cortadas dependerá de la disponibilidad de información sólida sobre los límites sutiles que conducen a efectos de conservación de aquellos que imparten un agotamiento de la calidad (Manzocco *et al.* 2011b)

Al mismo tiempo, se supone que los tratamientos de estrés abiótico, como la irradiación UV-C, pueden afectar el metabolismo secundario de los productos frescos e incrementar la síntesis de compuestos fitoquímicos con actividad antioxidante. Estudios realizados en el mango fresco cortado han reportado un incremento significativo de la actividad antioxidante (ORAC), que puede correlacionarse con aumentos en los contenidos de fenoles y flavonoides totales (González-Aguilar *et al.* 2007b).

Microorganismos

Cada especie microbiana tiene un grado de resistencia característico a la radiación ultravioleta. Este factor depende de la fase de crecimiento y del estado fisiológico de las células microbianas. Si se compara la resistencia de las células vegetativas de unas especies bacterianas con las de otras, la exposición a los rayos ultravioleta destruye las células vegetativas de algunas especies en un tiempo que es más de cinco veces superior al necesario para que las de otras especies sean destruidas, aunque, en general, el tiempo de exposición que las destruye no varía para cada una de las distintas especies. La formación de cápsulas y el agrupamiento de las bacterias aumentan su resistencia a la radiación UV. Para destruir las esporas microbianas, es necesaria una exposición de una duración de dos a cinco veces mayor que la necesaria para destruir las células vegetativas correspondientes. En general las levaduras están dotadas de una resistencia de

dos a cinco veces mayor que las bacterias, aunque algunas se destruyen fácilmente. La resistencia de los mohos es de diez a cincuenta veces mayor que la de las bacterias, los mohos pigmentados a su vez, son más resistentes que los no pigmentados, y las esporas más resistentes que el micelio (Suárez 2001).

Márquez *et al.* (2012) encontraron una mayor actividad antimicrobiana en aerobios mesófilos viables, mohos y levaduras en rebanadas de carambola tratada con luz UV-C (7 y 14 kJ/m²), almacenados por 16 días a 5°C, en comparación con una muestra control. Igualmente, Artés-Hernández *et al.* (2010) reportaron una mayor disminución en el crecimiento de aerobios mesófilos viables en cubos de sandía tratados con irradiación UV-C. También, Birmpa *et al.* (2013) estudiaron la luz ultravioleta junto con la tecnología del ultrasonido como tratamiento no térmico para la inactivación de los microorganismos en alimentos listos para el consumo fresco, en la que utilizó un inóculo inicial de 10⁷-10⁸ UFC/g de *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus enteritis* y *L. innocua* con un tiempo y dosis de exposición de 10, 20, 30, 45 y 60 min, y 1,2; 2,4; 3,6; 5,4 y 7,2 J/cm², respectivamente, logrando así una reducción microbiana de 3,04; 2,41; 5,52 y 6,12 log UFC/g para cada una de las dosis.

Por otra parte, Calderón-Gabaldón *et al.* (2012) y Raybaudi-Massilia *et al.* (2013), estudiaron el efecto de la luz ultravioleta en combinación con ácido málico como agente antimicrobiano en papaya fresca cortada para combatir microorganismos como *Rhodotorula glutinis*, *Listeria monocytogenes* y *Salmonella enterica* ser. Poona. Alcanzando reducciones microbianas de alrededor de 5 log con una dosis de luz UV-C de 0,96 kJ/m² con sólo el efecto de la irradiación en el caso de *Rhodotorula glutinis*. También, se observaron altas reducciones microbianas cuando se aplicaron dosis más altas de la luz UV-C (8,64 kJ/m²) y concentraciones de ácido málico de 1,5%, donde las poblaciones de *Salmonella Poona* y *L. monocytogenes* se redujeron en más de 5 y 3 Log₁₀ UFC/g, respectivamente. Estos resultados según lo reportado por Raybaudi-Massilia *et al.* (2013) demuestran que las poblaciones de *Salmonella Poona* son más sensibles a la luz UV-C que las poblaciones de *L. monocytogenes*, quien pudo evidenciar que las bacterias Gram-positivas son más resistentes a la luz UV que las Gram-negativas, debido a las numerosas capas de peptidoglicano que las Gram-positivas poseen. Sin embargo, en el caso del estudio realizado por Calderón-Gabaldón *et al.* (2012) las máximas reducciones de *R. glutinis* fueron logradas (> 6,3 log) cuando se aplicó una combinación de dosis de

luz UV-C de 8,64 kJ/m² con ácido málico al 1,5%.

Todo ello deja en evidencia, que la luz ultravioleta en combinación con otras tecnologías no térmicas de conservación o agentes antimicrobianos permite lograr mejores reducciones microbianas y por ende un producto más seguro para el consumo humano, a pesar que la luz ultravioleta puede ser considerada una tecnología de conservación por sí sola.

Actividad de agua

Los microorganismos son mucho más sensibles a un ambiente de humedad alta que a un medio de suspensión que es parcial o totalmente deshidratado. En condiciones de humedad baja, el rendimiento de los radicales formados a partir de moléculas de agua mediante irradiación es mucho menor, por lo que el nivel de efectos indirectos sobre el ADN que pueden generar disminuye. El estado parcialmente deshidratado del protoplasto de las esporas bacterianas es un factor importante en la resistencia a la radiación de alta. Durante la germinación, el contenido de agua aumenta el protoplasto de esporas, y la resistencia a la radiación disminuye significativamente. La irradiación de alimentos en estado de congelación aumenta la resistencia de radiación de muchas bacterias vegetativas por un factor de aproximadamente 2 (Anellis *et al.* 1973).

