

Control de contaminantes en aerosol en el aire interior: combinación de la reducción de la concentración de partículas con la inactivación microbiana

SERGE YA .GRINSHUPUN, *
ATI NA DHIKARI, TAKESH IH ONDA,
KIYOUNKIM, ‡ MIKATOIVOLA, § K. S.
RAMCHANDERRAO,¹ Y
TIIN AR EPONEN

Centro de estudios sobre aerosoles relacionados con la salud, Departamento de Salud Ambiental, Universidad de Cincinnati, 3223 Eden Avenue, PO Box 670056, Cincinnati, Ohio 45267-0056

Una técnica de purificación del aire interior, que combina Emisión de iones unipolares y oxidación fotocatalítica (promovida por una celda RCI especialmente diseñada), se investigó en dos cámaras de prueba, 2,75 m³ y 24,3 m³, utilizando no biológicos y aerosoles de provocación biológica. La reducción en La concentración de partículas se midió de tamaño selectivamente en - Tiempo real, y el factor de limpieza del aire y el aire limpio Se determinó la Tasa de Entrega (CADR). Mientras prueba con viriones y bacterias, se recolectaron muestras de bioaerosol y analizado, y la tasa de supervivencia de microorganismos se determinó en función del tiempo de exposición. Nosotros observó que la concentración de aerosol disminuyó 10 a 100 veces más rápido cuando el purificador funcionó como en comparación con la descomposición natural. Los datos sugieren que la unidad portátil probada que funciona en 25 m³ no ventilado sala es capaz de proporcionar valores CADR más de dos veces más grande que el HVAC de circuito cerrado convencional sistema con un filtro de clasificación 8. La remoción de partículas ocurrió debido a la emisión de iones unipolares, mientras que la inactivación de microorganismos viables en el aire se asoció con oxidación fotocatalítica. Aproximadamente el 90% de los virus MS2 viables se inactivaron como resultado de 10 a 60 min de exposición a la oxidación fotocatalítica. Aproximadamente El 75% de las esporas viables de B. subtilis se inactivaron en 10 min, y aproximadamente el 90% o más después de 30 min. Lo biológico y mecanismos químicos que llevaron a la inactivación de virus y esporas bacterianas resistentes al estrés revisado.

Introducción

La exposición a partículas respirables en el aire y agentes microbianos puede causar diversos problemas de salud. Se han desarrollado numerosas técnicas para reducir la exposición a partículas interiores. El control de aerosoles en espacios confinados y mal ventilados, cuando el intercambio de aire con filtración no se puede aplicar con éxito, representa un desafío particular.

* Teléfono del autor para correspondencia: 1-513-558-0504; fax: 1-513-558-2263; correo electrónico: sergey.grinshpun@uc.edu.

† Con licencia de Koken Ltd., Tokio, Japón.

‡ Con licencia de la Universidad de Ajou, Suwon, Corea del Sur.

§ De licencia del Instituto Nacional de Salud Pública, Kuopio, Finlandia. ¹ De licencia de Karshak Engineering College, Hyderabad, India.

Otro desafío es disminuir la concentración interior de contaminantes específicos transportados por el aire, por ejemplo, partículas biológicas viables. Si bien algunas técnicas de purificación de aire en interiores tienen como objetivo únicamente la reducción de la concentración de aerosoles, otras están diseñadas para inactivar bioaerosoles viables (por ejemplo, virus, bacterias y hongos).

Algunos limpiadores de aire comerciales generan un exceso de ozono (ya sea como agente biocida primario o como subproducto); estos dispositivos han planteado problemas de salud pública (1). Entre las diversas pautas para la exposición al ozono, se han especificado los siguientes umbrales para entornos ocupacionales: 0,2 ppm durante 2 h (2), 0,05-0,10 durante 8 h (2), 0,1 ppm durante 8 h (3) y 0,05 ppm para instantáneas. (sin límite de tiempo especificado) exposición (4). A modo de comparación, el estándar de aire exterior es de 0,08 ppm durante 8 h (5). Los generadores de ozono pueden inactivar microorganismos viables; sin embargo, la inactivación ocurre en concentraciones que exceden significativamente los estándares de salud (6, 7).

Fotooxidación con radiación UV y TiO₂ como foto catalizador se ha aplicado para la desintoxicación en fase gaseosa de contaminantes orgánicos (8, 9) y para inactivar microorganismos en el agua (10-12). Se ha realizado algún esfuerzo para explorar su aplicación para la limpieza del aire dentro de un sistema de circuito cerrado (13, 14). Los investigadores informaron una inactivación fotocatalítica significativa de *Serratia marcesens* resistente al estrés que se produjo cuando las bacterias en aerosol circulaban en un conducto de circuito cerrado equipado con un TiO₂ filtrar durante un período de tiempo relativamente largo. Pal y col. (15) encontraron un efecto similar para *Escherichia coli*, *Microbacterium* sp. Y *Bacillus subtilis*; Keller y col. (16) informaron una inactivación considerable de *E. coli* en el aire que pasa a través de un fotoreactor recubierto con TiO₂ película. El efecto biocida de la oxidación fotocatalítica se puede atribuir a los huecos de la banda de valencia fotogenerados, los radicales hidroxilos, el peróxido de hidrógeno y otras especies reactivas del oxígeno. Lin y Li (17) probaron el cambio de viabilidad en bacterias y hongos transportados por el aire expuestos a la fotooxidación dentro de un pequeño fotoreactor durante un tiempo muy corto, del orden de un segundo. No se observó una disminución significativa en el recuento de unidades formadoras de colonias (UFC) durante un tiempo tan corto.

Hasta donde sabemos, no hay datos disponibles sobre la eficacia de los rayos UV / TiO portátiles. 2 purificadores de aire basados en para inactivar microorganismos viables en el aire en ambientes de aire interior. Estos datos son necesarios para evaluar la viabilidad de la oxidación fotocatalítica para la purificación del aire en entornos residenciales y ocupacionales. Además, para los purificadores de aire híbridos, que implican varios mecanismos de limpieza del aire, no se dispone de información suficiente para diferenciar su eficiencia de eliminación de partículas y las capacidades biocidas, que tienen como objetivo reducir la exposición a bioaerosol en el aire interior.

En este estudio, investigamos una novedosa técnica de purificación de aire que combina diferentes mecanismos de control de aerosol / bioaerosol: emisión de iones unipolares y oxidación fotocatalítica promovida por la técnica de "ionización catalítica radiante (RCI)". Se ha demostrado anteriormente que la emisión de iones unipolares reduce la concentración de partículas en el aire interior (18-20), pero no se dispone de datos científicos sobre la eficacia de la técnica de tipo híbrido.

sección experimental

El proceso de purificación del aire interior se investigó en la instalación experimental que se muestra en la Figura 1. La eliminación de partículas se determinó midiendo la concentración de los aerosoles de desafío, de forma selectiva por tamaño en tiempo real. Al realizar pruebas con bioaerosoles viables, también se determinó la tasa de supervivencia de los microorganismos. Se adoptaron los protocolos experimentales validados en nuestros estudios previos (18, 19, 21). Los experimentos se llevaron a cabo cuando se utilizó un purificador de aire híbrido independiente.

