

Proyecto de instalación de sistemas Upper Room para control de brotes de gripe aviar



Colaboración

Jesús Jiménez García; Manuel Jiménez García;
Gildardo Aguilar Sánchez, Empresas Verlight

Fecha de recepción: 09 de noviembre del 2022

Fecha de aceptación: 12 de diciembre del 2022

RESUMEN: En el caso de una pandemia provocada por una cepa de influenza particularmente virulenta, como la influenza aviar de alta patogenicidad AH5N1, la transmisión de este virus entre diferentes especies de aves y posiblemente también hacia a personas es extremadamente preocupante debido a las altas tasas de mortalidad y morbilidad que produce.

Los sistemas Upper Room de irradiación de luz ultravioleta germicida (UR-UVGI) pueden inactivar de manera muy eficiente y rápida los virus respiratorios tales como los de la gripe aviar A(H5N1). Ya que este virus es altamente susceptible a la luz ultravioleta germicida UV-C de 254nm.

En este trabajo se analiza la posibilidad de utilizar tales sistemas en criaderos de aves para reducir los contagios de gripe aviar A(H5N1). El número de sistemas Upper Room UVGI necesarios para entregar una tasa de ventilación UVGI equivalente de entre 4 y 12 cambios de aire por hora en un criadero de pollos de volumen V es propuesto. Implicado una reducción de patógenos aéreos entre el 98 y 99.999 %.

PALABRAS CLAVE: A(H5N1), Influenza aviar, Sistemas Upper Room, Susceptibilidad UV-C, UVGI.

ABSTRACT: In the case of a pandemic caused by a particularly virulent influenza strain, such as highly pathogenic AH5N1 avian influenza, the transmission of this virus between different bird species and possibly also to humans is extremely concerning due to the high mortality rates and morbidity it produces.

Upper Room Germicidal Ultraviolet Light Irradiation (UVGI) systems can very efficiently and rapidly inactivate respiratory viruses such as Avian Influenza (AH5N1) since this virus is highly susceptible to 254nm UV-C germicidal ultraviolet light.

This paper analyses the possibility of using such systems in poultry farms to reduce the contagion of Avian Influenza A(H5N1). The number of Upper Room UVGI systems needed to deliver an equivalent UVGI ventilation rate between 4 and 12 air changes per hour in a volume V broiler house is proposed, implying a reduction of airborne pathogens between 98 and 99.999%.

KEYWORDS: A(H5N1), Avian influenza, Upper Room Systems, UV-C susceptibility, UVGI.

INTRODUCCIÓN

Brotes recientes del virus de la influenza aviar en la industria avícola alrededor del mundo incluyendo México han provocado la clausura de criaderos y el sacrificio extensivo de aves de corral [1, 2, 3 y 4].

La nueva cepa A(H5N1) de la influenza responsable de estos brotes es altamente patógena y trasmisible a los humanos [1]. Las empresas de esta industria deben poner énfasis en las precauciones y métodos de ingeniería de control que deben ser tomadas por los

trabajadores en los criaderos para evitar los posibles contagios de esta cepa, tales como los sistemas Upper Room UVGI [5,6,7].

El virus de ARN monocatenario que causa la influenza aviar tiene un diámetro de alrededor de 0.1 micrones. Debido a su susceptibilidad excepcional a la desinfección ultravioleta (UV-C) [8], la esterilización solo requiere una pequeña cantidad de radiación germicida UV-C. Siendo así, que en 2012, el Dr. James McDevitt y sus colegas recomendaron por primera vez el uso de sistemas Upper Room para mitigar los contagios de este virus, ya que encontraron que la susceptibilidad del virus aerosolizado de la influenza H1N1 es alta (aproximadamente de $.3 \text{ m}^2/\text{J}$) y por lo tanto su infectividad en el aire se reduce considerablemente [9].

