

Luz ultravioleta C: una alternativa eficiente contra la pandemia

Ultraviolet light C: an efficient alternative against the pandemic

<https://doi.org/10.52808/bmsa.7e5.611.002>

Jorge Homero Wilches Visbal^{1*}

<https://orcid.org/0000-0003-3649-5079>

Juan José Bandera Barros¹

<https://orcid.org/0000-0003-2023-7227>

Jorge Camillo Méndez Hernández¹

<https://orcid.org/0000-0002-4487-0433>

Recibido: 06/02/2021

Aceptado: 19/03/2021

RESUMEN

La pandemia por COVID-19 ha generado un impacto negativo en los sistemas de salud y la economía mundial. El agente etiológico de la COVID-19, el SARS-CoV2, puede permanecer de horas a días en superficies y aerosoles, representando un desafío en la descontaminación de objetos y ambientes cerrados. Agentes químicos como el alcohol, peróxido de hidrógeno, hipoclorito de sodio se han empleado con éxito para erradicar al coronavirus de superficies. Dado que estos agentes pueden causar daños en elementos de protección personal (como las máscaras), son irritantes y no parecen ser efectivos para la descontaminación de aerosoles, la luz ultravioleta ha sido explorada como una medida de mitigación para el desconfinamiento seguro. En este trabajo se realiza una revisión acerca de los principios físicos de la irradiación con luz ultravioleta y su interacción con la materia biológica. También se esboza un esquema de irradiación que podría ser útil para eliminar al SARS-CoV2 de superficies y aerosoles en ambientes cerrados.

Palabras claves: ultravioleta; COVID-19, influenza, exposición, irradiación, SARS-CoV2.

ABSTRACT

The COVID-19 pandemic has had a negative impact on health systems and the global economy. The etiological agent of COVID-19, SARS-CoV2, can remain from hours to days on surfaces and aerosols, representing a challenge in the decontamination of objects and closed environments. Chemical agents such as alcohol, hydrogen peroxide, sodium hypochlorite have been used successfully to inactivate the coronavirus on surfaces. Since these agents can damage personal protective equipment (such as masks), are irritants, and do not appear to be effective for aerosol decontamination, UV light has been explored as a mitigation measure for safe deconfinement. In this work, it is made a review about the physical principles of ultraviolet light and its interaction with biological matter. An irradiation scheme that could be useful to eliminate SARS-CoV2 from surfaces and aerosols in closed environments is also presented.

Key words: ultraviolet, COVID-19, influence, exposure, irradiation, SARS-CoV2..

¹ Universidad del Magdalena, Facultad de Ciencias de la Salud, Santa Marta, Colombia.

*Autor de Correspondencia: jhwilchev@gmail.com

Introducción

La COVID-19, una afección respiratoria de carácter agudo y alcance global, tuvo origen en la provincia de Wuhan (China) a finales de diciembre de 2019 (Wilches Visbal, J. & Castillo Pedraza, M., 2020). A un año de haber iniciado, más de 100 millones de individuos se han contagiado y 2,0 millones han fallecido (Worldometers, 2020). El agente viral responsable de la COVID-19, el SARS-CoV2, puede transmitirse de persona a persona, por contacto con superficies contaminadas o por aerosoles, donde puede permanecer por varias horas (van Doremalen *et al.*, 2020).

La necesidad de alternativas de descontaminación es evidente, ya que usar elementos de protección personal (EPP) como las máscaras no daría para reducir completamente el riesgo de contagio en espacios cerrados con gran tránsito de personas (Wang *et al.*, 2020) sumado a la imposibilidad del usarlas en actividades rutinarias (p.ej. comer) o al hacer actividad física, sobre todo, en regiones cálidas y húmedas. Adicionalmente, el distanciamiento físico de 2 m podría no ser suficiente, debido a que la propagación del virus en aerosol puede alcanzar grandes distancias (Gorbunov, 2020) y la posible ocurrencia de filtraciones laterales del aerosol contaminado en las máscaras (Mittal *et al.*, 2020; Seminara *et al.*, 2020). El distanciamiento social o cuarentena estricta ha demostrado ser una buena medida, al retrasar el crecimiento exponencial, cuando implementado en etapas tempranas, y al aplanar el crecimiento, en etapas tardías. Sin embargo, esta medida es económicamente insostenible (Kenney *et al.*, 2020; Matrajt & Leung, 2020).

Agentes químicos de descontaminación utilizados en el sector sanitario, como el alcohol o hipoclorito de sodio, parecen ser efectivos para disminuir la transmisión por contacto (Beaudry *et al.*, 2020; Kenney *et al.*, 2020; Saini *et al.*, 2020). Pese a esto, la exposición a algunos de ellos puede resultar dañina o irritante para el ser humano (Arito *et al.*, 1997; Cornelia & Warburton, 2017). Por otra parte, los agentes químicos, no resultan idóneos para inactivar al

coronavirus en aerosoles y/o en mascarillas o respiradores dado que pueden reducir su capacidad de filtrado, entre otros problemas (Derraik *et al.*, 2020).

En este contexto, la luz ultravioleta (UVR o rayos UV) se ha propuesto como una interesante alternativa contra la COVID-19 dada su conocida efectividad germicida, el fácil acceso a equipos UVR y la relativamente simple implementación de esquemas de irradiación UV (García de Abajo *et al.*, 2020; Heßling *et al.*, 2020). En el presente artículo se revisan los principios físicos de la UVR, fuentes de emisión UV, efectos biológicos de la UVR, en especial los dos subgrupos de UVC más empleados en biomedicina, así como un modelo sencillo de implementación de UVR en espacios cerrados, susceptible de ser integrado, como medida complementaria, en protocolos de bioseguridad.

Emisores de luz ultravioleta

La radiación ultravioleta es la radiación del espectro electromagnético con longitudes de ondas comprendidas entre los 10 nm y 400 nm. La UVR cuenta con dos clasificaciones que difieren en el rango de longitudes de onda, según el área de conocimiento (Mishra, 2020), como visualizado en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificaciones de la luz ultravioleta, de acuerdo con la longitud de onda

Clasificación convencional o en ciencias de la tierra	Longitud de onda	Clasificación astrocientífica	Longitud de onda
UVA	320-400 nm	UV cercana (NUV)	300-400 nm
UVB	280-320 nm	UV media (MUV)	200-300 nm
UVC	200-280 nm	UV lejana (FUV)	100-200 nm
		UV extrema (EUV)	10-100 nm

En ciencias biomédicas, existe una diferencia sutil en la franja de UVC, respecto a las clasificaciones astrocientífica y convencional. La UVC se clasifica en dos subgrupos: lejana (UVC-L) comprendida entre 207 y 222 nm y germicida (UVC-G) de 254 a 265 nm (Horton *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2016; Wilches Visbal. & Castillo Pedraza, 2020).