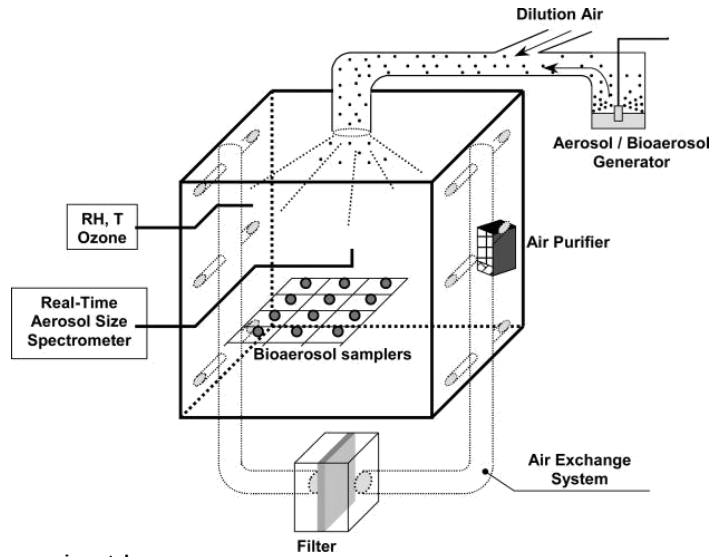


FIGURA 1. Configuración experimental.

operando dentro de la cámara y cuando estaba apagada. El aerosol de desafío se generó a partir de una suspensión líquida usando un nebulizador Collison (BGI Inc., Waltham, MA) y se equilibró la carga pasando a través de un Kr de 10 mCi⁸⁵ equilibrador de carga (3M Company, St. Paul, MN). Después de mezclarlo con aire limpio filtrado con HEPA a una temperatura específica (T) 24-26°C y humedad relativa (HR) 21-30%, el aerosol entró en la cámara. Después de un período de ajuste de 10-15 minutos establecido para lograr un patrón de concentración de aerosol uniforme, el experimento comenzó (t) 0).

En la mayoría de las pruebas, la concentración de aerosol, C, y la distribución del tamaño de partículas, $C / \log(d)$, se midieron con un impactador eléctrico de baja presión (ELPI, TSI Inc./Dekati Ltd, St. Paul, MN), que utiliza el principio de impacto en cascada y también tiene una capacidad de lectura directa para determinar la concentración de partículas de diferentes tamaños aerodinámicos en 12 canales (cada canal etapa de impacto), de 0.041 a 8.4 μm (punto medio). Cuando los experimentos se realizaron con un aerosol viral que incluía partículas más pequeñas que el límite inferior del ELPI, usamos un espectrómetro de partículas de amplio rango (WPS; MSP Inc., Shoreview, MN). El WPS es un instrumento en tiempo real de alta resolución que combina análisis de movilidad diferencial, recuento de partículas de condensación,

Para cada tamaño de partícula medido, d, la concentración de aerosol en t) 0 se estableció para superar el nivel de fondo (obtenido antes de que se generara el aerosol de desafío) en aproximadamente 100 veces. Primero, el decaimiento de la concentración natural se caracterizó registrando $C_{\text{natural}}(d, t)$ cada 10 s con el ELPI y cada 2,5 min con el WPS. Posteriormente, se generó el aerosol de prueba y se mezcló nuevamente en la cámara para alcanzar el mismo nivel de concentración inicial. En t) 0, el purificador de aire se encendió y la concentración $C_{\text{AP}}(d, t)$ se controló durante y hasta 120 min (o hasta que el recuento de partículas disminuyó por debajo del límite de detección). Para cuantificar la eficiencia de la remoción de partículas debida exclusivamente a la operación del purificador de aire, se determinó el Factor de Limpieza de Aire (ACF) de manera selectiva por tamaño en función del tiempo:

$$\text{ACF}(d, t) = \frac{C_{\text{natural}}(d, t)}{C_{\text{AP}}(d, t)} \quad (1)$$

Además, la tasa global de eliminación de partículas se calculó como

$$y_0(d, t) = \frac{1}{t} \ln \left[\frac{C(d, t)}{C(d, 0)} \right], \quad (2)$$

y la tasa de eliminación de partículas (exclusivamente debido al purificador de aire) se definió siguiendo la cinética de primer orden como

$$\text{PRR}(d, t) = \frac{1}{t} \ln \left[\frac{C_{\text{AP}}(d, t)}{C_{\text{AP}}(d, 0)} \right] - \frac{1}{t} \ln \left[\frac{C_{\text{natural}}(d, t)}{C_{\text{natural}}(d, 0)} \right] \quad (3)$$

En el caso $C_{\text{AP}}(d, t) / C_{\text{natural}}(d, t)$,

$$\text{PRR}(d, t) = \frac{1}{t} \ln [\text{ACF}(d, t)] \quad (4)$$

Esto era necesario para determinar la tasa de suministro de aire limpio (CADR), que, de acuerdo con el estándar ANSI / AHAM (Instituto Nacional Estadounidense de Estándares / Asociación de Fabricantes de Electrodomésticos), se define como

$$\text{CADR}(d, t) = \text{PRR}(d, t) \times V \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (5)$$

El concepto CADR permite comparar las eficiencias de limpieza del aire de un purificador de aire independiente y un sistema de ventilación / filtración de aire de circuito cerrado en un volumen de aire V (tenga en cuenta que PRR es una función de V).

Se utilizaron dos aerosoles de provocación no biológica, NaCl y humo, para estudiar la eliminación de partículas por el purificador de aire. Las partículas generadas estaban principalmente en el rango de tamaño de 0.02-2.0 μm , que incluye fracciones ultrafinas y finas y representa la mayoría de los virus y bacterias conocidos. El virus MS2 y las esporas bacterianas de Bacillus subtilis fueron los principales aerosoles de desafío biológico. Se realizaron experimentos seleccionados con la bacteria Pseudomonas fluorescens.

El bacteriófago MS2, un colifago icosaédrico de ARN icosaédrico sin cola de 27 nm, relativamente estable frente al estrés ambiental, se ha utilizado en el pasado como un simulador de la mayoría de los virus de mamíferos, y es conocido como indicador de virus entéricos (22- 26). Se preparó una suspensión madre del virus MS2 añadiendo 9 ml de caldo Luria-Bertani a un vial de fago liofilizado (ATCC 15597-B1). Esta suspensión

Se filtró usando un filtro de membrana de porosidad de 0,2 μm y se diluyó en serie para que la suspensión del nebulizador tuviera 10^8 - 10^9 Unidad formadora de placa PFU / mL (PFU)). El título de fago MS2 se determinó siguiendo un protocolo de ensayo de placa modificado de Adams (27); Se utilizó *Escherichia coli* (ATCC 15597, cepa C3000) como organismo huésped.