La composición química, el pH, los sólidos disueltos (°Brix), y la actividad de agua tienen que ser considerados como obstáculos que pueden modificar la eficacia de la radiación UV en la inactivación microbiana (Rodríguez y Narciso 2012). Los datos en la bibliografía sobre el efecto de la actividad de agua en el efecto letal de la luz UV son escasos. En términos de los efectos de los parámetros fisicoquímicos del medio de tratamiento, Gayán *et al.* (2012) informaron de la influencia del pH, la actividad de agua y la temperatura sobre la resistencia a la luz UV-C a 253,7 nm de cinco cepas de *Salmonella enterica*. Concluyeron que el pH y la actividad de agua del medio de tratamiento no cambió la tolerancia a la luz UV-C, pero ésta disminuyó exponencialmente al aumentar el coeficiente de absorción.

MECANISMOS DE DESINFECCIÓN O ACCIÓN POR RADIACIÓN ULTRAVIOLETA

En la literatura se han descrito los diversos efectos que tiene la luz ultravioleta tanto sobre las bacterias como en frutas en la inactivación bacteriana, siendo los siguientes mecanismos los principales:

Dimerización del ADN

Los tratamientos con irradiación UV-C inactivan los microorganismos principalmente debido a la inducción de la formación de dímeros de pirimidina que alteran las hélices de ADN y los bloques de replicación de las células microbianas, que destruyen la capacidad de reproducción y otras funciones de la célula (Márquez y Pretell 2013). El mecanismo de daño biológico es consistente con la absorbancia de la luz ultravioleta por el ADN, que alcanza su máximo en la banda UV-C alrededor de 260 nm. Mientras que la luz en la banda UV de vacío (por debajo de 200 nm) es absorbida por el ADN, suele ser biológicamente insignificante debido a su fuerte absorbancia en la atmósfera. La resistencia de los microorganismos a los tratamientos UV-C está determinada principalmente por su habilidad para reparar el ADN dañado. En general la resistencia a la irradiación UV-C está en el orden: Gram negativos < Gram-positivos < levaduras < esporas bacterianas < hongos < virus (Adams y Moss 1995).

Hormesis

La hormesis por efecto de la luz ultravioleta en las frutas y hortalizas frescas ha sido objeto de numerosos estudios en los últimos años (Shama 2007). Cada banda de la UV-C puede inducir significativamente diferentes efectos biológicos en los cultivos (Shama y Alderson 2005). Se han propuesto varias definiciones para el término hormesis. Según Calabrese y Baldwin (2002), la hormesis es una respuesta adaptativa con características diferenciables por la relación dosis-respuesta, que es inducida por un proceso de acción directa o de sobre-estimulación a dosis bajas. En plantas equivale al efecto de la aplicación de dosis bajas de un tratamiento biótico o abiótico potencialmente dañino, que induce respuestas positivas o negativas en los tejidos contra varios tipos de estrés (Shama y Alderson 2005). Hay evidencias del efecto positivo del tratamiento de UV-C en aumentar las propiedades nutraceuticas de los alimentos y la síntesis de compuestos que actúan con los mecanismos de defensa natural de los vegetales expuestos a estrés (Cisneros-Zevallos 2003). La exposición de los tejidos a dosis bajas de irradiación UV puede inducir la producción de compuestos fungicidas como fitoalexinas, y retrasar procesos de maduración y senescencia.

A su vez, el incremento de los compuestos antioxidantes en las frutas después de ser tratadas con luz UV-C se explica mediante las actividades de

enzimas específicas implicadas en el metabolismo de los fenilpropanoides, incluyendo la fenilalanina amoniliasa que cataliza el primer paso comprometido en la vía de la biosíntesis fenólica, después de lo cual las ramificaciones individuales de la vía hacen posible una gama de compuestos secundarios como los compuestos fenólicos (Márquez y Pretell 2013). Por ejemplo se tiene el caso de las frutas tropicales mínimamente procesadas donde la irradiación UV-C causó un importante estrés inicial (hormesis) sobre las células, induciendo el aumento del contenido de compuestos fenólicos totales. Donde la tendencia de incremento del contenido de fenoles totales fue mantenida durante el almacenamiento, encontrándose valores de 54,23; 56,32 y 177,43 mg ácido gálico/100 g para las rebanadas de mango, trozos de piña y tiras de mamey tratadas con 14 kJ/m², respectivamente (Márquez y Pretell 2013).

APLICACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA SOBRE MICROORGANISMOS EN FRUTAS

Debido a la efectividad de la luz ultravioleta como agente desinfectante, se han realizado diversas investigaciones para ampliar sus usos en la industria alimentaria, sobre todo para su utilización en las frutas frescas cortadas como productos de cuarta (IV) gama; por lo cual es necesario mencionar los factores críticos del proceso, las diferencias en los equipos, las condiciones experimentales de los estudios realizados y la variedad de sustratos utilizados que condicionan la efectividad de la luz ultravioleta sobre los microorganismos. No obstante, debido a las diferentes condiciones de estudio, se han arrojado conclusiones que podrían servir como modelo para futuras investigaciones en este campo. Por lo cual, en las tablas 1 y 2 se muestran los resultados más relevantes de los estudios realizados sobre inactivación microbiana mediante el uso de luz UV en frutas enteras y cortadas.

Frutas enteras

Los mecanismos de defensa inducidos por la aplicación de luz UV-C, así como las propiedades germicidas de este tipo de tratamientos, promueven la conservación de la calidad en las frutas (González-Aguilar *et al.* 2005).