Esto llevo a que en la actualidad se propusieran estos dispositivos para disminuir los contagios de covid-19 producido por el virus del Sars-Cov-2. Debido a que los nuevos estudios de la susceptibilidad a la luz UV-C de virus respiratorios, incluyendo la influenza aviar en el aire, han demostrado que los virus son mucho más susceptibles en el aire que en superficies y agua (de 3 a 6 veces más) [10, 11, 12 y 13].

En este trabajo se analiza la posibilidad de utilizar tales sistemas en criaderos de aves para reducir los contagios de gripe aviar A(H5N1). El número de sistemas Upper Room UVGI necesarios para entregar una tasa de ventilación UVGI equivalente entre 4 y 12 cambios de aire por hora en un criadero de pollos de volumen V es propuesto. Implicando una reducción de patógenos aéreos de más del 90 % en una hora. Pues la cantidad de sistemas UR-UVGI se puede obtener con la ecuación propuesta recientemente por The Global Lighting Association (GLA) dentro de las pautas para cuantificar la reducción de patógenos en el aire por tecnologías UVGI [14].

MATERIAL Y MÉTODOS

Sistema Upper Room

La rápida propagación de virus como la influenza aviar A(H5N1) de alta patogenicidad se ve facilitada por las corrientes de aire naturales que se originan por el movimiento, las fluctuaciones de temperatura y la recirculación del aire acondicionado en ambientes interiores.

Como el aire es difícil de controlar, este es un obstáculo principal en la lucha contra el virus. Sin embargo, los peligros se pueden reducir mediante el uso de luz UV-C para disminuir el contenido de virus en el aire mediante la utilización de sistemas de desinfección de aire superior Upper Room UVGI al tiempo que se evita la exposición humana a la radiación UV-C.

Los Sistemas Upper Room de Verlight utilizan un tipo especial de lámparas que emiten luz UV-C (254 nm), también llamada luz ultravioleta germicida.

Estos sistemas están diseñados para emitir luz UV-C en la parte superior de un espacio cerrado, eliminando cualquier virus, bacteria, hongo, o cualquier agente infeccioso concentrado en el aire, que sea transportado por convección natural hacia la zona iluminada.

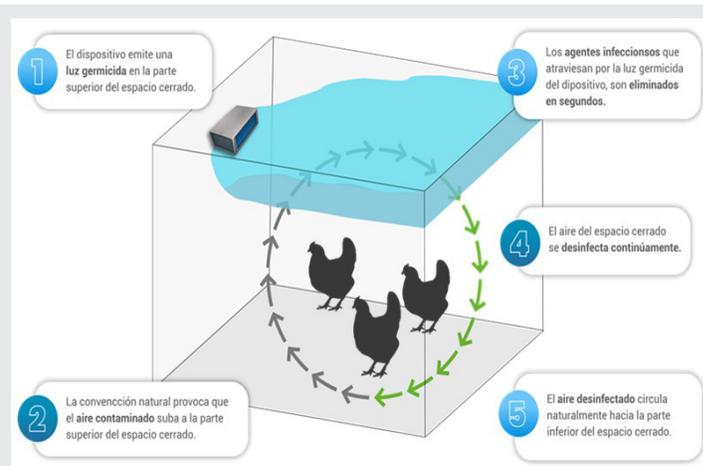


Figura 1. Funcionamiento del sistema Upper Room.

Fuente: Elaboración propia.

Modelo de reducción exponencial para concentración de patógenos aéreos vs tiempo

Las concentraciones de patógenos en el aire decaen exponencialmente con la exposición y la intensidad de irradiación como se describe en la ecuación:

$$N = N_0 e^{-\kappa I t} = N_0 e^{-\kappa D} \quad \text{Ec.(1)}$$

Donde:

N es el tamaño de la concentración de patógenos en el aire en el tiempo t , N_0 es el tamaño inicial de la concentración en $t=0$, I es la intensidad de irradiación y k es la constante de velocidad de decaimiento [8]. El producto de I y t la duración de la exposición UV (t) es la dosis D . Esta relación implica una reciprocidad entre la intensidad de irradiación y el tiempo de acción ya que es simplemente la dosis la que determina el efecto germicida.