B. subtilis es una bacteria formadora de esporas gram-positiva con esporas en forma de bastoncillo de aproximadamente 0,7-0,8 μm de ancho y 1,5-1,8 μm de longitud (28). Las esporas de *B. subtilis* se han utilizado anteriormente en estudios de laboratorio como un sustituto de bacterias patógenas resistentes al medio ambiente (29-31). Las esporas bacterianas liofilizadas de *B. subtilis* (obtenidas de los Laboratorios Edgewood del Ejército de EE. UU., Aberdeen Proving Ground, Maryland) se activaron a 55-60°C durante 25 min y luego se lavó dos veces con agua desionizada estéril mediante agitación con vórtex seguido de centrifugación a 7000 rpm durante 7 min a temperatura ambiente. La concentración bacteriana total en suspensión se ajustó a 10^8 - 10^9 por ml usando un hemacitómetro. Las bacterias viables se enumeraron cultivando en medio agar de soja trippicosa (TSA) a 30°C durante 18 h; la concentración viable (cultivable) en la suspensión del nebulizador era del mismo orden de magnitud que la concentración total, es decir, 10^8 - 10^9 Unidad formadora de colonias CFU / mL (CFU)). Las bacterias *P. fluorescens* (utilizadas en pruebas seleccionadas) son relativamente sensibles al estrés ambiental. Antes de la aerosolización, se cultivaron células vegetativas de *P. fluorescens* (ATCC 13525) en caldo de tripticosa de soja a 28°C durante 18 h y se lavó de forma similar a las esporas de *B. subtilis*.

Cuando se realizaron pruebas con partículas biológicas, se recolectaron muestras de aire usando Button Samplers (SKC Inc., Eighty Four, PA) equipados con filtros de gelatina (SKC Inc.) y se operaron a un caudal de 4 L / min durante 5 min. Se utilizaron ocho muestreadores de botón en cada prueba generando un blanco, una muestra de fondo, tres muestras tomadas en t) 0 y las otras tres tomadas en un intervalo de tiempo específico; se probaron cuatro intervalos de tiempo: t) 10, 15, 30 y 60 min. Se realizaron experimentos seleccionados adicionales usando un BioSampler (SKC Inc. Eighty Four, PA) para recolectar *P. fluorescens* y *B. subtilis*. El BioSampler recolecta bacterias viables de manera eficiente (29) mientras que el medio líquido minimiza el estrés por desecación. Como su tamaño de corte es demasiado alto para muestrear de manera eficiente pequeños viriones MS2,

Las muestras se analizaron en busca de viriones viables en el aire (PFU) y bacterias (CFU) para cuantificar los porcentajes de los que sobrevivieron en el tiempo t. Estos se obtuvieron con y sin operar el purificador de aire. Nuestras pruebas preliminares mostraron que el funcionamiento del purificador de aire reduce considerablemente la concentración total de bioaerosol en la cámara debido a la emisión de iones. Por lo tanto, el emisor de iones se desactivó temporalmente en la unidad híbrida al probar la inactivación de virus y bacterias para asegurar un número suficiente de microorganismos para determinar el recuento viable al final de la prueba.

Se utilizó una alícuota de 200 μL de extracto de filtro de gelatina disuelto para el ensayo de placa para determinar el número de viriones activos (viables) en el aire (PFU / cm^3). De manera similar, el extracto se cultivó en placas de TSA para obtener la concentración aérea de bacterias viables (UFC / cm^3).

Se iniciaron pruebas adicionales para examinar si el efecto biocida del purificador de aire tuvo lugar de hecho en la fase de aerosol (y no después de que se recogieron los microorganismos en los filtros). Para ello, se recogieron los microorganismos aerosolizados en ocho filtros de gelatina durante 5 min en la cámara sin purificador de aire. Se analizaron cuatro filtros en busca de microorganismos viables inmediatamente después de esta prueba, mientras que los otros cuatro se expusieron al purificador de aire en la cámara durante 10, 15, 30 y 60 minutos y luego se analizaron. La comparación de dos conjuntos permitió examinar si la inactivación de microorganismos ocurrió en los filtros durante el proceso de recolección.

El nivel de ozono y la concentración de iones de aire se monitorearon en tiempo real en la cámara usando un monitor de ozono (PCI Ozone & Control Systems, Inc., West Caldwell, NJ) y un contador de iones de aire (AlphaLab Inc., Salt Lake City, UT), respectivamente. La temperatura del aire en la cámara de prueba era 24 (2°C) y la humedad relativa osciló entre 22 (2%) y 28 (2%) según se controla con una pluma termo / higrómetro (Fischer Scientific Co., Pittsburgh, PA).

El prototipo de purificador (Ecoquest International Inc., Greeneville, TN) utilizado en el estudio utilizó un emisor de iones y una celda RCI especialmente diseñada. El primero produce iones negativos en el aire interior, donde son adquiridos por partículas de aerosol. Es importante señalar que este método es diferente de la limpieza del aire cargando partículas en la entrada del purificador y luego recogiendo en electrodos metálicos por precipitación electrostática. La celda RCI presenta una estructura objetivo de flujo optimizado que comprende matrices de elementos tubulares alargados hechos de policarbonato y dispuestos en una orientación paralela en lados opuestos o alternativamente en cuatro lados de una fuente de luz UV de amplio espectro. La lámpara UV utiliza gas argón con mercurio y filamentos de carburo con una salida espectral entre 100 y 367 nm. Además, Se aplicó un recubrimiento a la estructura objetivo de la celda que comprende propiedades hidrófilas y que contiene el siguiente agrupamiento de materiales: dióxido de titanio, rodio, plata y cobre. Como resultado, una oxidación fotocatalítica forma especies reactivas, tales como radicales hidroxilo, huecos en las bandas de valencia, iones superóxido y peróxidos de hidrógeno.

Las pruebas se realizaron en dos cámaras de prueba interiores, incluida una gran cámara de acceso (24,3 m^3) que simulaba una habitación residencial y una cámara más pequeña (2,75 m^3) que simulaba un espacio confinado (por ejemplo, baño, área de oficina pequeña o cabina de automóvil). La eliminación de partículas se investigó en ambas cámaras, mientras que las pruebas de viabilidad del bioaerosol se realizaron en la cámara más pequeña que estaba hecha de acero inoxidable y permitió la biodescontaminación. El purificador de aire se probó en cámaras no ventiladas (sin intercambio de aire), ya que se sabe que los purificadores de aire portátiles son principalmente beneficiosos en espacios con poca ventilación (20, 21). El intercambio de aire se introdujo solo al probar el sistema de ventilación / filtración de aire de circuito cerrado equipado con un filtro HVAC para comparar su rendimiento con el del purificador de aire portátil en términos de CADR. El sistema de ventilación / filtración de aire también se implementó para limpiar la cámara de prueba entre experimentos. En la mayoría de las pruebas, el purificador de aire funcionó en la esquina de la cámara, frente al centro. Se llevó a cabo un experimento separado para examinar si su ubicación y orientación afectaban al ACF.

