

Los inodoros comerciales emiten columnas de aerosol de rápida propagación



John P. Crimaldi^{*}, Aaron C. True, Karl G. Linden, Mark T. Hernandez, Lars T. Larson & Anna K. Pauls

Los aerosoles pueden transmitir enfermedades infecciosas como el SARS-CoV-2, la gripe y el norovirus. Los inodoros con descarga emiten aerosoles que propagan patógenos contenidos en las heces, pero se sabe poco sobre la evolución espaciotemporal de estas plumas o los campos de velocidad que las transportan. Usando luz láser para iluminar aerosoles expulsados, cuantificamos la cinemática de las plumas que emanan de un inodoro comercial tipo fluxómetro, y usamos el movimiento de las partículas de aerosol para calcular los campos de velocidad del flujo asociado. La descarga del inodoro produce un fuerte chorro caótico con velocidades superiores a 2 m/s; Este chorro transporta aerosoles a alturas que alcanzan 1,5 m dentro de los 8 segundos posteriores al inicio de una descarga. La cuantificación de las plumas de los inodoros y las velocidades de flujo asociadas proporciona una base para futuras estrategias de diseño para mitigar la formación de penachos o desinfectar patógenos dentro de ellos.

Tirar de la cadena de un inodoro genera un turbul energéticoFlujo otorrinolaringólogo que libera gotitas y aerosoles en el IR¹⁻⁴, alcanzando alturas superiores a 1,5 m⁵ en escenarios que presentan un mayor riesgo de transmisión de enfermedades mediadas por aerosoles y fómites a partir de féces⁶⁻⁹. Las gotas más grandes se asientan en segundos, pero aerosoles más pequeños (<5 μ m) permanecer suspendido^{10, 11}. El presencia de Patógenos en inodoro Flancos o en tazón Agua Contribuye Para contaminación de el aerosoles⁴ y contaminación de tazón Agua Mayo persistir después Docenas de Limpia^{12, 13}. Bioaerosol Concentraciones liberado De un Enrojecida inodoro variar Dependiendo en el tipo de t oilet^{14, 15}, Ventilación rendimiento¹⁶, posición radial alrededor el B búho¹⁷, Agua abastecimiento presión l evel¹⁸ y el presencia de Residuos fecales¹¹. Mientras que el crecimiento del aerosol plume se reduce, pero no se elimina, por la presencia de una tapa cerrada^{2, 10, 19}, los inodoros en entornos públicos, comerciales o de atención médica generalmente no tienen tapas. Si bien estudios anteriores documentan dónde terminan los aerosoles de inodoro, se sabe muy poco sobre la física y la cinemática de cómo llegan allí.

Si bien muchas asociaciones epidemiológicas con contextos sanitarios fecales-orales están bien establecidas, faltan sus contrapartes en aerosol. La exposición respiratoria a microbios en el aire en entornos sanitarios ha sido un foco de salud pública a medida que la disponibilidad de baños públicos cerrados se expandió con la urbanización. Aunque se han establecido evaluaciones cuantitativas del riesgo en este contexto higiénico²⁰, su aplicación práctica requiere características de la fuente de emisión, así como la identidad, distribución, abundancia y persistencia específica de patógenos potenciales aerosolizados en intervalos de tamaño respirable resueltos en el tiempo²¹. La exposición a aerosoles sanitarios es aguda, con una fuerte dependencia del comportamiento de los ocupantes, lo que se suma al desafío de evaluar los riesgos respiratorios en entornos de baños confinados. Los riesgos asociados con la transmisión de virus respiratorios y entéricos a través del uso de retretes públicos debido a aerosoles contaminados de la pluma del inodoro, aerosoles suspendidos de usuarios anteriores o transmisión a través de superficies de alto contacto deben mitigarse siempre que sea posible^{4, 22, 23}. Se ha demostrado que el SARS-CoV-2 y otros virus sobreviven en superficies durante varios días²⁴⁻²⁶, y bacterias entéricas, potencialmente patógenas y de otro tipo, como *C. Los difíciles* se aerosolizan al lavar y posteriormente se depositan en superficies arqueológicas locales como posibles fómites¹⁰.