La irradiación UV-C se ha estudiado como un tratamiento alternativo reciente para la preservación de frutas (Yaun *et al.* 2004), por ejemplo en frutos de fresa (*Fragaria vesca* Coville), manzana (*Pyrus malus* Borkh), mango (*Mangifera indica* L.), durazno (*Prunus*

persica L.), limón (*Citrus limon* L.), uva de mesa (*Vitis vinifera* L.), tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) y otros (Rivera-Pastrana *et al.* 2007).

La aplicación de irradiación UV-C en frutas ha resultado un sistema efectivo para prolongar la vida útil de estos productos por ser letal para la mayoría de microorganismos. Baka *et al.* (1999), aplicaron luz UV en frutos de fresas frescas para controlar la pudrición causada por el hongo patógeno *Botrytis cinerea* y encontraron que dosis de 0,25 y 1,0 kJ/m² resultan efectivas a temperaturas de almacenamiento de 4 a 13°C para extender la vida útil de los frutos por 4 a 5 días. Stevens *et al.* (1997), señalaron que el tratamiento con UV-C fue efectivo para contrarrestar la pudrición causada por *Monilinia fruticola* en durazno y el deterioro por ataque de *Penicillium digitatum* en mandarina (*Citrus reticulata* Blanco). Kim y Hung (2012), estudiaron el efecto de la luz ultravioleta sobre *Escherichia coli* O157:H7 en mora azul, logrando reducir la población microbiana desde 10⁹ UFC/mL hasta 5,83 log UFC/g con una distancia corta (0,9 cm) entre el sustrato y la lámpara.

Los estudios sobre la influencia de las características de la superficie sobre la cinética de inactivación UV-C de microorganismos en las frutas, son limitados. Syamaladevi *et al.* (2012), estudiaron el efecto de la luz UV-C sobre superficies de pera y durazno para la reducción de *Escherichia coli* genérica (ATCC 23716), una cepa no patógena sustituta para *E. coli* O157:H7; se observó una reducción microbiana de 3,70 ± 0,125 log UFC/g en pera y de 2,91 ± 0,284 log UFC/g en duraznos utilizando una dosis de irradiación de 7,56 kJ/m².

La energía UV a longitud de onda de 253,7 nm fue investigada sobre su efecto bactericida en la superficie de manzanas Red Delicious inoculadas con cultivos de *Escherichia coli* O157:H7 en un intervalo de dosis de 0,54 a 8,64 kJ/m², logrando la mayor reducción (de aproximadamente 3,3 log) a 2,3 kJ/m² (Yaun *et al.* 2004). Las dosis aplicadas en la superficie de tomates enteros, para la distancia más corta empleada, fueron 2,9 - 57,6 kJ/m², logrando una reducción de 2,7 log UFC/mL sobre las poblaciones de *Escherichia coli* ATCC 11775 (Bermúdez y Barbosa 2013).

Syamaladevi *et al.* (2014), utilizaron dosis de 0,101 hasta 3,06 kJ/m² a 23°C para inactivar *Penicillium expansum* en peras enteras, los autores determinaron que una dosis de 1,7 kJ/m² logró una reducción de 2,8 log UFC/mL en el sustrato.

Tabla 1. Inactivación microbiana en frutas enteras tratadas con luz ultravioleta.

Sustrato tratado Fruta entera	Microorganismo	Inóculo inicial	Tiempo de exposición	Dosis de exposición	Distancia (cm)	Reducción microbiana	Referencia
Mora azul	<i>Escherichia coli</i> O157:H7	10 ⁹ UFC/mL	1, 5 y 10 min	20 mW/cm ²	0,9	5,83 log UFC/g	Kim y Hung (2012)
Fresa	<i>Botrytis cinerea</i>	10 ⁴ conidios/mL	NI	0,25 - 4,00 kJ/m ²	25	NR	Nigro <i>et al.</i> (2000)
Pera	<i>Escherichia coli</i>	4,5 ± 1,2x10 ⁹ UFC/mL	4 min	7,56 kJ/m ²	NR	3,70 ± 0,13 log UFC/g	Syamaladevi <i>et al.</i> (2012)
Durazno	<i>Escherichia coli</i>	4,5 ± 1,2x10 ⁹ UFC/mL	4 min	7,56 kJ/m ²	NR	2,91 ± 0,28 log UFC/g	Syamaladevi <i>et al.</i> (2012)
Manzanas	<i>Escherichia coli</i> O157:H7	NI	NI	1,5 a 24 mW/cm ²	NR	3,3 log UFC/g	Yaun <i>et al.</i> (2004)
Tomates	<i>Escherichia coli</i> ATCC 11775	NI	NI	2,9 - 57,6 kJ/m ²	NR	2,7 log UFC/ mL	Bermúdez y Barbosa (2013)
Peras	<i>Penicillium</i> <i>expansum</i>	1,6x10 ⁷ UFC/mL	NI	1,7 kJ/m ²	NR	2,8 log UFC/ mL	Syamaladevi <i>et al.</i> (2013)
Aguacate	<i>Escherichia coli</i> <i>Listeria innocua</i> <i>Salmonella spp.</i>	10 ⁷ UFC/mL	30 s	0,5; 1,0 y 3,0 kJ/m ²	15	1,0 - 3,5 log 1,0 - 3,5 log 5,0 log	Nunes <i>et al.</i> (2011)

NR: no reportado. UFC: unidades formadoras de colonias.