La principal fuente de los UVA y UVB que alcanzan la superficie terrestre es la luz solar. A pesar de que el 95% de los rayos solares incidentes en tierra corresponde a UVA, la UVB es responsable del 80% de los efectos dañinos en la piel y ojos humanos (Wharton & Cockerell, 1998; Cabrera Morales & López-Nevot, 2006). Sin embargo, tienen una limitada capacidad germicida debido a que virus y bacterias se han adaptado a ellas a lo largo de millones de años (Mackenzie, 2020). Por otro lado, la UVC es producida artificialmente debido a que buena parte de la solar es absorbida por el oxígeno atmosférico (Mackenzie, 2020; Mishra, 2020). A diferencia de la UVA y UVB, la UVC ha mostrado ser muy efectiva contra bacterias y virus (Buonanno *et al.*, 2013).

Las principales fuentes de UVC son las lámparas negras de vapor de mercurio de baja presión (LPUV en inglés) y de Xeón-mercurio de media (MPUV en inglés) (Schalk *et al.*, 2006). Las LPUV constan de dos tubos coaxiales cubiertos de materiales dieléctricos, generalmente cuarzo, con una mezcla de gas de mercurio y argón en el interior. Se consideran de baja presión por ser funcionales a 1 Pa. Emiten radiación UVC a 254 nm (usada para descontaminar) y 185 nm (para procesos avanzados de oxidación). La temperatura de las paredes no suele superar los 100°C (Schalk *et al.*, 2006). Existen otros tipos de LPUV denominadas lámparas de amalgama (mezcla de mercurio e índio) las cuales se diferencian de las dos anteriores por alcanzar mayores intensidades a igual presión (Schalk *et al.*, 2006). Las MPUV son policromáticas, poseen intensidades superiores a las de las LPUV siendo funcionales a 100 kPa, con temperaturas superficiales entre 500 y 950°C. Estas lámparas están contraindicadas en materiales sensibles al calor ya que pueden desestructurarlo, además de ser deficientes en la emisión de UVC y presentar un menor tiempo de vida que las LPUV (Schalk *et al.*, 2006). Las LPUV de amalgama y las MPUV cuenta con un largo historial de uso, entre los que se resalta la desinfección de aguas residuales por eliminación de bacilos, bacterias intestinales, etc. (Chevrefils *et al.*, 2006).

Las lámparas excimer consisten en un tubo coaxial con electrodos externos e internos y un cuerpo de vidrio de cuarzo. Las excimer se componen de un gas raro y un halógeno. Dependiendo del tipo de gas raro y halógeno se pueden obtener diferentes radiaciones monocromáticas. Las lámparas excimer más importantes para fines de desinfección son las de XeBr y KrCl que emiten a 222 nm y 282 nm, respectivamente. Estas lámparas no necesitan calentarse para funcionar; la temperatura de la pared es menor a 100°C, aunque su eficiencia para generar UVC es menor que las de las LPUV de amalgama (Schalk *et al.*, 2006; Ahmad *et al.*, 2017; Naunovic *et al.*, 2008; Mishra, 2020).

Principios físicos de la irradiación

Una fuente de radiación suele caracterizarse por su dosis (o fluencia), su potencia o su densidad de potencia (también conocida como irradiancia o intensidad). La dosis (D) se refiere a la cantidad de energía entregada (E_{en}) por unidad de área del material irradiado o tejido (S), es decir (Bachmann, 2020a),

$$D = \frac{E_{en}}{S}, \quad (1)$$

cuya unidad en el sistema internacional

$$P = \frac{E_{en}}{t}, \quad (2)$$

cuya unidad en el SI es el [J/s] o [W] (vatio).

La intensidad hace referencia a dosis entregada en la unidad de tiempo, es decir,

$$I = \frac{D}{t} \text{ o } I = \frac{P}{S}, \quad (3)$$

cuya unidad en el SI es el [W/m²]. A partir de esta ecuación es posible determinar el tiempo de irradiación si I y D son previamente conocidas.

Las ecuaciones (1), (2) y (3) aplican para una fuente de radiación ultravioleta cuya energía entregada es constante en el tiempo y monocromática.

En contraste, cuando la fuente de radiación no es monocromática y el tejido absorbe la radiación en un rango específico del espectro de emisión de la fuente, la intensidad efectiva (cantidad de intensidad de la fuente efectivamente absorbida) viene expresada mediante,

$$I_{ef} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{esp}(\lambda) A(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

donde $I_{esp}(\lambda)$ es la intensidad espectral y $A(\lambda)$ es el espectro de absorción de la muestra entre las longitudes de onda λ_1 y λ_2 .

Otra forma más específica de calcular la intensidad efectiva es mediante el coeficiente de atenuación molar, $e(\lambda)$, de modo que,

$$I_{ef} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{esp}(\lambda) e(\lambda) d\lambda, \quad (5)$$

donde I_{ef} tendrá unidades de [W/mol] dado que $e(\lambda)$ viene dado en [m²/mol].

Por otra parte, si la intensidad espectral varía con el tiempo, esto es, una fuente de radiación cuya intensidad varía con el tiempo y con la longitud de onda de emisión, la intensidad efectiva viene dada por,

$$I_{ef} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{esp}(\lambda, t) A(\lambda) d\lambda \text{ o } I_{ef} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{esp}(\lambda, t) e(\lambda) d\lambda, \quad (6)$$

de manera que la dosis efectiva podría calcularse mediante,

$$D_{ef} = \int_t^{t_2} I_{ef} dt, \quad (7)$$

donde dt es el intervalo de tiempo de aplicación de la radiación en el material contaminado con algún agente infeccioso.

Las propiedades ópticas son clave para la caracterización de los materiales biológicos. Algunas de estas son el coeficiente de absorción, el coeficiente de dispersión, el índice de refracción y el factor de anisotropía, los cuales se relacionan con la penetración de la radiación en la muestra y, consecuentemente, con el daño potencial (Matthes, 2004; Wang & Wu, 2009; Fernandez-Oliveras *et al.*, 2013).

Así, el grado de detrimento de la radiación UV en los tejidos depende en gran medida de su capacidad de penetración y el grado de absorción del tejido. El coeficiente de absorción, μ_a [1/m], se refiere a la probabilidad de absorber cierta cantidad de radiación por camino infinitesimal recorrido dentro del tejido. El coeficiente de dispersión, μ_s [1/m], es la probabilidad de dispersar la radiación por camino infinitesimal recorrido dentro del tejido. El factor de anisotropía, g , mide de qué manera el haz de radiación se dispersa en el tejido, tal que, entre más próximo de 1, más hacia adelante será la dispersión.

La capacidad de penetración (penetrancia) viene dada por el coeficiente de penetración, δ , entendido como la distancia hasta la cual la radiación interactúa con el tejido. δ es el inverso del coeficiente de atenuación efectiva, μ_{eff} (Dimofte et al., 2005),

$$\delta = \frac{1}{\mu_{eff}} \quad (8)$$

donde $\mu_{eff} = \sqrt{3\mu_a\mu_{sr}}$ y μ_{sr} es el coeficiente de dispersión reducido y cuya unidad en el SI es el metro [m]. El coeficiente de dispersión reducido se calcula como $\mu_{sr} = (1 - g)\mu_s$ (Fernandez-Oliveras et al., 2013). Luego, entre menor sea el valor del coeficiente de atenuación efectiva, más penetrante es la radiación.