El conocimiento actual de las columnas de aerosol de los inodoros se deriva principalmente de mediciones discretas de concentraciones de partículas en el aire y sedimentadas. El conocimiento de la cinemática del penacho del inodoro se limita al video de alta velocidad de grandes gotas expulsadas muy cerca del búho b⁸, visualización cualitativa de un penacho de hielo seco desde el baño de un avión²⁷ y simulaciones numéricas de velocidades de flujo y partículas expulsadas dentro de un inodoro idealizado modelo¹⁵. Faltan mediciones de campo completo y resueltas en el tiempo de la dinámica de la pluma espaciotemporal, incluidos los campos de velocidad del flujo de aire, y son fundamentales para el desarrollo y las pruebas de futuras estrategias de diseño para mitigar la exposición humana a través de la formación de plumas, desinfectar los patógenos transportados por la pluma^{28, 29} y mejorar la eliminación de la pluma a través de la ventilación²⁰.

(2022) 12:20493

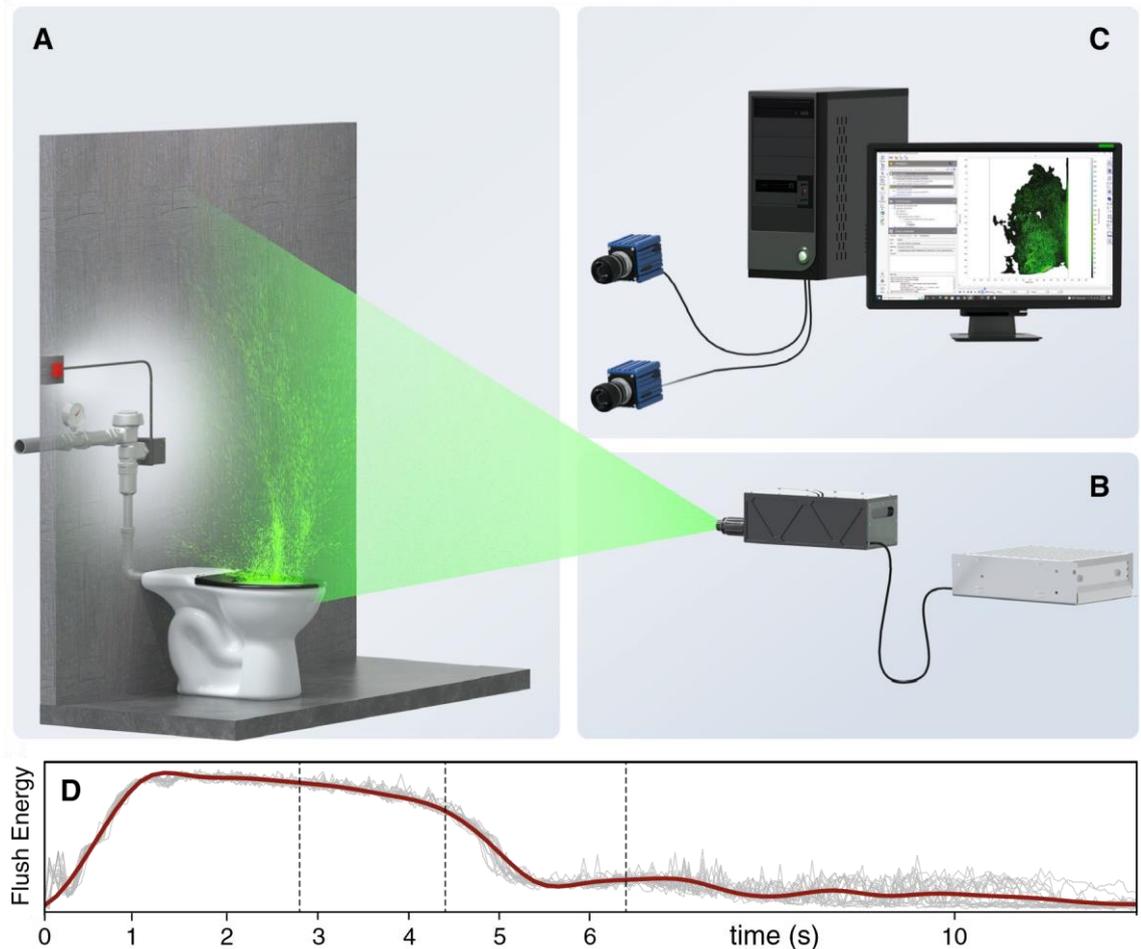


Figura 1. Iluminación de laboratorio e imágenes de penachos de aerosol generados al ras. **(A)** Experimento de laboratorio con un inodoro comercial tipo fluxómetro (1.6 galones por descarga). Para todos los experimentos, el inodoro contiene, y se descarga con, agua pura del grifo sin sólidos ni aditivos. La válvula de descarga (ubicada detrás de la pared posterior) es alimentada por un suministro de 60 psi y se activa eléctricamente a través de un botón. **(B)** Utilizamos láseres continuos y pulsados para generar una lámina de luz delgada que ilumina el penacho en un plano vertical sobre la línea central del tazón. **(C)** La luz láser dispersada por partículas de aerosol durante y después del ciclo de descarga es fotografiada por cámaras. **(D)** Historial de tiempo de la intensidad y duración del ciclo de descarga utilizando los niveles promedio de presión sonora en el recipiente (línea roja) de 20 réplicas de descarga (líneas grises) como métrica. El tiempo $t=0$ corresponde al instante en que se pulsa el botón de descarga.

Resultados