Frutas cortadas

Gómez *et al.* (2010), examinaron el efecto de la luz ultravioleta en rodajas de manzanas recién cortadas, las mismas se inocularon con aproximadamente 5×10^{-4} - 8×10^{-6} UFC/cm² para imitar la contaminación posterior al procesamiento con *Listeria innocua*, *Escherichia coli* y *Saccharomyces cerevisiae*. Las rodajas de manzanas se irradiaron a diferentes tiempos de exposición durante 10, 15 o 25 min con dosis de 5,6; 8,4 y 14,1 kJ/m² respectivamente, mostrando una reducción entre 1,0 y 1,9 ciclos log para las rodajas sin inmersión y una reducción de 0,2-0,7 ciclos log para las rodajas pre-tratadas con ácido ascórbico y cloruro de calcio tratadas durante 20 min con irradiación UV-C. También fue investigado el efecto bactericida de la luz ultravioleta (a una longitud de onda de 253,7 nm) en rodajas de pera con y sin cáscara, contra cepas de *Listeria innocua* ATCC 33090, *Listeria monocytogenes* ATCC 19114 D, *Escherichia coli* ATCC 33090; y *Zygosaccharomyces bailii* NRRL 7256. Siendo expuestos a dosis de UV-C entre 0 y 87 kJ/

m², mostrándose mayores índices de reducción entre 0 y 15 kJ/m² (Schenk *et al.* 2008). Calderón-Gabaldón *et al.* (2012), evaluaron el efecto de diferentes dosis de luz UV-C y ácido málico sobre *Rhodotorula glutinis* (flora deteriorativa predominante) en trozos de papaya frescas cortadas, inoculadas sobre su superficie con un cultivo puro de *R. glutinis* (10⁷ UFC/g) y después tratadas con luz UV-C (0; 0,96; 2,88; 5,76 y 8,64 kJ/m²). Se observaron diferencias significativas entre los recuentos de *R. glutinis* en las rebanadas frescas tratadas, encontrándose que dosis de luz UV-C de 8,64 kJ/m² ejercieron la mayor inactivación de la población (6,3 log UFC/g). Igualmente, Raybaudi-Massilia *et al.* (2013) evaluaron la efectividad de la luz ultravioleta sobre *Listeria monocytogenes* y *Salmonella enterica* ser. Poona en papaya fresca cortada con el mismo inóculo y distancia de exposición, variando el tiempo y dosis de exposición en combinación con inmersiones en ácido málico a diversas concentraciones, obteniéndose reducciones de 3,15 log UFC/g y 5,28 log UFC/g, respectivamente. A su vez, aguacates frescos cortados se inocularon con una suspensión de 10⁷ UFC/

mL de *Escherichia coli*, *Listeria innocua* y *Salmonella* spp., los cuales fueron tratados con diferentes dosis de luz UV-C (0,5, 1,0 y 3,0 kJ/m²). Las dosis de 1,0 y 3,0 kJ/m² fueron los tratamientos con actividad bactericida

más eficaz, permitieron una reducción de la población de *L. innocua* y *Salmonella* superior a 5,0 unidades log y de *E. coli* 2,0-3,5 unidades logarítmicas (Nunes *et al.* 2011).

Tabla 2. Inactivación microbiana en frutas cortadas tratadas con luz ultravioleta.

Sustrato tratado Fruta cortada	Microorganismo	Inóculo inicial	Tiempo de exposición (min)	Dosis de exposición	Distancia (cm)	Reducción microbiana	Referencia
Fresa	<i>Botrytis cinerea</i>	NI	5; 7,5 y 10	NI	30, 40 y 50	< 2,40x10 ² UFC/g	Beltrán <i>et al.</i> (2010)
Fresa	<i>Escherichia coli</i> <i>Staphylococcus aureus</i> <i>Salmonella enteritidis</i> <i>Listeria innocua</i>	107 - 108 UFC/g	10, 20, 30, 45 y 60	1,2; 2,4; 3,6; 5,4 y 7,2 J/cm ²	8	1-1,4 log UFC/g	Birmpa <i>et al.</i> (2013)
Manzana	<i>Listeria innocua</i> <i>Escherichia coli</i> <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	5x10 ⁻⁴ - 8x10 ⁻⁶ UFC/g	10, 15 y 25	5,6; 8,4 y 14,1 kJ/m ²	10	1,0 - 1,9 0,2 - 0,7	Gómez <i>et al.</i> (2010)
Guayaba	Aerobios mesófilos Levaduras y Mohos	NI	NI	2,4 kJ/cm 2,4 kJ/cm	NR	0,51 UFC 0,53 UFC	Guevara <i>et al.</i> (2011)
Papaya	<i>Rhodotorula glutinis</i>	107 UFC/g	9	8,64 kJ/m ²	15	6,3 log UFC/g	Calderón - Gabaldón <i>et al.</i> (2012)
Papaya	<i>Listeria monocytogenes</i> <i>Salmonella enterica ser. Poona</i>	107 UFC/mL	0, 1, 3, 6 y 9	0,00; 0,96; 2,88; 5,76 y 8,64 kJ/m ²	15	3,15 log UFC/g 5,28 log UFC/g	Raibaudi - Massilia <i>et al.</i> (2013)
Melón	<i>Pseudomonas</i> spp. Bacterias ácido lácticas Aerobios mesófilos	< 3 log 10 UFC/g < 6 log 10 UFC/g < 8 log 10 UFC/g	4	2,4 kJ/m ²	35	< 2 log UFC/g < 3 log UFC/g < 2 log UFC/g	Lamikanra <i>et al.</i> (2005)

NR: no reportado. UFC: unidades formadoras de colonias.

Una dosis de UV-C de 2,4 kJ/m² por 4 min aplicada al melón (*Cucumis melo L.*) mínimamente procesado antes y durante el corte, fue efectiva en reducir las poblaciones de levaduras, hongos y *Pseudomona* spp. Durante el almacenamiento a 10°C; las poblaciones de microorganismos mesófilos aerobios y bacterias lácticas se redujeron sólo cuando la UV-C se aplicó durante el procesamiento (Lamikanra *et al.* 2005). Birmpa *et al.* (2013), estudiaron la eficacia de la luz UV en la descontaminación de fresas cortadas inoculadas con un cóctel de cuatro bacterias, logrando reducciones de 1-1,4 log UFC/g de *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Salmonella enteritidis* y *Listeria innocua*.