Resultados y discusión

Eliminación de partículas del aire. La Figura 2 muestra la evolución de la concentración y la distribución del tamaño de partícula del aerosol de NaCl cuando el purificador de aire funcionó en la cámara de prueba grande. Como se ve en este ejemplo, la concentración de aerosol de partículas de 0,1 μm disminuyó en un factor de 28 en 1 h y en un factor de aproximadamente 250 en 2 h; las correspondientes disminuciones para partículas de 1 μm fueron de aproximadamente 10 y 50 veces. Al realizar pruebas con partículas de humo, la concentración de aerosol disminuyó aún más rápidamente. Los niveles anteriores de reducción de la concentración de aerosoles son considerablemente mayores que los predichos por los modelos de descomposición natural tranquilos o agitados (32). Este resultado se obtuvo cuando tanto el emisor de iones de aire como la celda RCI funcionaron en la unidad. Curiosamente, estadísticamente el mismo efecto de reducción de partículas ($p > 0.05$) se observó cuando la celda RCI se apagó y solo funcionó el emisor de iones. Este último hallazgo proporciona la evidencia de que la eliminación de partículas se logró como resultado de la emisión de iones unipolares, pero no debido a reacciones fotocatalíticas.

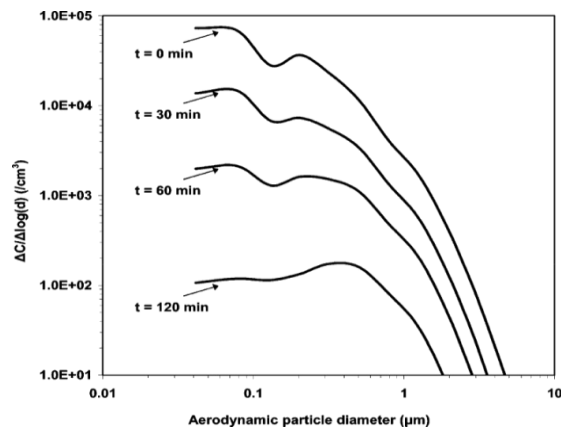


FIGURA 2. Concentración de partículas y distribución del tamaño del aerosol de NaCl medido con el ELPI en 24,3 m³ cámara con el purificador de aire en funcionamiento mirando hacia el centro de la cámara a 1,7 m del punto de medición. No hay ventilación en la cámara. La concentración de aerosol total inicial) 1,50 10⁵ /cm³.

Este hallazgo concuerda con los datos publicados anteriormente sobre el efecto de la ionización unipolar del aire sobre la concentración en el aire (18-21). La purificación del aire es particularmente eficaz en concentraciones iniciales de aerosol más altas ($> 10^4$ partículas / cm³) que garantizan una interacción adecuada entre los iones del aire y las partículas de aerosol. Como se mencionó anteriormente, se espera que el efecto sea mucho más pronunciado en ambientes no ventilados que en los ventilados.

La reducción de aerosol fue especialmente alta para las partículas de 0,3 µm. Por ejemplo, cuando el purificador de aire con una salida de iones de 10^{12} e / seg operado continuamente en una esquina del 24,3-m³ cámara frente al centro durante 2 h, ACF alcanzó 30-70 para d) 0.08-0.3 µm y 13-16 para d) 0.8-2 µm (en las pruebas realizadas con NaCl y humo como aerosoles de desafío). Los mismos niveles de ACF se pueden lograr más rápidamente en ambientes interiores de volúmenes más pequeños y más lento en espacios más grandes. Las tendencias experimentales concuerdan con el modelo de eliminación de aerosoles inducida por iones (20).

Se encontró que el ACF depende no solo del tiempo de operación y del tamaño de partícula, sino también de la ubicación / orientación del purificador en la cámara. Por ejemplo, se consideró preferible una ubicación en una esquina que mira hacia el centro de la habitación en lugar de la orientación que mira hacia la pared. La diferencia en ACF obtenida para las ubicaciones de centro y esquina fue significativa y aumentó con el tiempo de operación. El área sombreada en la Figura 3 presenta el factor de limpieza del aire inducido por iones cuando los datos selectivos del tamaño de partícula se integraron sobre los tamaños medidos de partícula de NaCl de hasta 2,5 µm y se promediaron sobre las tres ubicaciones / orientaciones seleccionadas en el 24,3 m³ cámara: en la esquina orientada hacia el centro, en el centro ya 80 cm de la pared que lo enfrenta.

La Figura 4 presenta los valores CADR logrados al operar el purificador de aire probado para cinco tamaños seleccionados de NaCl y partículas de humo que actúan como contaminantes en aerosol en los 24,3 m no ventilados³ cámara. El CADR oscila aproximadamente entre 42,1

(De 0,1 a 62,1 (1,8 m³/h para partículas de NaCl de d) 0.04-1.99 µm, y de 72.4 (0.9 a 115.5 (10.8 m³/h para partículas de humo del mismo rango de tamaño. La diferencia puede atribuirse a la diferente capacidad del NaCl y las partículas de humo para adquirir cargas eléctricas de los iones del aire, lo que da como resultado sus diferentes movilidades y, posteriormente, diferentes velocidades de migración. La explicación anterior parece válida dado que se demostró que la emisión de iones unipolares es el principal mecanismo que causa la reducción de la concentración de partículas de aerosol.

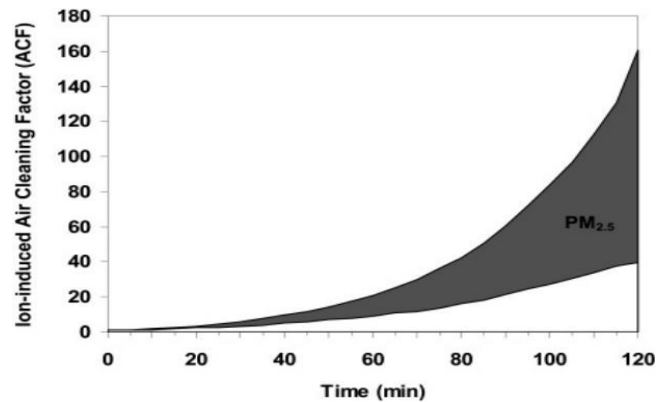


FIGURA 3. Factor de limpieza del aire inducido por iones (ACF) para PM_{2.5} NaCl medido con ELPI e integrado para diferentes ubicaciones y orientaciones del purificador de aire en los 24,3 m³ cámara. No hay ventilación en la cámara. El PM inicial_{2.5} concentración de aerosol

) (0,356-1,50)10⁵/cm³.