La penetrancia de la radiación está relacionada con el concepto de transmitancia. La transmitancia describe la fracción de la radiación incidente que no interactúa con las moléculas del tejido y se expresa matemáticamente como el cociente entre la dosis de entrada, D_e , y de salida, D_s (Dimofte et al., 2005; Fernandez-Oliveras et al., 2013),

$$T = \frac{D_s}{D_e} = e^{-\mu_{eff}d} \quad (9)$$

donde d es el espesor del tejido irradiado. La absorbancia, fracción de la radiación que se deposita en el tejido, es recíproca a la transmitancia,

$$A = 1/T, \quad (10)$$

tal que cuando la absorbancia es mayor que la transmitancia, para determinada franja de longitud de onda, la probabilidad de daño aumenta. Esto significa que las moléculas del tejido han absorbido los fotones de esa fracción del espectro.

Efectos biológicos de la UVR

La UVR actúa en el genoma produciendo alteraciones moleculares por medio de fotoproductos formados a partir de pirimidinas, siendo los más frecuentes, en su orden, los dímeros de ciclobutano pirimidina (CPDs en inglés) y la 6-4 pirimidina pirimidona (6-4 PPs en inglés). También se producen especies reactivas de oxígeno (ROS en inglés) que contribuyen al estrés oxidativo de las moléculas. El daño inducido en el genoma de un patógeno (como el coronavirus) provocará efectos mutagénicos capaces de inhibir sus mecanismos replicativos (Cadet & Douki, 2018). La formación de fotoproductos correspondientes a la UVA, UVB y UVC se ilustra en la Figura 1.

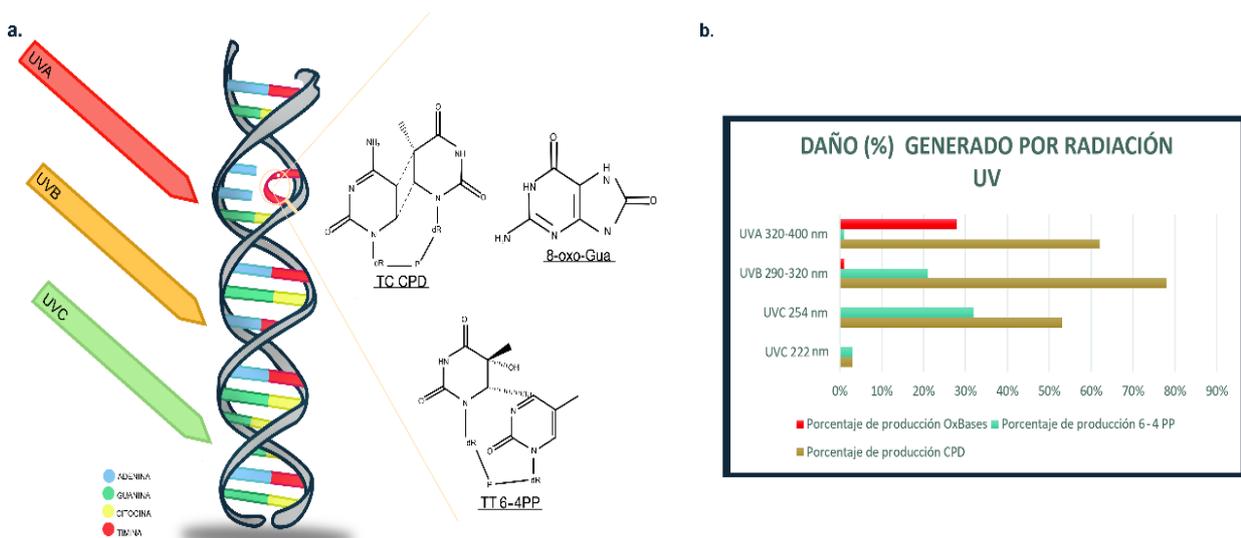


Figura 1. Daño genómico inducido por la radiación ultravioleta: a) fotoproductos principales; b) porcentaje de fotoproductos por tipo de UVR. Imagen de elaboración propia inspirada en Cadet & Douki, (2018)

De la Figura 1 se observa que la UVA induce daños, principalmente, por la producción ROS y CPD. Entre tanto, las UVB y UVC-G lo hacen vía 6-4 PP y CPD (los más difíciles de reparar) (Cadet & Douki, 2018). Se observa,

además, que la UVC-L produce muy poco daño al genoma respecto de las anteriores (Cadet & Douki, 2018; Horton *et al.*, 2020).

En la Figura 2 se visualiza la absorción de proteínas y ácidos nucleicos según la longitud de onda de la UVR incidente.

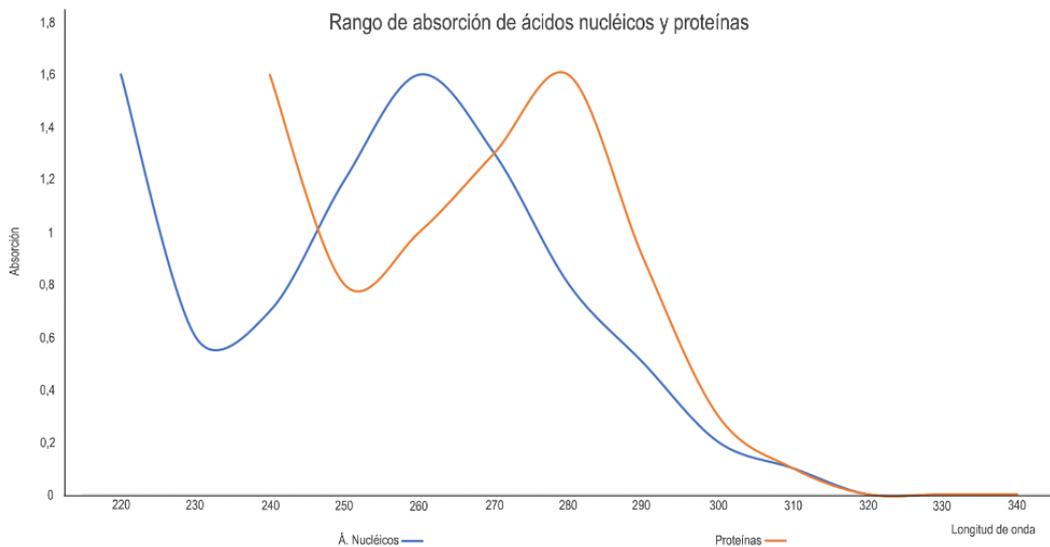


Figura 2. Espectro de absorción de ácidos nucleicos y proteínas en función de la longitud de onda de la UVR. Imagen de elaboración propia inspirada en Weiß, (2020)

El pico de absorción para ácidos nucleicos se ubica cerca de los 260 nm (Schmid, 2001), por lo que la mayor contribución mutagénica vendrá dada por la UVC, aunque la UVB puede causar daños al material genético para valores de fluencia altos (Buonanno *et al.*, 2013; Cadet & Douki, 2018). La absorción de UVA en proteínas y ácidos nucleicos es mucho menor, por lo que se necesitaría mayor dosis.