Para visualizar y cuantificar la cinemática de la pluma de aerosol sobre un inodoro comercial tipo fluxómetro típico de los que se usan en América del Norte (Fig. 1A), utilizamos láseres continuos y pulsados para crear una lámina de luz delgada (Fig. 1B) que ilumina un plano vertical en la línea central del inodoro. Cuando se descarga el inodoro, la columna de aerosol resultante dispersa la luz que se visualiza desde el lado con cámaras (Fig. 1C). La secuencia de descarga del inodoro comienza con una pulsación remota del botón que activa una válvula solenoide en el fluxómetro, lo que permite que el agua de suministro ingrese a la válvula del fluxómetro (en los baños públicos, esta activación a menudo se realiza mediante un sensor de movimiento óptico). El agua de descarga que entra en el recipiente crea un flujo turbulento energético con una firma audible familiar. Utilizamos niveles de presión sonora medidos por un medidor de ruido cerca del recipiente como métrica para la fuerza y la duración del ciclo de descarga (Fig. 1D). La acción de lavado dura aproximadamente 5,5 segundos después

de presionar el botón ($t = 0$), con la mayor parte de la energía de descarga que ocurre durante $0,5 < t < 5$ s ; gran parte del sonido grabado para $t > 6$ s está asociado con el relleno del recipiente después de la descarga.

Para demostrar la estructura de la pluma de aerosol iluminada en el laboratorio como visible para el ojo humano, utilizamos un láser continuo y una cámara digital comercial para tomar una secuencia de imágenes en color de la pluma (Fig. 2). Para estas fotos, seleccionamos una velocidad de obturación lenta (1/50 s) para inducir el desenfoco de movimiento de partículas en regiones localizadas de estructuras de flujo en forma de chorro de alta velocidad que transportan el penacho hacia arriba desde el tazón. La naturaleza inestable y dinámica de la pluma es particularmente evidente en la película S1.

Para recopilar datos cuantitativos sobre la ubicación y el movimiento de las partículas de aerosol, utilizamos un láser pulsado y un par de cámaras científicas sCMOS para obtener imágenes de la luz dispersada por las partículas. En este caso, el tiempo de exposición de la imagen (velocidad de obturación efectiva) se establece mediante la duración del pulso láser (5 ns), lo que da como resultado imágenes nítidas con $< 0,02$ píxeles de desenfoco de movimiento. Estudios previos han demostrado que los recuentos de partículas de aerosol se correlacionan con los niveles de patógenos en el plume¹⁸, por lo que también se espera que la intensidad de la luz dispersa en nuestras imágenes se correlacione con los niveles potenciales de patógenos. Para