CAMBIOS FISICOQUÍMICOS EN FRUTAS TRATADAS CON LUZ ULTRAVIOLETA

Los productos vegetales mínimamente procesados son, por lo general, más perecederos que los productos intactos de los que proceden, siendo su vida útil entre siete y diez días. Las modificaciones de calidad más importantes que sufren se deben a la presencia de

superficies cortadas y tejidos vegetales dañados, a que dicho proceso no puede asegurar la esterilización o la estabilidad microbiológica del producto y a su metabolismo que sigue estando activo. Así, las reacciones de degradación que se producen afectan las cualidades organolépticas tales como el color, firmeza, aroma, sabor y valor nutricional haciéndolos más susceptibles a perder su calidad higiénico-sanitaria (Lobo y González 2006). El alto carácter perecedero de las frutas, aunado al mal manejo poscosecha y uso de tecnologías de acondicionamiento y almacenamiento inadecuadas, se traduce en elevadas pérdidas de la calidad durante su comercialización y distribución en los mercados (Rivera-Pastrana *et al.* 2007).

Tratamientos que usan la irradiación UV-C, han sido probados como una alternativa tecnológica capaz de reducir la tasa de maduración y activar una respuesta de defensa natural en la planta para incrementar la vida poscosecha de frutas y mejorar su calidad (Andrade y Moreno 2010).

Tabla 3. Investigaciones recientes en diferentes sustratos alimenticios utilizando tratamientos de luz ultravioleta.

Sustrato tratado	Microorganismo	Inóculo Inicial	Tiempo de exposición (min)	Dosis de Exposición	Distancia (cm)	Reducción Microbiana	Referencia
Néctar de granadilla	Aerobios mesófilos Levaduras y Mohos	NI	NI	0,024 kJ/cm 0,011 kJ/mL	NR	0,51-0,53 UFC/mL 1,36 UFC/mL	Guevara <i>et al.</i> (2011)
Zapallo anco	Aerobios mesófilos Levaduras y Mohos	2,59 log UFC/g 2,68 log UFC/g	NI	3,140 kJ/m ² 2,08 kJ/m ²	30	> 1 log UFC/g < 1 log UFC/g	Sgroppo y Sosa (2009)
Jugo de pitahaya	Aerobios mesófilos Levaduras y Mohos	NI	5, 10, 15, 20 y 25	57 µW/cm ²	NR	2,11 ciclos log 1,14 ciclos log	Ochoa-Velasco y Guerrero-Beltrán (2012)
Lechuga	<i>Escherichia coli</i> <i>Staphylococcus aureus</i> <i>Salmonella enteritidis</i> <i>Listeria innocua</i>	107-108 UFC/g	10, 20, 30, 45 y 60	1,2; 2,4; 3,6; 5,4 y 7,2 J/ cm ²	8	3,04 1,71 5,72 1,78 log UFC/g	Birmpa <i>et al.</i> (2013)

NR: no reportado. UFC: unidades formadoras de colonias.

Según Rodrigues y Narciso (2012), encontraron que un tratamiento óptimo con luz UV puede aumentar la vida útil de fresas, manzanas y melocotones por la reducción de la tasa de respiración y la pérdida de peso, reteniendo la calidad visual total, retrasando la maduración, la fuga de electrolitos y manteniendo la firmeza por tiempos más prolongados, en comparación con los controles. Con el fin de aumentar la vida útil, las condiciones de procesamiento, la dosis de UV (kJ/m^2), y los espectros de emisión deben ser optimizados para un producto dado de los cultivos. Se ha recomendado $1,0 \text{ kJ/m}^2$ como fluencia óptima para el procesamiento con luz ultravioleta de fresas ya que en tratamientos superiores, los autores observaron pardeamiento y deshidratación de los sépalos. Estos mismos autores, han encontrado niveles de fluencia UV-C de aproximadamente $4\text{-}5 \text{ kJ/m}^2$ que tienen el efecto más beneficioso sobre la vida útil y la calidad de frutos de mango. Beaulieu (2007) y Lamikanra *et al.* (2005) informaron que las frutas procesadas con luz UV conservan su aroma al igual que las muestras control que no fueron tratadas, los autores estudiaron el efecto de la radiación ultravioleta en el sabor de las frutas.

RESULTADOS PUBLICADOS RECIENTEMENTE EN ALIMENTOS DISTINTOS A LAS FRUTAS TRATADOS CON LUZ ULTRAVIOLETA

Como contribución al conocimiento de las investigaciones realizadas recientemente en sustratos alimenticios distintos a las frutas, que son el objeto de esta revisión, la Tabla 3 muestra un resumen de algunos trabajos presentados desde el año 2009 al presente, utilizando la tecnología de luz ultravioleta para la inactivación de microorganismos.