Según la Figura 2 y atendiendo a que la penetrancia es proporcional a la longitud de onda, es evidente que la UVA y la UVB son capaces de penetrar la piel humana de manera más efectiva que la UVC siendo menos absorbidas (Buonanno *et al.*, 2020). La UVC penetra menos, pero es más absorbida, haciendo más daño.

Existen diferencias en la interacción de la UVC-G y la UVC-L con la materia biológica (Welch *et al.*, 2018). La UVC-G posee un riesgo mayor de inducir lesiones premutagénicas que la UVC-L, al ser más fuertemente absorbida por los ácidos nucleicos. De hecho, se han descrito quemaduras, descamación e hiperqueratosis y daños genómicos que pueden contribuir al desarrollo de cáncer de piel como consecuencia de aplicar UVC-G en humanos (Horton *et al.*, 2020).

En contraste, la UVC-L, al ser fuertemente absorbida en las primeras capas de células muertas de la piel, en la película lagrimal ocular o por los enlaces peptídicos de proteínas y otras estructuras presentes en la membrana celular y el citoplasma de células vivas (Schmid, 2001; Buonanno *et al.*, 2020). De hecho, la Figura 2 muestra que las proteínas absorben más que los ácidos nucleicos en la franja de la UVC-L. En esa línea, estudios en piel de ratón han demostrado que la UVC-L genera menor cantidad de lesiones premutagénicas, inflamación del tejido cutáneo y proliferación de los queratinocitos que la UVC-G (Buonanno *et al.*, 2013, 2020). Dicha inocuidad se ha asociado con su incapacidad para impactar el ADN nuclear de células eucariotas. Esto no aplica para virus y bacterias (Buonanno *et al.*, 2013; Welch *et al.*, 2018) al ser 100 veces más pequeños que las células eucariotas (Cooper & Hausman, 2013).

En un artículo reciente donde se estudió el contraste en la eficacia viricida entre las UVA, UVB y UVC para el virus de la influenza H1N1, se encontró que la UVA (365 nm) a 63 J/cm² logró una reducción de 2-log kill (99%) de la población del virus; la UVB (310 nm) a 1,32 J/cm² y la UVC (280 nm) a 0,55 J/cm² lograron por igual una reducción de 3-log kill, siendo evidente que la UVC posee una mayor eficacia al requerir de una dosis menor y lograr mayor reducción (Horton *et al.*, 2020). Por todo esto, la UVC es la alternativa más idónea para la descontaminación dado que las dosis de inactivación son significativamente más bajas (Mbonimpa *et al.*, 2018; Horton *et al.*, 2020; Kannan *et al.*, 2020).

Diversos trabajos en varios tipos de coronavirus han demostrado la efectividad de la UVC. A inicios del siglo XXI, Duan *et al.*, (2003) mostró que se necesitaban 60 min a una distancia de 80 cm e intensidades mayores que 9 x 10⁻³ mW/cm² de UVC-G para al SARS-CoV1 en líquidos. Seguidamente, Darnell *et al.*, (2004) consiguió eliminar al SARS-CoV1 suspendido en agua aplicando una intensidad de 4 mW/cm² de UVC-G (254 nm) a una distancia de 3 cm después de 15 min. Recientemente, Heilingloh *et al.*, (2020) utilizó UVC-G con una dosis de 1,94 mW/cm² durante 9 min para inactivar completamente al SARS-CoV2 en líquidos, inclusive, a altas concentraciones. Para la Asociación

Ultravioleta Internacional (IUVA en inglés), una dosis de 40 mJ/cm² de UVC-G aniquilaría cualquier clase de patógeno. Sin embargo, esto depende del tipo de patógeno (Mackenzie, 2020).

Welch *et al.*, (2018) y Buonanno *et al.*, (2020) estudiando el uso de UVC-L en varias clases de virus en aerosoles, llegaron a la conclusión de que dosis entre 1,2 y 2 mJ/cm² serían suficientes para conseguir una inactivación superior a 1 log-kill. En otro trabajo, Buonanno *et al.*, (2020a) establecieron que irradiar continuamente lugares públicos con UVC-L (222 nm) a la intensidad regulatoria límite (3mJ/hcm²) durante 8 minutos resultaría en 1-logkill del coronavirus HCoV-OC43. Al doble del tiempo se alcanzaban 3-logkill.

Heßling *et al.*, (2020) determinaron que las dosis de inactivación por UVC (G o L) varían de acuerdo con el tipo de coronavirus y de ambiente (superficie sólida/líquida o aerosol). Concluyeron que dosis menores que 11 mJ/cm² garantizan una reducción de 1 log-kill usando UVC-G o UVC-L en múltiples coronavirus en líquidos o aerosoles (incluyendo el MERS-COV y el SARS-CoV1). También señalaron que tal dosis es eficaz para lidiar con otros patógenos.

Teniendo en cuenta que los coronavirus humanos tienen características genómicas similares, es muy probable que la UVC-G y la UVC-L sean igual de efectivas para eliminar el SARS-CoV2 incluso si este llegase a mutar, ya que, si bien las mutaciones pueden llevar a cambios en su patogenicidad, las características estructurales del genoma viral no presentarían grandes variaciones (Buonanno *et al.*, 2020; Heßling *et al.*, 2020; Kannan *et al.*, 2020).

Más allá del tipo de UVC los factores que inciden en la efectividad de la dosis empleada son: humedad relativa, tipo de material genético del coronavirus (ADN o ARN) y número de hebras del material genético (bicatenario o monocatenario) (Rauth, 1965; Tseng & Li, 2005; Buonanno *et al.*, 2020; Horton *et al.*, 2020).

Implementación de un esquema de irradiación con lámparas UVC

Para el diseño de un esquema de irradiación es necesario conocer el tipo de fuente de radiación, sus características funcionales, bien como las propiedades biológicas del patógeno a ser inactivado. Para ello, es clave la correcta disposición de las fuentes de radiación y un estudio dosimétrico que permita calcular la dosis en cada zona del espacio a ser irradiado. El objetivo de la irradiación es encontrar el tiempo mínimo de inactivación del patógeno (*t*) a partir del menor valor de intensidad registrado en el espacio irradiado, previo conocimiento de la dosis de inactivación.

En la Figura 3 se visualiza un ejemplo de esquema de implementación de irradiación, en un ambiente cerrado (p.ej.: sala de aula o consultorio), de tres lámparas (L) distribuidas equidistantemente a lo largo de la línea media del ambiente (Bachmann, 2020b).