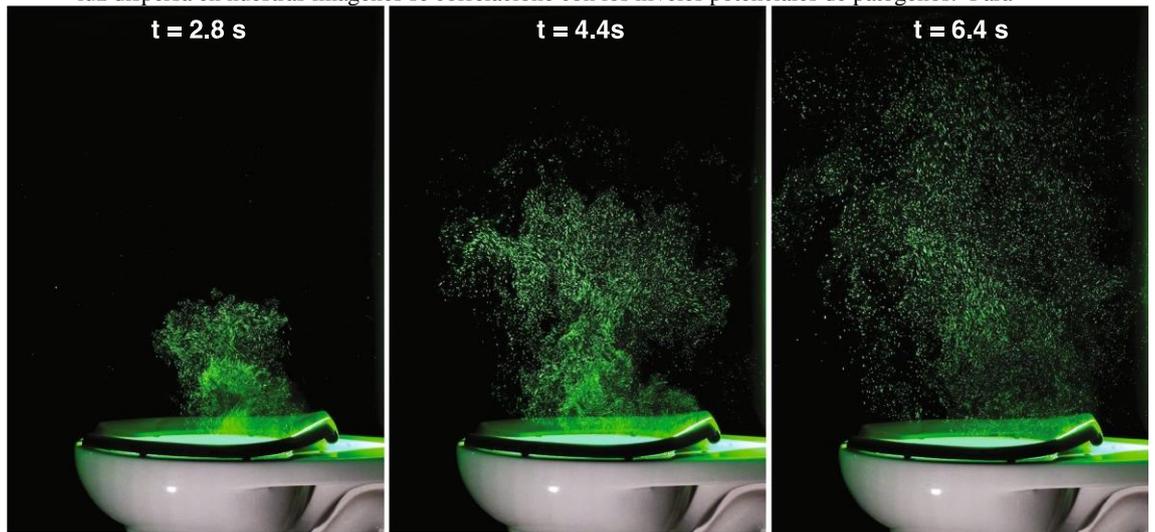


Figura 2. Fotografías de la pluma de aerosol iluminada en $t = 2.8, 4.4$ y 6.4 s (indicadas con líneas punteadas en la Fig. 1D) después de la iniciación del lavado. Para estas imágenes y para Movie S1, utilizamos un láser de onda continua y una cámara comercial a color; Las imágenes muestran el penacho iluminado tal como aparece al ojo humano en el laboratorio.

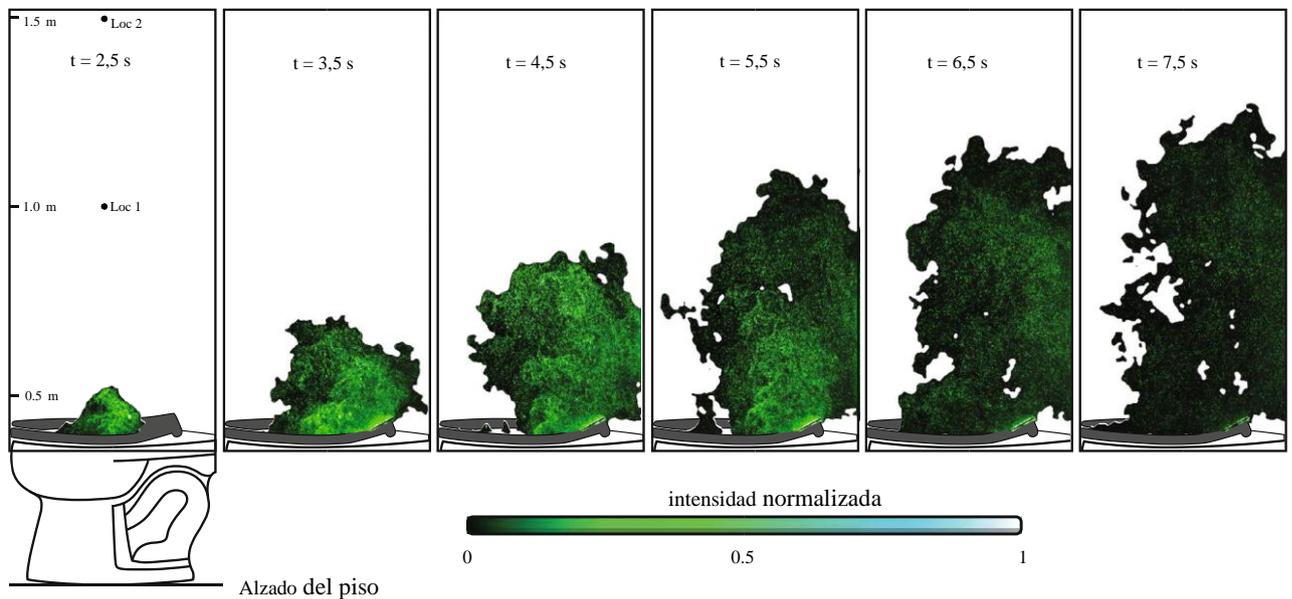


Figura 3. Distribución espacial y crecimiento de penachos de aerosol a lo largo del tiempo. Secuencia temporal a intervalos de 1 s de penachos de aerosol instantáneos inducidos por el lavado que muestran un

crecimiento rápido y persistente. Cada panel muestra la intensidad de las partículas fotografiadas (mapa de color verde) y las envolturas de penacho calculadas (regiones negras), donde los tiempos indicados corresponden a la secuencia de enrasamiento en la Fig. 1D. La forma compleja del límite de la envoltura proviene del campo de flujo turbulento y caótico inducido por la descarga del inodoro. Las dos ubicaciones "Loc 1" y "Loc 2" indicadas en el primer panel corresponden a ubicaciones donde se toman mediciones de partículas ópticas, como se muestra en la Fig. 5.