CONCLUSIONES

Los resultados de los estudios contenidos en esta revisión demuestran que la aplicación de luz ultravioleta como tecnología no térmica, influye directamente sobre los parámetros de calidad e higiene, produciendo alimentos microbiológicamente seguros para el consumo humano. Un factor determinante en la reducción de la carga microbiana es la relación entre el tiempo de exposición y la distancia de las lámparas del sustrato. El conocimiento de los mecanismos de inactivación y el número de estudios sobre la aplicación de esta tecnología en los alimentos ha aumentado considerablemente. Sin embargo los resultados obtenidos hasta el momento, sugieren que el enfoque más adecuado para la aplicación industrial del tratamiento con luz UV es la combinación con otros tratamientos, buscando el establecimiento

de interacciones sinérgicas entre ellos. En resumen se puede afirmar que la utilización de la luz ultravioleta es útil como alternativa para prolongar la vida útil de los productos, debido a que requiere una baja inversión, cortos tiempos de exposición y no afecta significativamente las características físico-químicas y sensoriales.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente. Así como también al Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (FONACIT) bajo el proyecto No. 20140000042.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS M, MOSS M. 1995. Food microbiology. The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK, pp. 398.
- ALOTHMAN M, BHAT R, KARIM A. 2009. Effects of radiation processing on phytochemicals and antioxidants in plants produce. Trends Food Sci. Technol. 20(5):201-212.
- ALZAMORA S, GUERRERO S, NIETO A, VIDALES S. 2004. Conservación de frutas y hortalizas mediante tecnologías combinadas. Manual de capacitación. Servicio de Tecnologías de Ingeniería Agrícola y Alimentaria (AGST), Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Italia, pp. 69.
- ANDRADE M, MORENO C. 2010. Influencia del tratamiento UV-C sobre carambola (*Averrhoa carambola* L.) mínimamente procesada. Rev. Cien. Enfoque. 1(1):1-11.
- ANELLIS A, BERKOWITZ D, KEMPER D. 1973. Comparative resistance of non-sporogenic bacteria to low-temperature gamma irradiation. Appl. Microbiol. 25(4):517-523.
- ARTÉS-HERNÁNDEZ F, AGUAYO E, GÓMEZ P, ARTÉS F. 2009. Productos vegetales mínimamente procesados o de la "cuarta gama". Hort. Int. 69(1):52-57.
- ARTÉS-HERNÁNDEZ F, ROBLES P, GÓMEZ P, CALLEJAS A, ARTÉS F. 2010. Low UV-illumination for keeping overall quality of fresh-cut watermelon. Postharvest Biol. Technol. 55(2):114-120.
- BAKA M, MERCIER J, CORCUFF F, CASTAIGNE F, ARUL

- J. 1999. Photochemical treatment to improve storability of fresh strawberries. *J. Food Sci.* 64(6):1068-1072.
- BEAULIEU J. 2007. Effect of UV irradiation on cut cantaloupe: terpenoids and esters. *J. Food Sci.* 72(4):272-281.
- BELTRÁN A, RAMOS M, ÁLVAREZ M. 2010. Estudio de la vida útil de fresas (*Fragaria vesca*) mediante tratamiento con radiación ultravioleta de onda corta (UV-C). *Rev. Tecnol. Espol.* 23(2):17-24.
- 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.
- BIRMPA A, SFIKA V, VANTARAKIS A. 2013. Ultraviolet light and ultrasound as non-thermal treatments for the inactivation of microorganisms in fresh ready-to-eat foods. *Int. J. Food Microbiol.* 167(1):96-102.
- CALABRESE E, BALDWIN L. 2002. Defining hormesis. *Hum. Exp. Toxicol.* 21(2):91-97.
- CALDERÓN-GABALDÓN M, RAYBAUDI-MASSILIA R, MOSQUEDA-MELGAR J, TAPIA M. 2012. Effect of UV-C light and malic acid on *Rhodotorula glutinis* and shelf-life of fresh-cut 'Maradol' papaya. *Bioagro.* 24(2):103-114.
- CHRISTEN L, LAI C, HARTMANN B, HARTMANN P, GEDDES D. 2013. Ultraviolet-C radiation: a novel pasteurization method for donor human milk. *PLoS One.* 8(6):e68120.
- CISNEROS-ZEVALLOS L. 2003. The use of controlled postharvest abiotic stresses as a tool for enhancing the nutraceutical content and adding-value of fresh fruits and vegetables. *J. Food Sci.* 68(5):1560-1564.
- DEL CAMPO-SACRE J. 2009. Inactivación de esporas de *Aspergillus* mediante la combinación de radiación ultravioleta de onda corta y agentes antimicrobianos en néctar de durazno. Puebla, México: Universidad de las Américas, Departamento de Ingeniería Química y Alimentos [Disertación Grado Ingeniero de Alimentos], pp. 136.
- DOMÍNGUEZ L, PARZANESE M. 2011. Luz ultravioleta en la conservación de alimentos. *Alimentos Argentinos.* 52(2):70-76.
- DOUILLET-BREUIL A, JEANDET P, ADRIAN M, BESSIS R. 1999. Changes in the phytoalexin content of various *Vitis* spp. in response to ultraviolet C elicitation. *J. Agric. Food Chem.* 47(10):4456-4461.
- FDA (FOOD AND DRUG ADMINISTRATION). 2013. Ultraviolet radiation for the processing and treatment of food. Food and Drug Administration. Electronic Code of Federal Regulations (CFR), USA. Disponible en línea en: http://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-id.x?SID=13e5fb3cd24c76566b0615ec4109fc2c&node=se21.3.179_139&rgn=div8 (Acceso 20.09.2014).
- FONSECA J, RUSHING J. 2006. Effect of ultraviolet-C light on quality and microbial population of fresh-cut watermelon. *Postharvest Biol. Technol.* 40(3):256-260.
- GAYÁN E, SERRANO M, RASO J, ÁLVAREZ I, CONDÓN S. 2012. Inactivation of *Salmonella* enterica by UV-C light alone and in combination with mild temperatures. *Appl. Environ. Microbiol.* 78(23):8353-8361.
- GÓMEZ P, ALZAMORA S, CASTRO M, SALVATORI D. 2010. Effect of ultraviolet-C light dose on quality of cut-apple: microorganism, color and compression behavior. *J. Food Eng.* 98(1):60-70.
- GÓMEZ-LÓPEZ V, DEVLIEGHIERE F, BONDUELLE V, DEBEVERE J. 2005. Factors affecting the inactivation of microorganisms by intense light pulses. *J. Appl. Microbiol.* 99(2):460-470.
- GONZÁLEZ-AGUILAR G. 2005. Sanitizantes utilizados. *In: GONZÁLEZ-AGUILAR G, GARDEA A, CUAMEA-NAVARRO F (Eds). Nuevas tecnologías de conservación de productos vegetales frescos cortados.* Logiprint Digital, Guadalajara, México, pp. 271-285.
- GONZÁLEZ-AGUILAR GA, ZAVALA-GATICA R, TIZNADO-HERNÁNDEZ ME. 2007a. Improving postharvest quality of mango 'Haden' by UV-C treatment. *Postharvest Biol. Technol.* 45(1):108-116.