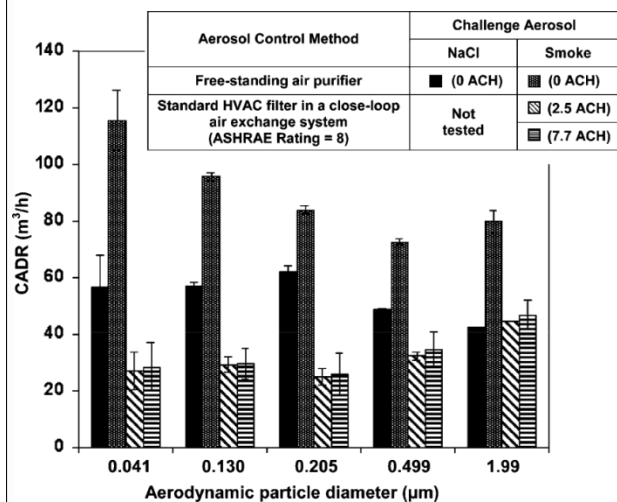


FIGURA 4. Tasa de suministro de aire limpio (CADR) determinada para los aerosoles de humo y NaCl según lo medido con el ELPI en los 24,3 m no ventilados³ cámara. El rendimiento del purificador de aire se compara con el de un filtro HVAC estándar (clasificación ASHRAE 8) instalado en el sistema de intercambio de aire de circuito cerrado de la cámara.

Además, la Figura 4 presenta los valores CADR logrados por el sistema de intercambio de aire de circuito cerrado equipado con un filtro estándar ASHRAE de clasificación 8 HVAC a dos tasas de intercambio de aire, 2.5 y 7.7 ACH. Los datos sugieren que el purificador de aire portátil probado que funciona en unos 25 m³La habitación no ventilada es capaz de proporcionar un CADR más del doble que el sistema HVAC central convencional con el filtro de clasificación 8. Obviamente, los filtros de partículas más eficientes proporcionan una reducción más rápida de los contaminantes en aerosol y pueden funcionar mejor que el purificador de aire probado. Por ejemplo, en comparación con la unidad portátil, el filtro HEPA instalado en el sistema de intercambio de aire de circuito cerrado de 24,3 m³La cámara proporcionó CADR aproximadamente 4 y 3 veces mayores a 2.5 y 7.7 ACH, respectivamente, cuando se desafió con partículas de NaCl, y 2.2 y 1.4 veces mayor cuando se desafió con partículas de humo. Sin embargo, los filtros HEPA rara vez se utilizan en sistemas HVAC centrales residenciales debido a la alta caída de presión y el efecto de carga en su rendimiento.

La eliminación de partículas del aire interior mediante la técnica híbrida de purificación de aire también se investigó en el más pequeño (2,75 m³) cámara, que de otro modo se utilizó principalmente para evaluar la inactivación de microorganismos viables. Los valores de CADR obtenidos con viriones MS2 de las mediciones de WPS fueron 73 (5 m³/h, que está en el CADR-

TABLA 1. Porcentaje de microorganismos en el aire que sobrevivieron en el tiempo t en los 2.75 m³ Cámara con la celda RCI operando en ella, medida mediante el recuento de PFU (para el virus MS2) o el recuento de CFU (para las endosporas de *Bacillus subtilis*)^{un}

exposición n hora,	porcentaje (media (SD) de microorganismos transportados por el aire vivido en la cámara con purificador de aire en funcionamiento durante el tiempo t	
	Virus MS2,	<i>Bacillus subtilis</i> endosporas,
	[UFP / cm ³] _t / [UFP / cm ³] ₀	[UFC / cm ³] _t / [UFC / cm ³] ₀
t (min)		
10	9.3 (2.0 (norte) 5)	24.1 (3.7(norte) 2)
15	9.2 (4.3 (norte) 12)	15.7 (1.7(norte) 3)
30	8.3 (1.1 (norte) 8)	7.9 (1.1(norte) 3)
60	10.3 (1.7 (norte) 5)	10.1 (1.3(norte) 3)

^a El muestreo de bioaerosoles se realizó con el Button Sampler equipado con filtros de gelatina. norte) número de réplicas.

rango obtenido para NaCl y partículas de humo en la cámara grande para los tamaños virales. Esto sugiere la viabilidad de usar partículas no biológicas para determinar la reducción de aerosol inducida por iones de biopartículas del mismo rango de tamaño. Además, este hallazgo implica que, al menos para el rango de tamaño de partícula que representa a los viriones MS2, el PRR debido a la emisión de iones en el aire interior es inversamente proporcional al volumen de aire [ver ecuación 5].

Ozono. En ambas cámaras de prueba (no ventiladas), la concentración de ozono aumentó gradualmente a medida que el purificador estaba funcionando continuamente. En los 24,3 m³ cámara, aumentó de 0,006 a 0,05 ppm en unos 35 min, mientras que en una más pequeña (2,75 m³) cámara, se produjo el mismo aumento en aproximadamente 5 min. Sin embargo, una vez que se introdujo un intercambio de aire (tan bajo como 1 ACH), la concentración de ozono en los 24,3 m³ la cámara no aumentó significativamente en comparación con el nivel inicial ($p > 0,05$). Nuestros datos de monitoreo obtenidos con la unidad probada operando en una habitación no ventilada de 100 m³ (no presentado aquí) sugieren que el nivel de ozono se puede mantener por debajo de 0.05 ppm mientras la unidad funciona continuamente durante muchas horas.

Algunos purificadores de aire que utilizan emisión de iones y, en mayor medida, la oxidación fotocatalítica pueden causar un mayor aumento de la concentración de ozono interior que el probado. El uso de estos dispositivos en espacios de aire ocupados confinados puede no ser apropiado ya que su funcionamiento continuo puede eventualmente conducir a niveles excesivos de ozono y, en presencia de ciertos compuestos químicos, producir nanopartículas (33). Aunque la emisión de iones unipolares tiene el potencial de suprimir este efecto, parece importante mantener el nivel de ozono por debajo de los umbrales existentes. Creemos que la solución se puede encontrar implementando un régimen intermitente (como alternativa al continuo), que permita que el purificador de aire funcione hasta que el ozono alcance cierto nivel, después de lo cual el elemento generador de ozono se apaga automáticamente para permitir que disminuya la concentración de ozono; entonces el ciclo se puede repetir.