Resolución espacial mejorada ($250 \mu\text{m}$), cada cámara captura regiones separadas, pero ligeramente superpuestas, de la pluma; las dos imágenes se unen para formar una sola imagen de $0,57 \text{ m}$ de ancho \times $1,23 \text{ m}$ de alto que alcanza $1,59 \text{ m}$ sobre el suelo.

Para mapear la evolución espacial de la pluma de aerosol inducida por el lavado (Fig. 3), utilizamos una técnica de umbral de intensidad para calcular las envolturas de la pluma en diferentes momentos de la secuencia de descarga, donde los tiempos indicados corresponden al ciclo de descarga en la Fig. 1D. La envoltura calculada (representada en negro) demarca el límite del frente de avance de los aerosoles. La intensidad de las partículas fotografiadas se representa en verde para mayor consistencia visual con las fotografías en color de la Fig. 2. El penacho es expulsado hacia arriba y hacia atrás hacia la pared detrás del inodoro, con la mayor concentración de partículas que ocurren dentro de estructuras en forma de chorro en la región interior de la envoltura. Por $t = 4,5 \text{ s}$, el penacho incide en la pared trasera impermeable, impidiendo el movimiento hacia atrás y mejorando el movimiento vertical. El movimiento de la pluma es caótico y turbulento, como lo demuestra la naturaleza compleja y fractal.