La resistencia de un microorganismo a UVGI es cuantificado por la tasa de decaimiento producida por exposición a la luz ultravioleta germicida UV-C, que se conoce como la constante de susceptibilidad UV-C o valor Z (con unidades de m^2/J).

$$N = N_0 e^{-Z I t} = N_0 e^{-Z D} \quad \text{Ec.(2)}$$

La influenza aviar tiene una dosis de D90, o una dosis de UV-C, de alrededor de 5 a 20 J/m^2 , y una constante de susceptibilidad Z entre $.3$ y $.5 \text{ m}^2/\text{J}$ lo que puede reducir las poblaciones en un 90% [8,9,10]. Ya que ha demostrado ser mucho más susceptible a la radiación ultravioleta germicida que la bacteria *Staphylococcus aureus* en estudios recientes [11, 12 y 13]. Y puede ser considerado como un patógeno de alta susceptibilidad a la luz ultravioleta UV-C (Z) o baja dosis de inactivación D90.

Modelo de velocidad de intercambio de aire equivalente UVGI

Una medida común para las tecnologías de desinfección del aire es la tasa o velocidad de intercambio de aire o ventilación, la cual se mide en cambios de aire por hora (ACH) [10, 11, 13 y 14]. Está definida como el volumen total de aire limpio que fluye hacia una habitación (CADR) en 1 h (m³/h), dividido por el volumen de la habitación, V(m³):

$$ACH = \frac{CADR}{V} \quad \text{Ec.(3)}$$

En la ventilación por dilución, la tasa de eliminación de patógenos es simplemente la tasa de flujo volumétrico de aire fresco que se introduce en la habitación. Al considerar métodos de eliminación alternativos, como la filtración y la inactivación con luz UV-C, es conveniente comparar su impacto en términos equivalentes a la ventilación con aire fresco.

Esto se puede considerar como la tasa de aire libre de patógenos que se introduce a un espacio, incluso si no se agrega aire fresco real (por ejemplo, cuando se usan procedimientos de desinfección UV-C en lugar de ventilación natural). La inactivación de los patógenos activos en el aire mediante métodos de ingeniería como UVGI, están cuantificados por una tasa de decaimiento llamada tasa de ventilación equivalente, con la unidad *eqACH_{UVGI}*.

$$N = N_0 e^{-eqACH_{UVGI} * t} \quad \text{Ec.(4)}$$

Y esta ecuación se puede escribir como:

$$eqACH_{UVGI} = \frac{-60 \ln(N_t/N_0)}{t} \quad \text{Ec.(5)}$$

Que describe en general, la reducción de patógenos en el aire, mediante una tasa de decaimiento con unidad de cambios de aire por hora (ACH) en h⁻¹.

Donde:

N_t es el número de patógenos activos después de *t* minutos.

N₀ es el número de patógenos activos iniciales en *t*=0 minutos.

t es el tiempo en minutos.

Una tasa de decaimiento de 1 ACH equivale a una reducción del 63,2 % de patógenos en el aire en una hora.

Las tecnologías convencionales de desinfección del aire tienen valores típicos de *eqACH* alrededor de 1 h⁻¹ a 5 h⁻¹. Se han reportado sistemas UR-UVGI con valores de *eqACH_{UVGI}* de 10 h⁻¹ hasta 40 h⁻¹ [10, 11, 13 y 14].

CAMBIOS POR HORA (ACH)	% DE EFICIENCIA DE ELIMINACION DE AGENTES INFECCIOSOS EN UNA HORA
1	63.2 %
2	86.5 %
3	95 %
4	98.2 %
6	99.75%
12	99.9994 %
20	99.99999 %

Figura 2. Porcentaje de eficiencia de reducción de agentes infecciosos para diferentes cambios de aire por hora (ACH).

Fuente: Elaboración propia.