Inactivación microbiana. La Tabla 1 resume los resultados de la inactivación microbiana. Sólo aproximadamente el 10% de los viriones de MS2 inicialmente viables sobrevivieron de 10 a 60 min de exposición al purificador en la cámara y aproximadamente el 90% se inactivaron. Cuando se controló la disminución natural de la concentración de MS2 en aerosol en la cámara (sin purificador en funcionamiento), encontramos que la concentración de virus activos era relativamente estable: la disminución no excedió 20,3 (0,9% durante 1 h. Los datos sugieren que la inactivación viral ocurre con bastante rapidez ya que el porcentaje de viriones supervivientes no mostró dependencia del tiempo de exposición durante t) 10-60 min. Por lo tanto, un tiempo relativamente corto puede ser suficiente para reducir el porcentaje de virus viables en un volumen de aire por un factor de 10, mientras que los que sobrevivieron mostraron una resistencia notable al estrés continuo.

el anfitrión y la formación de PFU (34). Además, el TiO₂La célula fotocatalítica puede producir daño oxidativo a la cápside del virus (35) y los radicales pueden causar alteración en el material genético del virus (36, 37). Nuestros hallazgos sugieren que el purificador de aire híbrido se puede usar de forma continua durante intervalos de tiempo cortos o en régimen intermitente para lograr una tasa de inactivación de virus considerable. Por otro lado, se cree que un funcionamiento prolongado del purificador de aire es ventajoso en entornos con un suministro continuo de viriones activos "frescos".

Aproximadamente el 75% de las esporas de *B. subtilis* transportadas por el aire expuestas al purificador de aire se inactivaron durante los primeros 10 minutos, el 85% durante los primeros 15 minutos y aproximadamente el 90% o más después de 30 minutos (Tabla 1). Entre 30 y 60 min de exposición, no observamos una disminución significativa en el número de esporas supervivientes (similar a la tendencia encontrada para los viriones), lo que sugiere una no linealidad del efecto. La desintegración natural en el recuento de cultivos no fue significativa ($p > 0,05$) durante 1 h, según se midió utilizando los Button Samplers equipados con filtros de gelatina. Sin embargo, la desviación estándar general de los datos obtenidos en estas pruebas de control fue tan alta como 58% y los recuentos de CFU de los filtros estuvieron cerca del límite de detección. Para abordar este problema, medimos la descomposición natural de las esporas de *B. subtilis* viables con el BioSampler en t) 0 y en t) 2 h.

En las bacterias, el proceso de inactivación por radicales hidroxilo reactivos puede proceder en cinco vías de reacción:

¥ oxidación de la coenzima A que causa inhibición de la respiración celular y muerte celular (38);

¥ destrucción de la membrana externa de las células bacterianas (12); ¥ oxidación de fosfolípidos insaturados en células bacterianas membrana (39);

¥ fuga de K intracelular⁺iones (11); y

¥ efectos perjudiciales sobre el ADN y el ARN (36, 37).

Una razón por la que la inactivación de las endosporas de *B. subtilis* dependía del tiempo es su capa de membrana gruesa que contiene peptidoglicanos. Esto es consistente con el estudio de Matsu-naga et al. (40), quien encontró que la fotooxidación de la coenzima A por el TiO₂El fotocatalizador no fue del todo eficaz contra el alga *Chlorella vulgaris* en agua debido a su pared celular más gruesa. Algunos otros mecanismos de autodefensa de las bacterias contra el estrés oxidativo, incluida la síntesis de enzimas superóxido dismutasa, también pueden ralentizar el proceso de inactivación (41).

Aunque el tiempo fue un factor en la inactivación de las esporas bacterianas, la pérdida de viabilidad ocurrió con relativa rapidez tanto para el virus MS2 como para *B. subtilis*. Esto puede atribuirse a la rápida interacción de los agujeros de la banda de valencia (h^+) (TiO₂ + $h\nu$ $fh^+ + e^-$) con las sustancias orgánicas, que están presentes en las paredes o membranas externas virales y bacterianas. La interacción antes mencionada probablemente ocurre antes de un número considerable de radicales hidroxilo ($^{\text{un}}\text{OH}$) se genera en el volumen de aire. Aunque estudios previos (11, 12) enfatizaron el papel de los radicales hidroxilo ($\text{H}_2\text{O} + h^+ f^{\text{un}}\text{OH} + \text{H}^+$), estos radicales pueden no ser el factor principal en la inactivación microbiana, particularmente en el aire. Además, dado que nuestros experimentos se llevaron a cabo en aire relativamente seco (HR <30%), las moléculas de agua no fueron especies predominantes en contacto con el catalizador y, por lo tanto, la contribución de radicales hidroxilo fue probablemente mucho menor que en los líquidos. Shang y col. (9) han concluido que en la fase gaseosa, los compuestos orgánicos, como el heptano, pueden interactuar fácilmente con los huecos fotogenerados, mientras que la interacción con las moléculas de vapor de agua no es tan prominente. Alberici y Jardim (8) han informado que los agujeros de la banda de valencia generados a partir de TiO₂fotootoxidación son capaces de oxidar cualquier compuesto orgánico. El proceso también produce peróxido de hidrógeno ($\text{O}_2 + e^- f \text{O}_2^-$; $\text{O}_2^- + \text{H}^+$

$f \text{HO}_2^-$; $2\text{HO}_2^- f \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$), que puede penetrar libremente en las membranas y paredes celulares y causar inactivación microbiana

(42). Nuevos estudios bioquímicos sobre el papel del TiO en fase gaseosa² la oxidación en los microorganismos transportados por el aire, así como los estudios sobre la cinética de reacción en la fase de aerosol, parecen ser útiles para examinar más a fondo las interpretaciones anteriores.

Los experimentos con *P. fluorescens* revelaron recuentos de CFU por debajo del límite de detección tanto en las muestras de prueba como en las de control. En contraste con las endosporas de *B. subtilis*, incluso una exposición muy corta al aire ambiente (HR <30%) disminuyó considerablemente la viabilidad de las células vegetativas de *P. fluorescens* aerosolizadas, que se sabe que son sensibles al estrés. Quizás, los microorganismos sensibles al estrés por desecación son más útiles para este tipo de prueba si la prueba se realiza a niveles de humedad relativa más altos.

Se realizaron experimentos de control adicionales para investigar si la disminución de la viabilidad encontrada para el virus MS2 y las esporas de *B. subtilis* se produjo en la fase de aerosol o en el filtro de muestreo. Para MS2, encontramos que 1835 (270 PFU / mL y 1855 (325 PFU / mL) se desarrollaron cuando se cultivaron extractos de filtro de filtros de gelatina no expuestos y expuestos durante 10 min, respectivamente. Para *B. subtilis*, observamos 1770 (275 CFU / mL y 1125 (410 UFC / mL en extractos tomados de filtros no expuestos y expuestos durante 60 minutos, respectivamente. No se produjeron cambios significativos en la viabilidad viral o bacteriana como resultado de una exposición sin aerosol ($p > 0,05$). Por lo tanto, estos hallazgos confirman que la inactivación viral y bacteriana observada en nuestras pruebas ocurrió efectivamente en la fase de aerosol y no estuvo asociada con la inactivación en filtros.