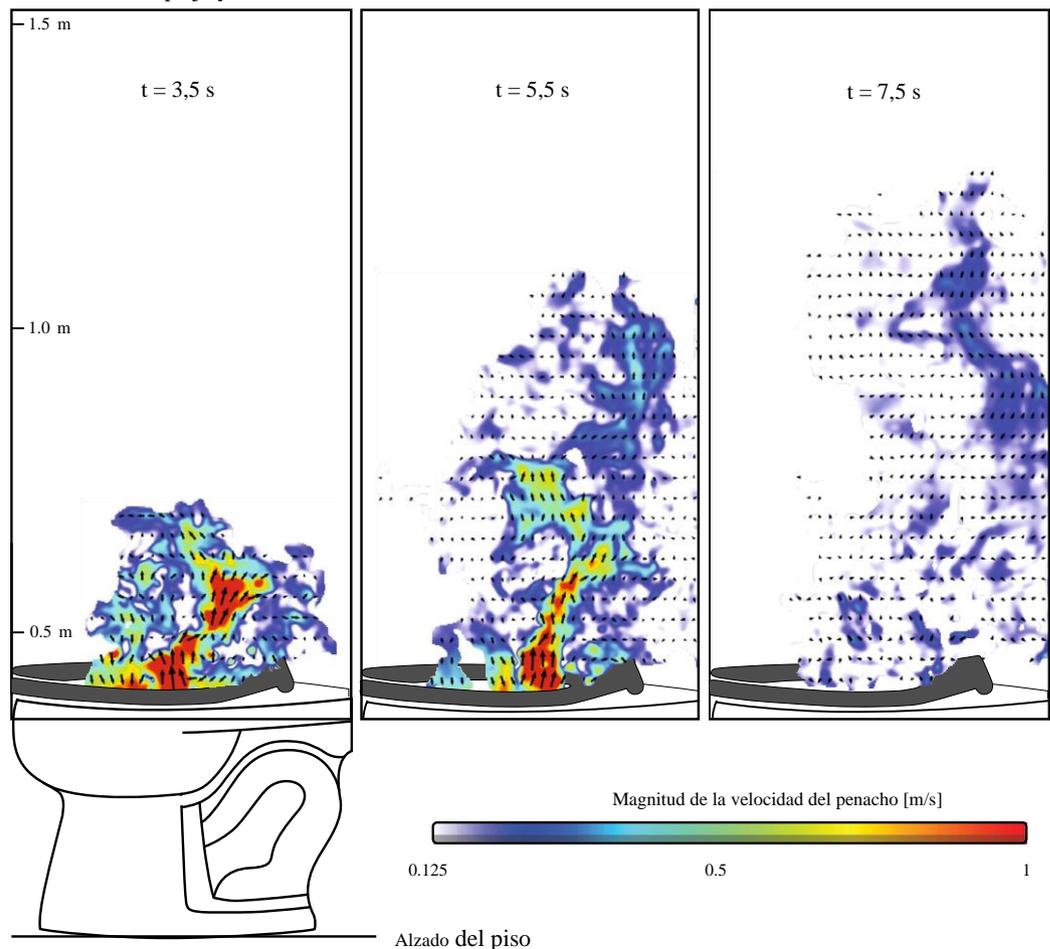


Figura 4. Campos de flujo turbulentos responsables del transporte de penachos de aerosol. Secuencia temporal de velocidades instantáneas inducidas por descarga calculadas a partir de pares de imágenes de partículas utilizando PIV para la misma secuencia de descarga que se muestra en la Fig. 3. La dirección del flujo se indica dentro de las envolturas del penacho con flechas negras, y la magnitud de la velocidad se indica mediante la longitud de la flecha y también por el mapa de colores. Los campos de velocidad turbulenta exhiben estructuras de chorro de alta velocidad (rojo) que oscilan rápidamente durante la descarga. El mapa de colores de la magnitud de la velocidad comienza en $0,125 \text{ m/s}$, que es típico de las velocidades de flujo ambiente en el laboratorio donde se realizaron las mediciones.

de la envoltura, con frecuentes incursiones de aire libre de aerosoles que se entrometen hacia el interior de la pluma. La envoltura del penacho fotografiado se eleva a una altura de más de 1,3 m en 7,5 s. Los ensayos repetidos revelan variaciones de envoltura de envoltura de enrasado a rasante (la física caótica es sensible a pequeñas diferencias en las condiciones iniciales), pero las características de la pluma a gran escala son consistentes. Para tiempos superiores a 8 s, la propagación y dilución de la pluma con el aire circundante limita nuestra capacidad de obtener imágenes directas de un mayor crecimiento de la pluma. Para demostrar que el penacho crece y persiste durante tiempos > 8 s, utilizamos un instrumento de conteo de partículas en el aire más sensible, como se discute a continuación.

Para cuantificar la magnitud, dirección y estructura del flujo de aire inducido por la descarga que transporta la pluma de aerosol, utilizamos la velocimetría de imagen de partículas (PIV) ^{30,31} para calcular los campos de velocidad instantánea dentro de las envolturas de la pluma (Fig. 4). La dirección de la velocidad y la magnitud están representadas por la orientación y la longitud de las flechas negras. Para mayor claridad, la magnitud de la velocidad también se indica mediante la superposición de mapa de colores. Los aerosoles fotografiados sirven como partículas de siembra efectivas para PIV, lo que resulta en campos de velocidad calculados con incertidumbres generalmente < del 5%. El flujo es sorprendentemente energético y caótico, y exhibe un fuerte comportamiento similar a un chorro con velocidades de 1 m / s o más (regiones rojas en los dos primeros paneles) que oscilan de manera impredecible durante los primeros 6 segundos del ciclo de descarga. Las velocidades instantáneas exceden ampliamente las velocidades de flujo ambiente en el laboratorio (10-15 cm/s) y ocasionalmente superan los 2 m/s. Las velocidades grandes, no uniformes e inestables transportan y dispersan eficientemente los aerosoles expulsados del recipiente durante la descarga.

Para comprender el potencial de las plumas de los inodoros para exponer a los humanos a patógenos en aerosoles, utilizamos un contador óptico de partículas para medir el tamaño y la cantidad de partículas de aerosol expulsadas por el filtro ^{10, 11, 17}. Las mediciones se realizan en tres lugares (Fig. 5A): Las ubicaciones 1 y 2 están sobre el tazón, y también se muestran como referencia en la Fig. 3—mientras que la ubicación 3 está más alejada de la parte trasera del todo. Para ver el efecto del ciclo de lavado en las partículas en cada ubicación, medimos los recuentos de partículas en tres intervalos de tiempo (Fig. 5B): un intervalo de prelavado (barras grises), uno que comienza inmediatamente después del empuje (barras rojas) y uno que está centrado a 60 s después de la descarga (barras azules). Los recuentos de partículas se agruparon en tres contenedores de tamaño: $0,2 \mu\text{m} \leq d \leq 0,3 \mu\text{m}$, $0,3 \mu\text{m} < d \leq 1,0 \mu\text{m}$, y

$1,0 \mu\text{m} < d \leq 2,5 \mu\text{m}$; la mayoría de las partículas estaban en los dos contenedores más pequeños. Sobre el recipiente (Loc 1 y Loc 2), partícula