Upper Room UVGI: relación entre la tasa de ventilación equivalente UVGI requerida y el patógeno sustituto eqCADR

Las capacidades de limpieza microbiológica de los sistemas UR-UVGI en aplicaciones del mundo real, como salas de cine, salones de escuelas, oficinas, gallineros, por ejemplo, se pueden cuantificar ampliando los resultados de una cámara de prueba en un laboratorio, al volumen de la sala y los patógenos objetivos (SARS-Cov-2, H1N1, H5N1).

El *eqCADR* de un patógeno sustituto (PhiX-174, MSR, SARS-Cov-2, Staphylococcus aureus), es la cantidad de aire limpio producido por un dispositivo UR-UVGI, al inactivar cierta cantidad de microorganismos por su exposición a la luz UV-C durante cierto tiempo en una cámara de prueba con volumen *V_p*. Este se puede relacionar con un patógeno objetivo específico (gripe aviar), para producir la ventilación equivalente UVGI adecuada en cualquier espacio de volumen *V* de manera indirecta, a través de la razón de sus susceptibilidades a la luz germicida. Además, la cantidad de sistemas UR-UVGI se puede obtener con la ecuación propuesta recientemente por The Global Lighting Association (GLA) dentro de las pautas para cuantificar la reducción de patógenos en el aire por tecnologías UVGI [14].

$$\# UR - UVGI = \frac{eqACH_{UVGI} * V}{eqCADR_{patógeno-sustituto}} * \frac{\kappa(\lambda)_{patógeno-sustituto}}{\kappa(\lambda)_{patógeno-objetivo}} \quad \text{Ec.(6)}$$

Donde:

UR-UVGI es el número de sistemas Upper Room UVGI requeridos para alcanzar una tasa de ventilación UVGI equivalente en el espacio requerido.

eqACH_{UVGI} es la tasa de ventilación UVGI equivalente en ACH (h⁻¹).

V es el volumen del espacio requerido en m³.

eqCADR_{patógeno-sustituto} es el *CADR* equivalente del patógeno sustituto obtenido por la cámara de prueba con un sistema Upper Room UVGI en m³/h.

$\kappa(\lambda)_{\text{patógeno-sustituto}}$ es la constante de susceptibilidad del patógeno sustituto a la longitud de onda del sistema Upper Room UVGI siendo en este caso $\lambda=254 \text{ nm}$.

$\kappa(\lambda)_{\text{patógeno-objetivo}}$ es la constante de susceptibilidad del patógeno objetivo a la longitud de onda del sistema Upper Room UVGI con $\lambda=254 \text{ nm}$.

El CADR (clean air delivery rate) microbiano de un sistema Upper Room UVGI se determina mediante una prueba que utiliza patógenos aerotransportados activos o sustitutos nebulizados y homogéneamente distribuidos dentro de una cámara de prueba cerrada con un volumen aproximado de 20 m^3 a una temperatura y humedad controlada. Dando así 50 cambios de aire equivalentes por hora para el Sars-CoV-2.

El $\text{CADR}_{\text{patógeno}}$ o $\text{eqCADR}_{\text{patógeno}}$ se calcula mediante la tasa de reducción del patógeno activo en el aire en un período de tiempo definido, considerando la tasa de descomposición natural del patógeno activo en el aire y el volumen de la cámara de prueba.

RESULTADOS

El número de sistemas Upper Room UVGI necesarios para entregar una tasa de ventilación UVGI equivalente entre 4 y 12 cambios de aire por hora en un criadero de pollos, por ejemplo, con un Volumen V (447 m^3), con un determinado patógeno objetivo (influenza aviar) y patógeno sustituto (SARS-CoV-2) ambos con una susceptibilidad a la luz UV-C en el aire aproximadamente entre $k=.3$ y $.5 \text{ m}^2/\text{J}$. Se puede obtener mediante la ecuación propuesta recientemente por la Asociación Global de Iluminación (GLA) en las ecuaciones siguientes:

$$4.13 = \frac{12 \text{ ACH } (447 \text{ m}^3)}{(1.5) (17.28 \text{ m}^3) * 50 \text{ ACH}} * \frac{.5 \text{ m}^2/\text{J}}{.3 \text{ m}^2/\text{J}} \quad \text{Ec.(6a)}$$

$$4.02 = \frac{7 \text{ ACH } (447 \text{ m}^3)}{(1.5) (17.28 \text{ m}^3) * 50 \text{ ACH}} * \frac{.5 \text{ m}^2/\text{J}}{.3 \text{ m}^2/\text{J}} \quad \text{Ec.(6b)}$$

$$2.06 = \frac{6 \text{ ACH } (447 \text{ m}^3)}{(1.5) (17.28 \text{ m}^3) * 50 \text{ ACH}} * \frac{.5 \text{ m}^2/\text{J}}{.3 \text{ m}^2/\text{J}} \quad \text{Ec.(6c)}$$

$$2.29 = \frac{4 \text{ ACH } (447 \text{ m}^3)}{(1.5) (17.28 \text{ m}^3) * 50 \text{ ACH}} * \frac{.5 \text{ m}^2/\text{J}}{.3 \text{ m}^2/\text{J}} \quad \text{Ec.(6d)}$$

De las Ec.(6a) y Ec.(6b) se puede ver que si se considera inicialmente 4 sistemas Upper Room UVGI con susceptibilidades similares a la luz ultravioleta UV-C ambos patógeno objetivo y patógeno sustituto $k=.5 \text{ m}^2/\text{J}$, se pueden obtener hasta 12 cambios de aire por hora. Por otra parte, si se considera una ligera diferencia en la susceptibilidad en el patógeno objetivo $k=.3$ (gripe aviar), se puede obtener aproximadamente 7 ACH.

Por otro lado, las Ec.(6c) y Ec.(6d) muestran que al utilizar solamente 2 sistemas Upper Room UVGI y considerar los mismos valores de susceptibilidad a la luz UV-C $k=.5 \text{ m}^2/\text{J}$, para el patógeno objetivo y sustituto. Se pueden obtener únicamente 6 cambios de aire por hora para el volumen de 447 m^3 . Mientras que si se considera una mayor resistencia a la luz ultravioleta con un valor susceptibilidad en el

patógeno objetivo $k=.3 \text{ m}^2/\text{J}$ (gripe aviar), se puede obtener solo 4 ACH.

El factor de 1.5 mostrado en el denominador de las ecuaciones 6a,b,c y d. Es un factor de eficiencia de nuestro dispositivo al compararlo con los sistemas de Upper Room de Phillips donde se realizó el estudio de la cámara de prueba para obtener el $\text{eqCADR}_{\text{patógeno-sustituto}}$.

El resultado de estas ecuaciones se puede ver de manera grafica en la distribución de irradiancia de la parte superior del galpón en las Figuras 3 y 4. En la Figura 3 se muestra el uso únicamente dos sistemas Upper Room UVGI montados a una distancia de 2.5m en un galpón de 447 m^3 . Aquí se muestran 3 zonas con diferente intensidad:

La zona verde representa una irradiancia mínima de $.3 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ a la que una persona no debería estar expuesta por más de 5h, de acuerdo con el límite de exposición para riesgo actínico según lo dispuesto en la Norma 62471:2006 de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) [13]. Donde se expone que una persona no puede exceder el límite de $.1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ durante 8h. de jornada laboral y que está representado por la línea punteada amarilla a una altura de 1.78m. Esta zona abarca cerca del 59% del volumen de aire de la parte superior que es aproximadamente 160 m^3 y representa el 36% del volumen total del galpón.

La zona azul que representa una irradiancia mínima de $10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ y abarca el 12% del volumen superior.

La zona roja que representa una irradiancia mínima de $20 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ y abarca el 4% del volumen superior.