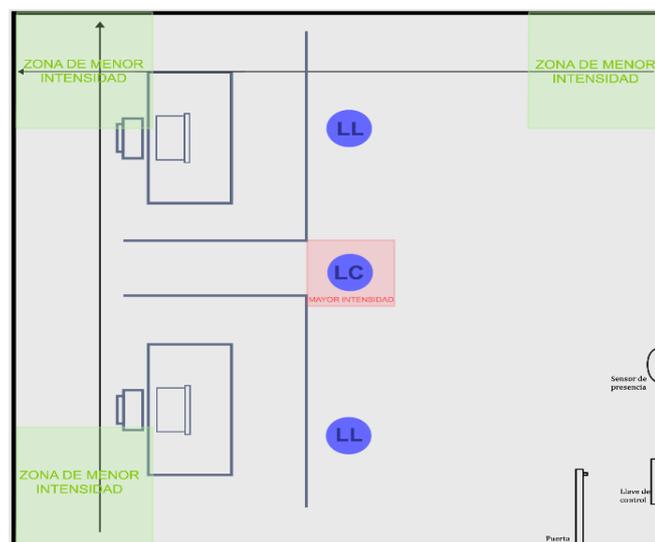


Figura 3. Esquema de irradiación UVC en una sala de clases y zonas con menor y mayor intensidad. LC: lámpara central; LL: lámparas laterales. Se muestran las zonas con menor y mayor intensidad de la radiación. Imagen de elaboración propia modificada de Bachmann, (2020b)

El análisis dosimétrico del espacio consiste en ejecutar los siguientes pasos (Bachmann, 2020b):

1. Calcular la potencia total (la que incluye todos los tipos de UV detectados) y la potencia de todos los tipos de UVA, UVB y visible, a una cierta distancia por debajo de cada lámpara. Esta última potencia se calcula interponiendo una lámina de vidrio entre la lámpara y el detector de potencia, para eliminar la UVC. Finalmente, la potencia efectiva (de la UVC), para cada lámpara, se obtiene restando las dos

anteriores. Por lo general, la distancia de cálculo de la potencia efectiva es aquella que se subtiende desde el piso hasta la primera superficie de contacto (p.ej. asiento de una silla ≈ 0.5 m) o, mejor, en el mismo piso, que sería la superficie más distante que se desea irradiar (aproximadamente 2,5 m por debajo de la lámpara). El cálculo de la potencia efectiva se hace 2 o más veces, por lámpara, para obtener la media de la potencia.

2. Una vez se tiene media de la potencia efectiva para cada lámpara, estas deben multiplicarse por un factor de corrección (p.ej: 0,99; 0,87...) para así extraer la potencia efectiva corregida. El factor de corrección se encuentra en el certificado de calibración del detector.
3. Para determinar la intensidad de las lámparas basta dividir la correspondiente potencia efectiva corregida por el área sensible del detector, empleando la ecuación (3).

Una vez definida la intensidad de cada lámpara, se hace un mapeamiento del espacio, es decir, se miden las intensidades en varias zonas, a igual distancia por encima del piso, para determinar la localización de la de menor valor (intensidad mínima). Conocida la dosis de inactivación del patógeno (el SARS-CoV2 en este caso) y la intensidad mínima, se obtiene el tiempo de irradiación. En general, la dosis de inactivación es un dato conocido en la literatura científica (Lin *et al.*, 1997; Chevrefils *et al.*, 2006). Cuando no lo fuere, la dosis de inactivación será aquella que conduzca a 5 o 6 log-kill, aunque puede aceptarse, en la práctica, hasta 1 a 4 log-kill (Buonanno *et al.*, 2020).

Por otro lado, si el interés fuera calcular el tiempo máximo de exposición a UVC permitido para un ser humano en un ambiente cerrado como el de la Figura 3, se realiza el mismo procedimiento anterior solo que, en este caso, la distancia de cálculo de la intensidad será desde la lámpara hasta la superficie de la cabeza de la persona más alta (p.ej: 1,2 m por debajo de la lámpara central). Para tanto, se hace uso de la ecuación (3) para calcular ese tiempo, donde D será la dosis límite en piel humana.

Para ejemplificar, Bachmann, (2020b) estimó que el tiempo mínimo de inactivación del SARS-CoV1 para una sala de 7 m x 7 m x 3 m, similar a la mostrada en la Figura 3, era 18 min en promedio, producto de una intensidad mínima de 0,0255 mW/cm² (cerca del 30% de la intensidad máxima). La intensidad mínima se encontró en una de las esquinas de la sala (valores muy similares entre ellas), justamente la mayor distancia a la ubicación de la de intensidad máxima (debajo de la lámpara central a igual altura). Para tanto, tuvo en cuenta que una dosis media de 27 mJ/cm² de UVC-G provocaba 1 log-kill del SARS-COV1 (Matthes, 2004). De manera similar determinó que el tiempo máximo de exposición a la UVC-G de una persona de 1,8 m de altura sería de 24,5 s, teniendo en cuenta que la intensidad sobre la superficie de la cabeza era de 0,245 mW/cm² y que la dosis límite de exposición a 254 nm es 6 mJ/cm² (Matthes, 2004). Este último cálculo es una curiosidad científica dentro del contexto de una situación accidental en el que una persona quedara atrapada dentro de una sala que está siendo irradiada con UVC-G.

Para la irradiación es importante considerar la ley de Busen-Roscoe: para conseguir el mismo efecto biológico se debe tener en cuenta que el tiempo de exposición y la intensidad son cantidades recíprocas. Esto es, si la intensidad se duplica el tiempo de irradiación cae a la mitad y viceversa (Pavez Ulloa, 2009).

Ventajas y desventajas comparativas de la UVC-G y UVC-L

Demostrada la capacidad germicida de la UVC, en esta sección se pretende resumir las diferencias en la aplicación de la UVC-G y la UVC-L. Para esto, en la Tabla 2 se presentan las ventajas y desventajas comparativas de la UVC-G y UVC-L. Esta tabla ofrece una rápida información sobre cada uno de los subgrupos de la UVC y elegir la más conveniente en determinados contextos.