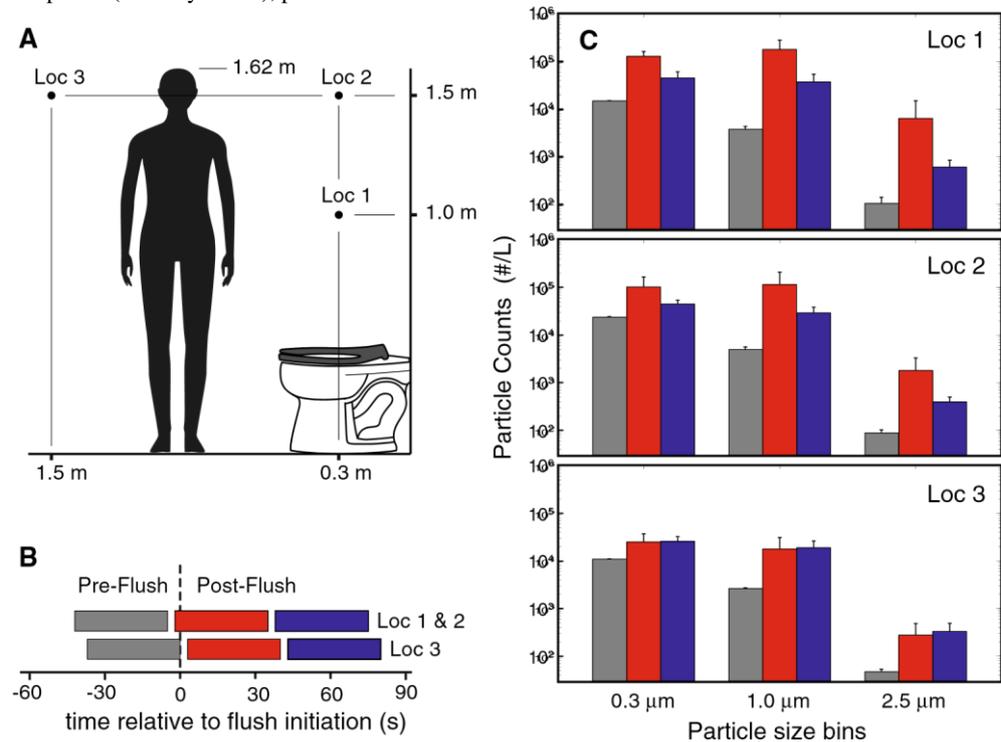


Figura 5. Tamaño y número de partículas de aerosol expulsadas. **(A)** Se utiliza un contador de partículas en suspensión para tomar mediciones de partículas en los lugares indicados; Las ubicaciones 1 y 2 también se muestran como referencia en la Fig. 3. La figura humana proporcionada para la escala es de 1,62 m de altura, correspondiente a la altura promedio de una mujer adulta estadounidense. **(B)** Los recuentos de partículas se promedian durante los intervalos indicados de 37 s, uno antes del lavado (barras grises) y dos posteriores al lavado (barras rojas y azules). **(C)** Los resultados del contador de partículas se agrupan en tres categorías de

tamaño para cada una de las tres ubicaciones. Las barras de histograma representan el promedio de cinco réplicas, y las bandejas de tamaño enumeradas corresponden a

$0,2 \mu\text{m} \leq d \leq 0,3 \mu\text{m}$, $0,3 \mu\text{m} < d \leq 1,0 \mu\text{m}$ y $1,0 \mu\text{m} < d \leq 2,5 \mu\text{m}$

Los recuentos aumentaron aproximadamente en un orden de magnitud o más dentro de los 30 s del inicio de la descarga, y los recuentos disminuyeron después. Más lejos (Loc 3), el aumento del recuento de partículas es más modesto, pero permanece constante durante los dos intervalos de tiempo posteriores a la descarga.

Discusión

Nuestros resultados demuestran el crecimiento sorprendentemente energético y rápido de las columnas de aerosol de un inodoro comercial y resaltan la naturaleza caótica de la cinemática de fluidos que transportan las partículas. La rápida propagación del penacho se ve facilitada por un fuerte chorro inestable que se inclina hacia arriba y hacia atrás hacia la pared posterior; este chorro es visible en el primer fotograma de Figs. 2 y 4, y particularmente en la película S1. Los futuros diseños de inodoros que reducen la fuerza de este chorro, o alteran su trayectoria ascendente, podrían reducir la cantidad de aerosoles expulsados.