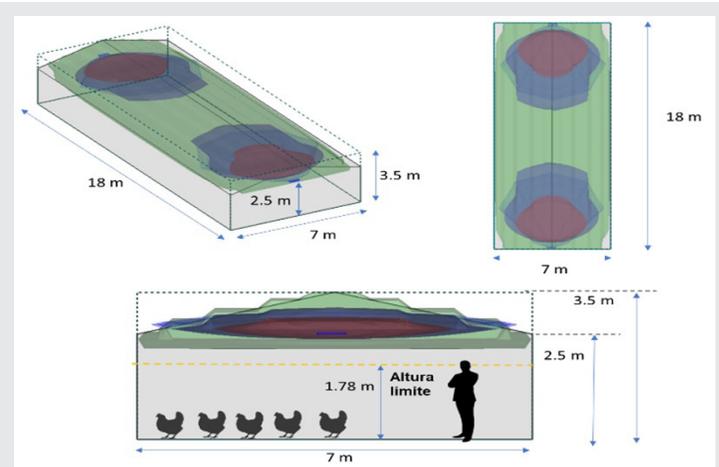


Figura 3. Simulación de la distribución de irradiancia proporcionada por 2 sistemas Upper Room UVGI en un criadero de pollos con un Volumen de 447 m^3 .

Fuente: Elaboración propia.

En cambio, en la Figura 4, la zona verde abarca el 51% del volumen de la parte superior. La zona azul el 22% y la zona roja el 13%. Es decir 4 sistemas Upper Room generan una zona de alta intensidad de manera casi homogénea a lo largo del galpón, a diferencia de la

Figura 3 que solo genera zonas de alta intensidad en los extremos del lugar.

Esto permite que la desinfección sea mucho mayor, ya que la dosis a la cual estarían expuestos los virus aumentaría conforme el tiempo pasa. Y por lo tanto reduciría el tiempo de inactivación en el aire.

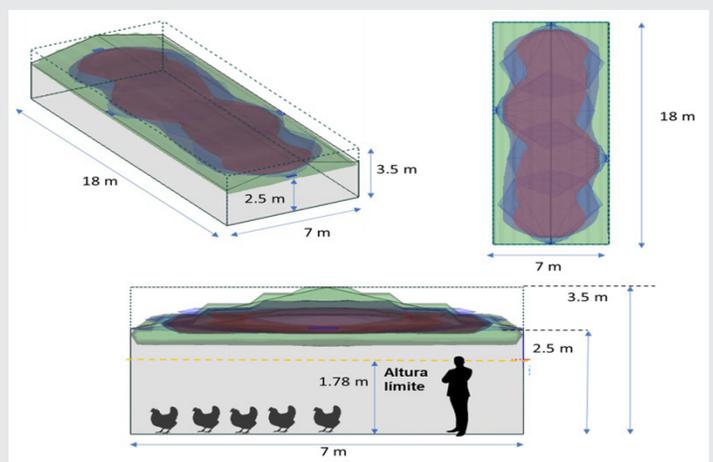


Figura 4. Simulación de la distribución de irradiancia proporcionada por 4 sistemas Upper Room UVGI en un criadero de pollos con un Volumen de 447 m³. Fuente: Elaboración propia.

Por ejemplo, si se tuviera 1000 pollos distribuidos en un galpón de 447 m³, e instalará 2 o 4 sistemas Upper Room de irradiación germicida ultravioleta (UVGI) capaz de producir de 4 a 12 ACH equivalentes después de una hora, ¿cuál podría esperar que fuera el resultado de reducción de patógenos aéreos en menos de una hora?

La Figura 5 muestra la inactivación o eliminación de una concentración inicial de partículas de aerosol infecciosas previstas por la ecuación (5) suponiendo una concentración patógena inicial normalizada al 100% para tres casos ejemplares ya mencionados: Una eqACH = 12 h⁻¹ al considerar que la susceptibilidad de la gripe aviar y el SARS-Cov-2 son las mismas $k=0.5 \text{ m}^2/\text{J}$, y además se tienen 4 Sistemas Upper Room UVGI instalados; otra considerando solamente la instalación de dos sistemas UR-UVGI que nos generaría una eqACH = 6 h⁻¹; y finalmente dos sistemas UR-UVGI, pero considerando que el virus de gripe aviar es ligeramente más resistente que el SARS-Cov-2 a la luz ultravioleta UV-C, con una susceptibilidad de $k=0.3 \text{ m}^2/\text{J}$. Esto nos produciría una eqACH = 4 h⁻¹.