Efecto combinado (cálculo de muestra). Se concluyó que la eliminación de partículas se produjo únicamente debido a la emisión de iones unipolar, mientras que la inactivación de viriones viables MS2 en el aire y esporas de *B. subtilis* ocurrió debido a la reacción fotocatalítica promovida por la célula RCI. Ambos mecanismos que funcionan simultáneamente en un purificador de aire de tipo híbrido pueden dar como resultado una disminución considerable de la exposición a biocontaminantes en aerosol viables preexistentes en el ambiente interior. No se cree que el ozono producido por la célula RCI cause una inactivación microbiana significativa porque su nivel no fue suficiente. Tseng y Li (43) se refirieron a 3,43 ppm como un nivel apropiado para el virus MS2 en el aire, y Li y Wang (44) no observaron ninguna inactivación de las esporas de *B. subtilis* en el aire en O₃ tan alto como 20 ppm.

La siguiente estimación se hizo con base en los datos experimentales obtenidos en este estudio. Suponiendo que la limpieza del aire inducida por iones elimina aproximadamente el 80% de los patógenos viables en el aire del aire de una habitación en 30 minutos y que la fotoxidación inducida por RCI deja solo el 10% de los microorganismos restantes en el aire viables, la exposición general del aerosol al patógeno viable en este la habitación después de 30 min se reduce en un factor de aproximadamente 50.

La rápida inactivación de microorganismos observada hace innecesario el funcionamiento continuo de la célula RCI. Los datos sugieren que se puede utilizar "a tiempo parcial" durante 10-30 minutos y "descansar" durante aproximadamente 1-2 h hasta que se alcance el nivel de ozono de fondo (propuesto anteriormente como un régimen intermitente), mientras que la emisión de iones puede durar colóquelo continuamente para mantener la concentración de aerosol disminuyendo.

Expresiones de gratitud

La investigación fue apoyada parcialmente por EcoQuest International. La participación del Dr. KY Kim fue parcialmente financiada por el Programa de Becas Postdoctorales de la Fundación de Investigación de Corea. Se agradece mucho este apoyo. También agradecemos al Dr. Taekhee Lee por la asistencia técnica. Descargo de responsabilidad: la referencia a empresas o productos comerciales específicos no constituye ni implica su respaldo, recomendación o favoritismo por parte de los autores o de la Universidad de Cincinnati.

Literatura citada

- (1) EPA (Agencia de Protección Ambiental de EE. UU.). Generadores de ozono que se venden como purificadores de aire: una evaluación de la eficacia y

consecuencias para la salud; <http://www.epa.gov/iaq/pubs/ozone-gen.html>; Consultado el 22 de mayo de 2006.

- (2) ACGIH (Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales). Valores límite de umbral para sustancias químicas y agentes físicos e índices de exposición biológica; ACGIH: Cincinnati, OH, 2004; págs. 44.
- (3) OSHA (Administración de Salud y Seguridad Ocupacional). Regulaciones (Normas 29 CFR): Contaminantes del aire, 1915.1000; <http://www.osha.gov/pls/oshaweb>; Consultado el 31 de mayo de 2006.
- (4) FDA (Administración de Drogas y Alimentos de EE. UU.). Requisitos reglamentarios de etiquetado para dispositivos médicos; Publicación del HHS FDA 89-4203; Imprenta del Gobierno de los Estados Unidos: Washington, DC, 1989.
- (5) EPA (Agencia de Protección Ambiental de EE. UU.). Estándares Nacionales de Calidad del Aire Ambiental (1997); <http://www.epa.gov/air/criteria.html>; Consultado el 24 de mayo de 2006.
- (6) Foarde, KK; VanOsdell, DW; Steiber, RS Investigación del ozono en fase gaseosa como biocida potencial. *Apl. Ocupar Rein. Hyg.* 1997, 12, 535-542.
- (7) Li, C.-S.; Wang, Y. -C. Efectos germicidas superficiales del ozono para microorganismos. *AIHA J.* 2003, 64, 533-537.
- (8) Alberici, RM; Canela, MC; Eberlin, MN; Jardim, WF Desactivación del catalizador en la fase gaseosa destrucción de compuestos orgánicos que contienen nitrógeno utilizando TiO₂/UV-VIS. *Apl. Catal., B* 2000, 793, 1-9.
- (9) Shang, J.; Du, Y.; Xu, Z. Oxidación fotocatalítica de heptano en fase gaseosa sobre TiO₂. *Chemosphere* 2002, 46, 93-99.
- (10) Matsunaga, T.; Tomoda, R.; Nakajima, T.; Nakamura, N.; Komine, T. Sistema de esterilización continua que utiliza polvos fotosemiconductores. *Apl. Rein. Microbiol.* 1988, 54, 1330-1333.
- (11) Saito, T.; Iwase, T.; Horie, J.; Morioka, T. Modo de acción bactericida fotocatalítica del semiconductor en polvo TiO₂ sobre mutantes de *Strep-tococi*. *J. Photochem. Photobiol.* 1992, 14, 369-379.
- (12) Sunada, K.; Kikuchi, Y.; Hashimoto, K.; Fujishima, A. Efectos bactericidas y desintoxicantes del TiO₂ fotocatalizadores de película fina. *Rein. Sci. Technol.* 1998, 32, 726-728.
- (13) Goswami, DY; Trivedi, DM; Bloque, SS Desinfección fotocatalítica del aire interior. *Trans. ASME* 1997, 119, 92-96.
- (14) Goswami, TK; Hingorani, S.; Greist, H.; Goswami, DY; Bloquear, S. S. Sistema fotocatalítico para destruir bioaerosoles en el aire. *J. Adv. Tecnología de oxidación.* 1999, 4, 185-188.
- (15) Pal, A.; Min, X.; Yu, LE; Pehkonen, SO; Ray, MB Inactivación fotocatalítica de bioaerosoles por TiO₂membrana recubierta. En t. *J. Chem. Reactor Eng.* 2005, 3, A45.
- (16) Keller, V.; Keller, N.; Ledoux, MJ; Lett, M.-C. Inactivación de agentes biológicos en una corriente de aire por fotocátalisis. *Chem. Comun.* 2005, 23, 2918-2920.
- (17) Lin, C. -Y.; Li, C. -S. Efectividad de los filtros fotocatalizadores de dióxido de titanio para el control de bioaerosoles. *Aerosol Sci. Technol.* 2003, 37, 162-170.
- (18) Grinshpun, SA; Mainelis, G.; Trunov, M.; Adhikari, A.; Reponen, T.; Willeke, K. Evaluación de purificadores de aire iónicos para reducir la exposición a aerosoles en espacios interiores confinados. *Aire interior* 2005, 15, 235-245.
- (19) Lee, BU; Yermakov, M.; Grinshpun, SA La emisión de iones unipolares mejora la protección respiratoria contra partículas finas y ultrafinas, *J. Aerosol Sci.* 2004, 35, 1359-1368.
- (20) Mayya, YS; Sapra, BK; Khan, A.; Soleado, F. Eliminación de aerosoles por ionización unipolar en ambientes interiores. *J. Aerosol Sci.* 2004, 35, 923-941.
- (21) Grinshpun, SA; Adhikari, A.; Lee, BU; Trunov, M.; Mainelis, G.; Yermakov, M.; Reponen, T. Control de la contaminación del aire interior mediante ionización. En *Contaminación del aire XII*; Brebbia, CA, Ed.; WIT Press: Southampton, Reino Unido, 2004; págs. 689-704.
- (22) Kekez, MM; Sattar, SA Un nuevo método basado en ozono para la inactivación de virus: estudio preliminar. *Phys. Medicina. Biol.* 1997, 42, 2027-2039.
- (23) O'Connel, KP; Bucher, JR; Anderson, PE; Cao, CJ; Kan, A.S.; Gostomski, MV; Valdes, JJ Ensayos de PCR-transcripción inversa fluorogénica en tiempo real para la detección de bacteriófagos MS2. *Apl. Rein. Microbiol.* 2006, 72, 478-483.
- (24) Jones, MV; Bellamy, K.; Alcock, R.; Hudson, R. El uso del bacteriófago MS2 como sistema modelo para evaluar desinfectantes de manos virucidas. *J. Hosp. Infectar.* 1991, 17, 279-285.
- (25) Havelaar, AH; van Olphen, M.; Los bacteriófagos de ARN específicos de Drost, YC F son organismos modelo adecuados para virus entéricos en agua dulce. *Apl. Rein. Microbiol.* 1993, 59, 2956-2962.
- (26) Allwood, PB; Malik, YS; Hedberg, CW; Goyal, SM Survival of F-specific RNA colifage, feline Calicivirus y *Escherichia coli* in water: un estudio comparativo. *Apl. Rein. Microbiol.* 2003, 69, 5707-5710.
- (27) Adams, Bacteriófagos MH; Interscience Publishers, Inc: Nueva York, 1959.