Tabla 2. Comparación entre las características físico-biológicas de la UVC-G y UVC-L

UVC-G (254-265 nm)	UVC-L (207-222 nm)
Por su alto coeficiente de penetración es más eficaz para eliminar al coronavirus de superficies inanimadas, recomendando emplearla para la desinfección de EPPs (Derraik <i>et al.</i> , 2020) como se ha demostrado en máscaras N95 y visores (Horton <i>et al.</i> , 2020; Weaver <i>et al.</i> , 2020).	Por su menor coeficiente de penetración en comparación, no es tan eficaz para descontaminar superficies inanimadas, por lo que no se sugiere para procesos de desinfección de EPPs (Horton <i>et al.</i> , 2020).
El mecanismo de acción se basa en inducir daños al material genético (ADN o ARN) del coronavirus, inhibiendo así su capacidad de replicación (Mackenzie, 2020). Debido a su mayor penetrancia, es inicua para el ser humano. Esta razón prácticamente imposibilita su uso en espacios con presencia personas (Welch <i>et al.</i> , 2018; Buonanno <i>et al.</i> , 2013, 2020).	El mecanismo de acción consiste en desintegrar las proteínas de la membrana del coronavirus de modo que este no se pueda adaptar a las células humanas (Mackenzie, 2020). Como la UVC-L es fuertemente absorbida en las primeras capas de la epidermis y/o de la película lagrimal (Mishra, 2020) algunos trabajos han indicado que puede emplearse en ambientes cerrados con humanos (Welch <i>et al.</i> , 2018; (Buonanno <i>et al.</i> , 2020). No obstante, esto dependería de la intensidad de la radiación (Mackenzie, 2020),

Las lámparas UVC-G demandan mayor tiempo para la irradiación debido a la necesidad de un periodo calentamiento (Schalk *et al.*, 2006; Naunovic *et al.*, 2008).

advertiéndose, además, que se desconocen sus efectos adversos a largo plazo (estocásticos) (Bachmann, 2020b; Mackenzie, 2020; Wilches Visbal *et al.*, 2020). El mecanismo de expulsión de fotones inducido por corriente eléctrica de las lámparas *excimer* es inmediato y sin necesidad de calentamiento previo. Con todo, la cantidad de ozono liberado por estas lámparas acostumbra a ser superior a las de mercurio y amalgama (Naunovic *et al.*, 2008).

Una sinergia entre UVC-G (para eliminar al coronavirus de superficies inanimadas) y UVC-L (para eliminar al coronavirus de aerosoles en presencia de humanos) se plantea como la mejor forma de irradiación en la lucha contra la pandemia. De hecho, esto viene siendo empleado por sistemas Xenex, una de las empresas líderes en el desarrollo de herramientas UV para la desinfección de espacios clínicos (Xenex, 2020).

Es así como el robot lighstrike, combinando ambos subgrupos de UVC (espectro de irradiación de 200 a 315 nm) desinfecta superficies y el aire de ambientes clínicos, en menos de 2 min a 1 m de distancia de los objetos (Mackenzie, 2020). Otro robot, el PXUV4D, basado en rayos pulsátiles de ultravioleta de lámparas de xenón también ha demostrado ser efectivo para inactivar el coronavirus en superficies rígidas en menos de 5 min (Simmons *et al.*, 2021). Adicionalmente, ambos robots se han usado para garantizar la reutilización de EPPs como las máscaras N95 o las quirúrgicas (Mackenzie, 2020; Simmons *et al.*, 2021).

Conclusión

Las medidas de contención contra la pandemia basadas en agentes químicos no son suficientes para eliminar al coronavirus en aerosoles y pueden causar irritación. La radiación ultravioleta, por su reconocida capacidad germicida, se muestra como una herramienta atractiva para un desconfinamiento seguro y la reutilización de elementos de protección personal.

La UVC-G con dosis menores a 11 mJ/cm², tanto en superficies como en aerosoles, sería capaz de inactivar cualquier patógeno incluido el coronavirus en pocos minutos. La UVC-L, con una dosis aproximada de 2 mJ/cm² por poco menos de 8 min, conduciría a un 1 log-kill del coronavirus en aerosoles. Asimismo, varios estudios han sugerido que, a diferencia de la UVC-G cuya irradiación no se admite en humanos, la UVC-L parece ser eficaz para descontaminar espacios cerrados, incluso, con presencia de personas, dada su menor capacidad de penetración celular. Un inconveniente clave para la UVC-L es que todavía no se conocen los efectos estocásticos (a largo plazo) en humanos. En consecuencia, lo más prudente es evitar el uso de UVC-L en espacios con humanos, mientras no se tenga certeza de baja probabilidad de efectos estocásticos.

La implementación de un esquema de irradiación UV (UVC-L y/o UVC-G) en espacios cerrados requiere definir el tamaño de la sala, la disponibilidad de un detector de potencia UV, el arreglo geométrico de las lámparas y la dosis de inactivación. La finalidad siempre será encontrar el tiempo de irradiación que inactiva al patógeno, en este caso, el nuevo coronavirus.

Conflictos de intereses

Ninguno para declarar.

Referencias

- Ahmad, S. I., Christensen, L., & Baron, E. (2017). History of UV Lamps, Types, and Their Applications. En *Advances in Experimental Medicine and Biology* (Vol. 996: pp. 3-11). Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-319-56017-5_1.
- Arito, H., Takahashi, M., Iwasaki, T., & Uchiyama, I. (1997). Age-related changes in ventilatory and heart rate responses to acute ozone exposure in the conscious rat. *Industrial Health*, 35(1): 78-86. Disponible en: <https://doi.org/10.2486/indhealth.35.78>.
- Bachmann, L. (2020a). IV Simposio de Fotobiofísica - UV e Virus: Dosimetria Ótica de Radiações. Universidade de São Paulo. Disponible en: <https://youtu.be/6TtH8f9UiH0> (Acceso marzo 2021).
- Bachmann, L. (2020b). IV Simposio de Fotobiofísica - UV e Vírus: uso de UVC em ambientes públicos. Universidade de São Paulo. Disponible en: <https://youtu.be/gszFyqaDbal> (Acceso marzo 2021).
- Beaudry, M. S., Frederick, J. C., Lott, M. E. J., Norfolk, W. A., Glenn, T. C., & Lipp, E. K. (2020). Effectiveness of an Ozone Disinfecting and Sanitizing Cabinet to Decontaminate a Surrogate Virus for SARS-CoV-2 on N-95 Masks. *medRxiv*, 2020.11.04.20226233. Disponible en: <https://doi.org/https://doi.org/10.1101/2020.11.04.20226233>.
- Buonanno, M., Randers-Pehrson, G., Bigelow, A. W., Trivedi, S., Lowy, F. D., Spotnitz, H. M., Hammer, S. M., & Brenner, D. J. (2013). 207-nm UV Light - A Promising Tool for Safe Low-Cost Reduction of Surgical Site Infections. I: In Vitro Studies. *PLoS ONE*, 8(10): e76968. Disponible en <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0076968>.