Esto implica que independientemente de que la susceptibilidad de la gripe aviar sea mayor o igual a la del SARS-Cov-2, o se instalen únicamente dos UR-UVGI en la parte superior se obtendría una reducción de patógenos aéreos mayor al 90% después de una hora de estar trabajando. La Figura 5 también demuestra que la cantidad de patógenos aéreas iniciales pueden reducirse al 90% en tan solo 12 minutos para una

eqACH = 12 h⁻¹, 24 minutos para una eqACH = 6 h⁻¹ y en 36 minutos para una eqACH = 4 h⁻¹.

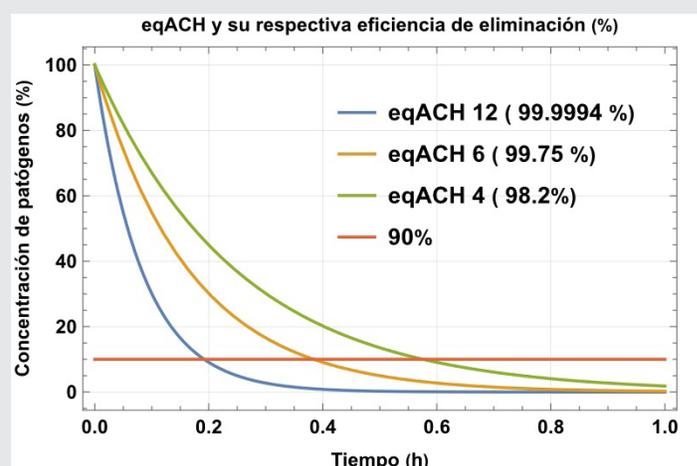


Figura 5. Concentración de patógenos vs tiempo para tres diferentes ACH equivalentes 12, 6 y 4. Fuente: Elaboración propia.

Cabe mencionar que este ejemplo solo demuestra la eficacia del dispositivo cuando no se considera la producción de patógenos de manera continua, sino estática. De otra manera las ecuaciones mencionadas se tendrían que modificar para introducir los parámetros de respiración, y la cantidad de patógenos exhalados por cada ave enferma, dando la pauta para otros estudios más complejos.

Cuanto más aire limpio esté disponible, ya sea por medios naturales, ingresando aire exterior a través del sistema de ventilación o agregando irradiación germicida ultravioleta para complementar el aire exterior existente disponible, la probabilidad de infección disminuiría.

Finalmente, hay que tomar en cuenta la ubicación de la instalación de estos dispositivos, ya que es vital para maximizar su efectividad y reducir posibles riesgos fotobiológicos.

CONCLUSIONES

La influenza aviar existe en el reservorio natural de especies de aves silvestres y puede ser difícil proteger completamente los gallineros contra las intrusiones periódicas del virus. Las tecnologías de desinfección UVC disponibles se pueden aplicar en criaderos y gallineros tanto para desinfectar el aire como para desinfectar superficies contaminadas. Cuatro o dos sistemas Upper Room UVGI de 36 W, instalados adecuadamente en un criadero de pollos con un volumen de 447 m³ pueden producir la ventilación equivalente de 6 a 12 cambios de aire por hora cuando se usa Sars-CoV-2 como el patógeno sustituto y la gripe aviar como objetivo, considerando a ambos con susceptibilidad UV-C en el aire aproximada de $k=0.5 \text{ m}^2/\text{J}$. Reduciendo la concentración del virus en un 99.9994 en una hora, o el 98% si se

considera $k=3 \text{ m}^2/\text{J}$ para el caso de dos UR-UVGI con na ACH equivalente de 4 h^{-1} .