- (28) Johnson, B .; Martin, DD; Resnick, IG Eficacia de equipos de protección respiratoria seleccionados desafiados con *Bacillus subtilis* subsp. *Niger*. *Apl. Reinar. Microbiol.* 1994, 60, 2184-2186.
- (29) Lin, X; Reponen, TA; Willeke, K .; Grinshpun, SA; Foarde, K .; Ensor, D. Muestreo a largo plazo de bacterias y hongos en el aire en un líquido que no se evapora. *Atmos. Reinar.* 1999, 33, 4291-4298.
- (30) Lin, X .; Reponen, T .; Willeke, K .; Wang, Z .; Grinshpun, SA; Trunov, M. Supervivencia de microorganismos en el aire durante la recolección de aerosoles en remolino. *Aerosol Sci. Technol.* 2000, 32, 184-196.
- (31) Mainelis, G .; Grinshpun, S .; Willeke, K .; Reponen, T .; Ulevicius, V .; Hintz, P. Colección de microorganismos aerotransportados por precipitación electrostática. *Aerosol Sci. Technol.* 1999, 30, 127-144.
- (32) Hinds, WC *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, 2nd ed .; John Wiley & Sons, Inc .: Nueva York, 1999.
- (33) Grinshpun, SA; Toivola, M .; Lee, S.-A .; Reponen, T. Formación de nanopartículas en el aire interior a un mayor nivel de ozono. En resúmenes de la 24ª reunión anual de la Asociación Estadounidense para la Investigación de Aerosoles, Austin, Texas, EE. UU., 17 al 21 de octubre de 2005; AAAR: monte. Laurel, Nueva Jersey, 2005; pág 327.
- (34) Von Sonntag, C. Desinfección por radicales libres y radiación UV. *Suministro de agua* 1986, 4, 11-18.
- (35) Turchi, CS; Ollis, DF Degradación fotocatalítica de contaminantes orgánicos del agua: mecanismos que involucran la unión de radicales hidroxilo. *J. Catal.* 1990, 122, 178-192.
- (36) Dunford, R .; Salinaro, A .; Cai, L .; Serpone, N .; Horikoshi, S .; Hidaka, H .; Knowland, J. Oxidación química y daño del ADN catalizados por ingredientes de filtros solares inorgánicos. *FEBS Lett.* 1997, 418, 87-90.
- (37) Hidaka, H .; Horikoshi, S .; Serpone, N .; Knowland, J. Daño fotoquímico in vitro al ADN, ARN y sus bases por un agente protector solar inorgánico al exponerse a la radiación UVA y UVB. *J. Photochem. Photobiol., A* 1997, 111, 205-213.
- (38) Vohra, A .; Goswami, DY; Deshpande, DA; Block, SS Inactivación fotocatalítica mejorada de esporas bacterianas en superficies en el aire. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* 2005, 32, 364-370.
- (39) Maness, PC; Smolinski, S .; Blake, DM; Huang, Z .; Wolfrum, EJ; Jacoby, WA Actividad bactericida del TiO fotocatalítico: reacción: hacia la comprensión de su mecanismo de muerte. *Apl. Reinar. Microbiol.* 1999, 65, 4094-4098.
- (40) Matsunaga, T .; Tamoda, R .; Nakajima, T .; Wake, H. Esterilización fotoelectroquímica de células microbianas mediante polvos semiconductores. *FEMS Microbiol. Letón.* 1985, 29, 211-214.
- (41) Rincón, AG; Pulgarín, C. Inactivación fotocatalítica de *E. coli*: efecto de la intensidad de la luz (continua-intermitente) y del TiO (suspendido-fijo) concentración. *Apl. Catal., B* 2003, 44, 263-284.
- (42) Marquis, RE; Sim, J .; Shin, SY Mecanismo molecular de resistencia al calor y al daño oxidativo. *J. Appl. Bacteriol. Symp. Supl.* 1994, 76, 40S-48S.
- (43) Tseng, C.-C .; Li, C.-S. Ozono para inactivación de bacteriófagos en aerosol. *Aerosol. Sci. Technol.* 2006, 40, 683-689.
- (44) Li, C.-S .; Wang, YC Efectos de inactivación del ozono en el aire para bioaerosoles. *J. Environ. Salud* 2006, presentado.

Recibido para revisión el 8 de junio de 2006. Manuscrito revisado recibido el 19 de septiembre de 2006. Aceptado el 20 de octubre de 2006.

ES0613730