- Buonanno, M., Welch, D., Shuryak, I., & Brenner, D. J. (2020). Far-UVC light (222 nm) efficiently and safely inactivates airborne human coronaviruses. *Scientific Reports*, 10(1): 10285. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67211-2>.
- Cabrera Morales, C. M., & López-Nevot, M. A. (2006). Efectos de la radiación ultravioleta (UV) en la inducción de mutaciones de p53 en tumores de piel. *Oncología (Barcelona)*, 29(7): 25-32. Disponible en: <https://doi.org/10.4321/S0378-48352006000700003>.
- Cadet, J., & Douki, T. (2018). Formation of UV-induced DNA damage contributing to skin cancer development. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 17(12): 1816-1841. Disponible en: <https://doi.org/10.1039/C7PP00395A>.
- Chevrefils, G., Caron, É., Wright, H., & Sakamoto, G. (2006). UV dose required to achieve incremental log inactivation of bacteria, protozoa and viruses. *IUVA News*, 8(1): 38-45. Disponible en: https://www.iuvanews.com/stories/pdf/archives/080104Cairns_Article_2006.pdf.
- Cooper, G. M., & Hausman, R. (2013). *The Cell: A Molecular Approach* (Sinauer Associates (6th ed)). Disponible en: <https://www.amazon.com/-/es/Geoffrey-M-Cooper/dp/0878939644>.
- Cornelia, R., & Warburton, P. R. (2017). Assessing hydrogen peroxide vapor exposure from hospital sterilizers. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 14(9): D150-D157. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/15459624.2017.1335401>.
- Darnell, M. E. R., Subbarao, K., Feinstone, S. M., & Taylor, D. R. (2004). Inactivation of the coronavirus that induces severe acute respiratory syndrome, SARS-CoV. *Journal of Virological Methods*, 121(1): 85-91. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jviromet.2004.06.006>.
- Derraik, J. G. B., Anderson, W. A., Connelly, E. A., & Anderson, Y. C. (2020). Rapid Review of SARS-CoV-1 and SARS-CoV-2 Viability, Susceptibility to Treatment, and the Disinfection and Reuse of PPE, Particularly Filtering Facepiece Respirators. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(17): 6117. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ijerph17176117>.
- Dimofte, A., Finlay, J. C., & Zhu, T. C. (2005). A method for determination of the absorption and scattering properties interstitially in turbid media. *Physics in Medicine and Biology*, 50(10): 2291-2311. Disponible en: <https://doi.org/10.1088/0031-9155/50/10/008>.
- Duan, S. M., Zhao, X. S., Wen, R. F., Huang, J. J., Pi, G. H., Zhang, S. X., Han, J., Bi, S. L., Ruan, L., & Dong, X. P. (2003). Stability of SARS Coronavirus in Human Specimens and Environment and Its Sensitivity to Heating and UV Irradiation. *Biomedical and Environmental Sciences*, 16(3): 246-255. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14631830/>.
- Fernandez-Oliveras, A., Rubino, M., & Perez, M. M. (2013). Scattering and absorption properties of biomaterials for dental restorative applications. *Journal of the European Optical Society: Rapid Publications*, 8: 13056. Disponible en: <https://doi.org/10.2971/jeos.2013.13056>.
- García de Abajo, F. J., Hernández, R. J., Kaminer, I., Meyerhans, A., Rosell-Llompart, J., & Sanchez-Elsner, T. (2020). Back to Normal: An Old Physics Route to Reduce SARS-CoV-2 Transmission in Indoor Spaces. *ACS Nano*, 14(7): 7704-7713. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c04596>.
- Gorbunov, B. (2020). Aerosol particles laden with COVID-19 travel over 30m distance. Preprints, 1-18. Disponible en: <https://doi.org/10.20944/preprints202004.0546.v2>.
- Heilingloh, C. S., Aufderhorst, U. W., Schipper, L., Dittmer, U., Witzke, O., Yang, D., Zheng, X., Sutter, K., Trilling, M., Alt, M., Steinmann, E., & Krawczyk, A. (2020). Susceptibility of SARS-CoV-2 to UV irradiation. *American Journal of Infection Control*, 48(10): 1273-1275. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2020.07.031>.
- Heßling, M., Hönes, K., Vatter, P., & Lingensfelder, C. (2020). Ultraviolet irradiation doses for coronavirus inactivation - review and analysis of coronavirus photoinactivation studies. *GMS hygiene and infection control*, 15: 1-8. Disponible en: <https://doi.org/10.3205/dgkh000343>.
- Horton, L., Torres, A. E., Narla, S., Lyons, A. B., Kohli, I., Gelfand, J. M., Ozog, D. M., Hamzavi, I. H., & Lim, H. W. (2020). Spectrum of virucidal activity from ultraviolet to infrared radiation. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 19(10): 1262-1270. Disponible en: <https://doi.org/10.1039/D0PP00221F>.
- Kannan, S., Subbaram, K., Ali, S., & Kannan, H. (2020). Molecular Characterization and Amino Acid Homology of Nucleocapsid (N) Protein in SARS-CoV-1, SARS-CoV-2, MERS-CoV, and Bat Coronavirus. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 14(suppl 1): 757-763. Disponible en: <https://doi.org/10.22207/JPAM.14.SPL1.13>.
- Kenney, P., Chan, B., Kortright, K., Cintron, M., Havill, N., Russi, M., Epright, J., Lee, L., Balcezak, T., & Martinello, R. (2020). Hydrogen Peroxide Vapor sterilization of N95 respirators for reuse. Preprints, 617: 1-6. Disponible en: <https://doi.org/10.1101/2020.03.24.20041087>.
- Kim, S.-J., Kim, D.-K., & Kang, D.-H. (2016). Using UVC Light-Emitting Diodes at Wavelengths of 266 to 279 Nanometers To Inactivate Foodborne Pathogens and Pasteurize Sliced Cheese. *Applied and Environmental Microbiology*, 82(1): 11-17. Disponible en: <https://doi.org/10.1128/AEM.02092-15>.
- Lin, L., Cook, D. N., Wiesehahn, G. P., Alfonso, R., Behrman, B., Cimino, G. D., Corten, L., Damonte, P. B., Dikeman, R., Dupuis, K., Fang, Y. M., Hanson, C. V., Hearst, J. E., Lin, C. Y., Londe, H. F., Metchette, K., Nerio, A. T., Pu, J. T., Reames, A. A., ... Corash, L. (1997). Photochemical inactivation of viruses and bacteria in platelet concentrates by use of a novel psoralen and long-wavelength ultraviolet light. *Transfusion*, 37(4): 423-435. Disponible en: <https://doi.org/10.1046/j.1537-2995.1997.37497265344.x>.