El costo de implementación de la tecnología de sistemas Upper Room UVGI es relativamente modesto en comparación con el costo real de un brote que podría requerir un sacrificio extensivo de animales. Además de proteger las aves de corral, también se debe tener en cuenta a la protección de los trabajadores y a la prevención de nuevas variantes de la gripe aviar de especies saltadoras y afianzarse en poblaciones humanas donde los costos pueden ser incalculables.

BIBLIOGRAFÍA

[1] WHO, (2022, November). *Avian Influenza Weekly Update Number 867. WHO in the Western Pacific Region*. Consultada el 10 de noviembre de 2022, <http://accurapid.com/journal/17prof.htm>.

[2] 2. Conlon, A. M. (2022). *Daily briefing: Why bird flu is so bad right now*. *Nature*. Consultada el 10 de noviembre de 2022, <https://www.nature.com/articles/d41586-022-03322-2>.

[3] Gobierno de México. *Cierran filas Agricultura y avicultores para evitar propagación de la influenza aviar AH5N1 en el país*. Obtenida el 17 de noviembre de 2022, de la página electrónica: <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/cierran-filas-agricultura-y-avicultores-para-evitar-propagacion-de-la-influenza-aviar-ah5n1-en-el-pais-319641?idiom=es>.

[4] *El economista*. *México vacunará a toda su población avícola para contener gripe aviar*. Obtenida el 14 de noviembre de 2022, de la página electrónica: <https://www.eleconomista.com.mx/estados/Mexico-vacunara-a-toda-su-poblacion-avicola-para-contener-gripe-aviar-20221114-0131.html>.

[5] CDC, (Abril, 2021). *Upper-Room Ultraviolet Germicidal Irradiation (UVGI)*. Consultada el 9 de abril del 2021, <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/community/ventilation.html>

[6] Wang, C. C., Prather, K. A., Sznitman, J., Jimenez, J. L., Lakdawala, S. S., Tufekci, Z., & Marr, L. C. (2021). *Airborne transmission of respiratory viruses*. *Science*, 373(6558), eabd9149.

[7] Bahnfleth, W.P., Fontana, L., Khankari K., Li, Y., Marr, L., Pantelic, J., Sekhar. C., Thomann, W., & Vernon, W. (2022). *ASHRAE position document on infectious aerosols*. ASHRAE, Georgia.

[8] Kowalski, W. (2010). *Ultraviolet germicidal irradiation handbook: UVGI for air and surface disinfection*. Springer science & business media.

[9] McDevitt, J. J., Rudnick, S. N., & Radonovich, L. J. (2012). *Aerosol susceptibility of influenza virus to UV-C light*. *Applied and environmental microbiology*, 78(6), 1666-1669.

[10] Beggs, C. B., & Avital, E. J. (2020). *Upper-room ultraviolet air disinfection might help to reduce COVID-19 transmission in buildings: a feasibility study*. *PeerJ*, 8, e10196.

[11] Eadie, E., Hiwar, W., Fletcher, L., Tidswell, E., O'Mahoney, P., Buonanno, M., ... & Wood, K. (2022). *Far-UVC (222 nm) efficiently inactivates an airborne pathogen in a room-sized chamber*. *Scientific reports*, 12(1), 1-9.

[12] Ruetalo, N., Berger, S., Niessner, J., & Schindler, M. (2022). *Inactivation of aerosolized SARS-CoV-2 by 254 nm UV-C irradiation*. *Indoor air*, 32(9), e13115.

[13] Allen, G. R., Benner, K. J., & Bahnfleth, W. P. (2021). *Inactivation of pathogens in air using ultraviolet direct irradiation below exposure limits*. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 126, 1-24.

[14] Global Lighting Association (GLA) (2022). *Position Statement of UV Germicidal Irradiation: Guidelines for Quantification of Airborne Pathogen Inactivation by UVGI Technologies*.