- GONZÁLEZ-AGUILAR G, VILLEGAS-OCHOA M, MARTÍNEZ-TÉLLEZ G, AYALA-ZAVALA F. 2007b. Improving antioxidant capacity of fresh-cut mangoes treated with UV-C. *J. Food Sci.* 72(3):197-202.
- GUERRERO-OCHOA M. 2013. Efecto del uso combinado de la radiación UV-C y atmósfera modificada en el tiempo de vida útil de uvilla orgánica (*Physalis peruviana*) sin capuchón. Quito: Universidad Tecnológica Equinoccial, Facultad de Ciencias de la Ingeniería [Disertación Grado Ingeniero de Alimentos], pp. 78.
- GUEVARA M, TAPIA M, GÓMEZ-LÓPEZ V. 2011. Microbial inactivation and quality of Guava and Passion Fruit Nectars treated by UV-C light. *Food Bioprocess Technol.* 5(2):803-807.
- KIM C, HUNG Y. 2012. Inactivation of *E. coli* 0157:H7 on blueberries by electrolyzed water, ultraviolet light, and ozone. *J. Food Sci.* 77(4):206-211.
- KOUTCHMA T. 2008. UV Light for processing Foods. *IUVA News.* 10(4):24-29.
- KOWALSKI W. 2009. Ultraviolet germicidal irradiation handbook. Springer-Verlag, Berlin, Germany, pp. 17-50.
- LAMIKANRA O, KUENEMAN D, UKUKU D, BETT-GARBER K. 2005. Effect of processing under ultraviolet light on the shelf life of fresh-cut cantaloupe melon. *J. Food Sci.* 70(9):C534-C539.
- LOBO M, GONZÁLEZ M. 2006. Estado actual de los productos mínimamente procesados en España. Instituto Canario de Investigaciones Agrarias. España. Disponible en línea en: <http://www.icia.es/icia/download/postcosecha/procesado%20minimo%20en%20espa%F1a.pdf> (Acceso 09.08.2014).
- LÓPEZ-RUBIRA V, CONESA A, ALLENDE A, ARTÉS F. 2005. Shelf life and overall quality of minimally processed pomegranate arils modified atmosphere package and treated with UV-C. *Postharvest Biol. Technol.* 37(2):174-185.
- LÓPEZ-RUBIRA V, ARTÉS-HERNÁNDEZ F, ARTÉS F. 2007. Evaluación de la calidad de granadas tratadas con UV-C y almacenadas en atmósfera controlada. Tecnología, calidad y seguridad hortofrutícola. Repositorio Digital, Universidad de Cartagena. España. Disponible en línea en: <http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/491/1/ecg.pdf> (Acceso 10.08.2014).
- MANZOCCO L, DA PIEVE S, BARTOLOMEOLI I, MAIFRENI M. 2011a. Shelf life extension of fresh-cut fruit by UV-light exposure. Università degli Studi di Udine. Italia. Disponible en línea en: <http://www.icef11.org/content/papers/nfp/NFP114.pdf> (Acceso 03.09.2014).
- MANZOCCO L, DA PIEVE S, BERTOLINI A, BARTOLOMEOLI I, MAIFRENI M, VIANELLO A, NICOLI M. 2011b. Surface decontamination of fresh-cut apple by UV-C light exposure: Effects on structure, colour and sensory properties. *Postharvest Biol. Technol.* 61(2-3):165-171.
- MANZOCCO L, DA PIEVE S, MAIFRENI M. 2011c. Impact of UV-C light on safety and quality of fresh-cut melon. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 12(1):13-17.
- MÁRQUEZ L, PRETELL C. 2013. Irradiación UV-C en frutas tropicales mínimamente procesadas. *Sci. Agropecu.* 4(3):147-161.
- MÁRQUEZ L, PRETELL C, MINCHÓN C. 2012. Efecto de la dosis de irradiación UV-C y tiempo de almacenamiento sobre las características fisicoquímicas, microbiológicas y antioxidantes en rebanadas de carambola (*Averrhoa carambola* L.), variedad Golden Star mínimamente procesada. *Pueblo Cont.* 23(2):353-369.
- NIGRO F, IPPOLITO A, LATTANZIO V, DI VENERE D, SALERNO M. 2000. Effect on ultraviolet-C light on postharvest decay of strawberry. *J. Plant Pathol.* 82(1):29-37.
- NUNES C, GRAÇA A, SALAZAR M, ABADIAS M, USALL J. 2011. Potential of UV-C illumination for reducing microbial pathogens in fresh-cut avocado. International Society for Horticultural Science. Belgium. Disponible en línea en: <http://www.poscosecha.com/download/news/79169/5942/635110404/35052/cms/120229+uv+aguacate+or+por+txt.docx/> (Acceso