- Mackenzie, D. (2020). Ultraviolet Light Fights New Virus. *Engineering*, 6(8), 851-853. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.06.009>.
- Matrajt, L., & Leung, T. (2020). Evaluating the Effectiveness of Social Distancing Interventions to Delay or Flatten the Epidemic Curve of Coronavirus Disease. *Emerging Infectious Diseases*, 26(8): 1740-1748. Disponible en: <https://doi.org/10.3201/eid2608.201093>.
- Matthes, R. (2004). Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation). *Health Physics*, 87(2): 171-186. Disponible en: <https://doi.org/10.1097/00004032-200408000-00006>.
- Mbonimpa, E. G., Blatchley, E. R., Applegate, B., & Harper, W. F. (2018). Ultraviolet A and B wavelength-dependent inactivation of viruses and bacteria in the water. *Journal of Water and Health*, 16(5): 796-806. Disponible en: <https://doi.org/10.2166/wh.2018.071>.
- Mishra, B. (2020). Is 'FAR UVC' the Nearest Solution for Pandemic Containment? *Journal of Advanced Research in Medical Science & Technology*, 7(03): 27-31. Disponible en: <https://doi.org/10.24321/2394.6539.202014>.
- Mittal, R., Ni, R., & Seo, J.-H. (2020). The flow physics of COVID-19. *Journal of Fluid Mechanics*, 894: F2-1-F2-14. <https://doi.org/10.1017/jfm.2020.330>.
- Naunovic, Z., Lim, S., & Blatchley, E. R. (2008). Investigation of microbial inactivation efficiency of a UV disinfection system employing an excimer lamp. *Water Research*, 42(19): 4838-4846. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.09.001>.
- Pavez Ulloa, F. J. (2009). Agentes físicos superficiales y dolor. Análisis de su eficacia a la luz de la evidencia científica. *Revista de la Sociedad Española del Dolor*, 16(3): 182-189. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S1134-8046\(09\)71009-2](https://doi.org/10.1016/S1134-8046(09)71009-2).
- Rauth, A. M. (1965). The Physical State of Viral Nucleic Acid and the Sensitivity of Viruses to Ultraviolet Light. *Biophysical Journal*, 5(3): 257-273. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(65\)86715-7](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(65)86715-7).
- Saini, V., Sikri, K., Batra, S. D., Kalra, P., & Gautam, K. (2020). Development of a highly effective low-cost vaporized hydrogen peroxide-based method for disinfection of personal protective equipment for their selective reuse during pandemics. *Gut Pathogens*, 12(1): 1-11. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s13099-020-00367-4>.
- Schalk, S., Adam, V., Arnold, E., & Brieden, K. (2006). UV-lamps for disinfection and advanced oxidation—Lamp types, technologies and applications. *IUVA news*, 8(1): 32-37. Disponible en: http://iuva.org/sites/default/files/member/news/IUVA_news/Vol08/Issue1/SchalkArticleIUVANewsVol8No1.pdf.
- Schmid, F.-X. (2001). Biological Macromolecules: UV-visible Spectrophotometry. En *Encyclopedia of Life Sciences* (p. 4). John Wiley & Sons, Ltd. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/npg.els.0003142>.
- Seminara, G., Carli, B., Forni, G., Fuzzi, S., Mazzino, A., & Rinaldo, A. (2020). Biological fluid dynamics of airborne COVID-19 infection. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 31(3): 505-537. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12210-020-00938-2>.
- Simmons, S. E., Carrion, R., Alfson, K. J., Staples, H. M., Jinadatha, C., Jarvis, W. R., Sampathkumar, P., Chemaly, R. F., Khawaja, F., Povroznik, M., Jackson, S., Kaye, K. S., Rodriguez, R. M., & Stibich, M. A. (2021). Deactivation of SARS-CoV-2 with pulsed-xenon ultraviolet light: Implications for environmental COVID-19 control. *Infection Control & Hospital Epidemiology*, 42(2): 127-130. Disponible en: <https://doi.org/10.1017/ice.2020.399>.
- Tseng, C.-C., & Li, C.-S. (2005). Inactivation of Virus-Containing Aerosols by Ultraviolet Germicidal Irradiation. *Aerosol Science and Technology*, 39(12): 1136-1142. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/02786820500428575>.
- Van Doremalen, N., Bushmaker, T., Morris, D. H., Holbrook, M. G., Gamble, A., Williamson, B. N., Tamin, A., Harcourt, J. L., Thornburg, N. J., Gerber, S. I., Lloyd-Smith, J. O., de Wit, E., & Munster, V. J. (2020). Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1. *New England Journal of Medicine*, 382(16): 1564-1567. Disponible en: <https://doi.org/10.1056/NEJMc2004973>.
- Wang, J., Pan, L., Tang, S., Ji, J. S., & Shi, X. (2020). Mask use during COVID-19: A risk adjusted strategy. *Environmental Pollution*, 266(1): 1-6. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115099>.
- Wang, L. V., & Wu, H.-I. (2009). Biomedical Optics. En *Biomedical Optics: Principles and Imaging*. John Wiley & Sons, Inc. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/9780470177013>.
- Weaver, D. T., Card, K., Dinh, M. N., Crozier, D., Dolso, E., Dhawan, A., Nikhil Krishnan, Maltas, J., Dinh, M. N., Dolson, E., Farrokhian, N., Gopalakrishnan, V., Ho, E., Jagdish, T., King, E., Krishnan, N., Kuzmin, G., Maltas, J., Mo, J., ... Weaver, D. T. (2020). UV Sterilization of Personal Protective Equipment with Idle Laboratory Biosafety Cabinets During the Covid-19 Pandemic. *medRxiv*, 1-18. Disponible en: <https://doi.org/https://doi.org/10.1101/2020.03.25.20043489>.
- Weiß, N. (2020). UV-Vis Spectrophotometry – Easy and Quick Quantification of Nucleic Acids. Eppendorf Handling Solutions. Disponible en: <https://handling-solutions.eppendorf.com/sample-handling/photometry/applications/detailview-applications/news/uv-vis-spectrophotometry-easy-and-quick-quantification-of-nucleic-acids/> (Acceso noviembre 2020).

- Welch, D., Buonanno, M., Grilj, V., Shuryak, I., Crickmore, C., Bigelow, A. W., Randers-Pehrson, G., Johnson, G. W., & Brenner, D. J. (2018). Far-UVC light: A new tool to control the spread of airborne-mediated microbial diseases. *Scientific Reports*, 8(1): 1-7. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21058-w>.
- Wharton, J. R., & Cockerell, C. J. (1998). The sun: A friend and enemy. *Clinics in Dermatology*, 16(4): 415-419. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0738-081X\(98\)00014-5](https://doi.org/10.1016/S0738-081X(98)00014-5).
- Wilches Visbal, J., & Castillo Pedraza, M. (2020). Aproximación matemática del modelo epidemiológico SIR para la comprensión de las medidas de contención contra la COVID-19. *Revista Española de Salud Pública*, 94: e1-11. Disponible en: <https://doi.org/23 de septiembre e202009109>.
- Wilches Visbal, J. H., & Castillo Pedraza, M. C. (2020). Luz ultravioleta lejana para inactivar superficies y aerosoles contaminados con SARS-CoV2. *Hacia la Promoción de la Salud*, 25(2): 24-26. Disponible en: <https://doi.org/10.17151/hpsal.2020.25.2.5>.
- Wilches Visbal, J. H., Castillo Pedraza, M. C., & Serpa Romero, X. Z. (2020). Inactivación potencial del coronavirus SARS-CoV2: ¿qué agentes germicidas se proponen? *Revista Cuidarte*, 12(1): e1273. Disponible en: <https://doi.org/10.15649/cuidarte.1273>.
- Worldometers. (2020). Reporte Mundial COVID-19. Disponible en: <https://www.worldometers.info/coronavirus/> (Acceso diciembre 2020).
- Xenex. (2020). Xenex Introduces the Next Generation of Coronavirus-Killing Robots. *Businesswire*. Disponible en: <https://www.businesswire.com/news/home/20201215005464/en/Xenex-Introduces-the-Next-Generation-of-Coronavirus-Killing-Robots> (Acceso diciembre 2020).