- 02.08.2014).
- OCHOA-VELASCO C, GUERRERO-BELTRÁN J. 2012. Ultraviolet-C light effect on pitaya (*Stenocereus griseus*) juice. *J. Food Res.* 1(2):60-70.
- OSORIO-ROBLES F, TORRES-ROJO J, SÁNCHEZ-BAS M. 2010. Tratamientos de aguas para la eliminación de microorganismos y agentes contaminantes: Aplicación de procesos industriales a la reutilización de aguas residuales. Ediciones Díaz de Santos, Madrid, España, pp. 23.
- PAN J, VICENTE A, MARTÍNEZ G, CHAVES A, CIVELLO P. 2004. Combined use of UV-C irradiation and heat treatment to improve postharvest life of strawberry fruit. *J. Sci. Food Agric.* 84(14):1831-1838.
- PACHUAU Z, TIWARI R. 2008. Ultraviolet light- its effects and applications. *Sci. Vision.* 8(4):128-136.
- PERKINS-VEAZIE P, COLLINS J, HOWARD L. 2008. Blueberry fruit response to postharvest application of ultraviolet radiation. *Postharvest Biol. Technol.* 47(3):280-285.
- POMBO M. 2009. Irradiación de frutillas con UV-C: efecto sobre la síntesis de proteínas, degradación de la pared celular y mecanismos de defensa. San Martín: Universidad Nacional de San Martín, Laboratorio de Bioquímica y Fisiología de la Maduración y Senescencia [Disertación Doctorado], pp. 120.
- RAWSON A, PATRAS A, TIWARI B, NOCI F, KOUTCHMA T, BRUNTON N. 2011. Effect of thermal and no thermal processing technologies on the bioactive content of exotic fruits and their products: Review of recent advances. *Food Res. Int.* 44(7):1875-1887.
- RAYBAUDI-MASSILIA RM, SOLIVA R, MARTÍN O. 2006. Uso de agentes antimicrobianos para la conservación de frutas frescas y frescas cortadas. In: GONZÁLEZ-AGUILAR GA, GARDEA AA, CUAMEA-NAVARRO F (Eds.). Aseguramiento de la calidad microbiológica. CIAD, Hermosillo, Sonora, México, pp 15-21.
- RAYBAUDI-MASSILIA R, CALDERÓN-GABALDÓN M, MOSQUEDA-MELGAR J, TAPIA M. 2013. Inactivation of *Salmonella* enterica ser. Poona and *Listeria monocytogenes* on fresh-cut 'Maradol' red papaya (*Carica papaya L*) treated with UV-C light and malic acid. *J. Verbr. Lebensm.* 8(1-2):37-44.
- RIVERA-PASTRANA D, GARDEA-BÉJAR A, MARTÍNEZ-TÉLLEZ MIGUEL A, RIVERA-DOMÍNGUEZ M, GONZÁLEZ-AGUILAR G. 2007. Efectos bioquímicos postcosecha de la irradiación UV-C en frutas y hortalizas. *Rev. Fitotec. Mex.* 30(4):361-372.
- RODRIGUES S, NARCISO F. 2012. Advances in Fruit Processing Technologies. CRC Press Taylor & Francis Group, Florida, USA, pp. 472.
- RUSSELL R. 2010. Ultraviolet (UV) radiation. National Earth Science Teachers Association (NESTA). University Corporation for Atmospheric Research. USA. Disponible en línea en: http://www.windows2universe.org/physical_science/magnetism/em_ultraviolet.html&edu=high (Acceso 20.08.2014).
- SCHENK M, GUERRERO S, ALZAMORA S. 2008. Response of some microorganisms to ultraviolet treatment on fresh-cut pear. *Food Bioprocess Technol.* 1(4):384-392.
- SGROPPO S, SOSA C. 2009. Zapallo anco (*Cucurbita moschata*, D.) fresco cortado tratado con luz UV-C. *Rev. FACENA.* 25:7-19.
- SHAMA G. 2007. Process challenges in applying low doses of ultraviolet light to fresh produce for eliciting beneficial hormetic responses. *Postharvest Biol. Technol.* 44(1):1-8.
- SHAMA G, ALDERSON P. 2005. UV hormesis in fruits: a concept ripe for commercialization. *Trends Food Sci. Technol.* 16(4):128-136.
- SOLSONA F, MÉNDEZ J. 2002. Desinfección del agua. CEPIS, Lima, Perú, pp.77-91.
- STEVENS C, KHAN V, LU J, WILSON C, PUSEY P, IGWEGBE E, KABWE K, MAFOLO Y, LIU J, CHALUTZ E, DROBY S. 1997. Integration of ultraviolet (UV-C) light with yeast treatment for control of postharvest storage rots of fruits and vegetables. *Biol. Control.* 10(2):98-103.
- SUÁREZ R. 2001. Conservación de alimentos por

irradiación. *Rev. Invenio*. 4(6):85-124.

SYAMALADEVI R, LU X, SABLANI S, INSAN S, ADHIKARI A, KILLINGER K, RASCO B, DHINGRA A, BANDYOPADHYAY A, ANNAPURE U. 2012. Inactivation of *Escherichia coli* population of fruit surface using ultraviolet-C light: influence of fruit surface characteristics. *Food Bioprocess. Technol.* 6(11):2959-2973.

SYAMALADEVI R, LUPIEN S, BHUNIA K, SABLANI S, DUGAN

F, RASCO B, KILLINGER K, DHINGRA A, ROSS C. 2014. UV-C light inactivation kinetics of *Penicillium expansum* on pear surfaces: Influence on physicochemical and sensory quality during storage. *Postharvest Biol. Technol.* 87(1):27-32.

YAUN B, SUMNER S, EIFERT J, MARCY J. 2004. Inhibition of pathogens on fresh produce by ultraviolet energy. *Int. J. Food Microbiol.* 90(1):1-8.