Para nuestros experimentos, el recipiente contenía solo agua del grifo sin sólidos presentes. La presencia de materia fecal y papel higiénico podría alterar la dinámica de la pluma de maneras impredecibles. Los experimentos se realizan en el centro de un espacio de laboratorio ventilado de 300 m³ sin particiones, por lo que los aerosoles medidos probablemente se dispersan y diluyen más rápidamente de lo que se observaría en un baño público típico o inodoro.

Si bien las mediciones tradicionales de contador de partículas en el aire como las que se muestran en la Fig. 5 son efectivas para cuantificar el tamaño y la cantidad de partículas expulsadas y, por lo tanto, son críticas para cuantificar la posible exposición a patógenos, proporcionan poca comprensión de cómo las partículas salen del tazón, qué caminos siguen y cómo llegan a las ubicaciones de conteo de partículas. Las metodologías que utilizamos para visualizar y cuantificar la estructura de la pluma podrían proporcionar una base para mitigar el riesgo de propagación de patógenos, facilitando estudios comparativos de nuevos ciclos de válvulas de descarga y geometrías de tazón, y para cuantificar las trayectorias de las partículas y los tiempos de vuelo en el contexto de la exposición humana y las pruebas de estrategias de desinfección.

Métodos

Equipo de inodoro. Para medir las columnas de aerosol del inodoro en nuestro laboratorio, utilizamos un inodoro comercial con una válvula común de 1.6 galones por fluxómetro de descarga, típica de las que se encuentran en América del Norte en los baños públicos. El inodoro está equipado con un asiento comercial en la posición "abajo" que está pintado de negro plano para minimizar los reflejos del láser. No hay tapa instalada en el inodoro, consistente con la mayoría de las instalaciones de inodoros comerciales. La parte trasera del inodoro colinda con una pared sólida; La válvula del fluxómetro y la plomería asociada están detrás de esta pared.

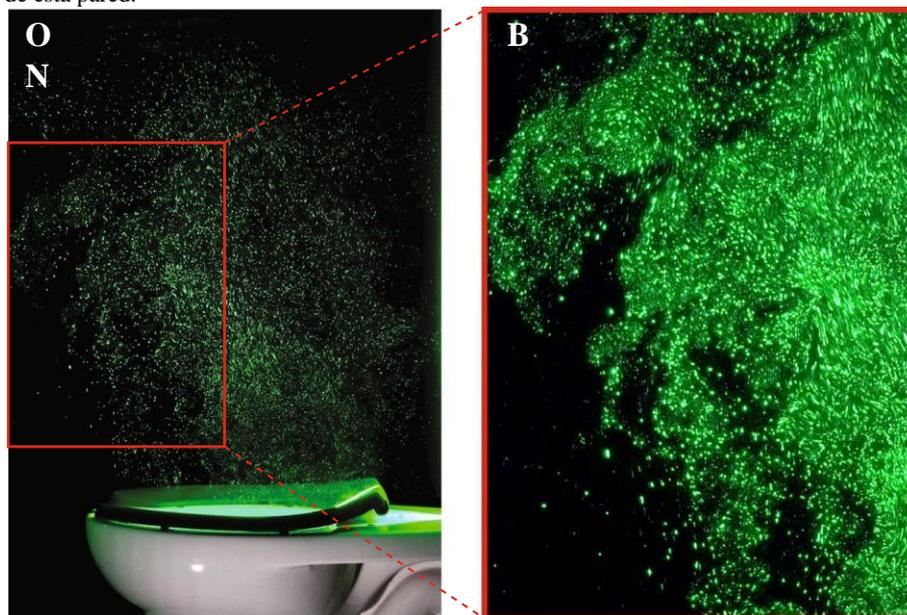


Figura 6. Las partículas fotografiadas son buenos indicadores de la envoltura del penacho. (A) El tercer panel del penacho ($t = 6.4$ s) de la Fig. 2 se reproduce aquí como referencia, mostrando la ubicación y el

movimiento de partículas más grandes. **(B)** Imagen ampliada de la región indicada por el recuadro rojo en la parte A, postprocesada para aumentar la exposición y disminuir el contraste. Esto hace visible la luz más tenue de partículas más pequeñas, y demuestra que las partículas más pequeñas (resplandor verde) están bien predichas por las ubicaciones de partículas más grandes (fotografiadas como puntos discretos de luz). También son visibles en la parte inferior izquierda varias gotas grandes que siguen trayectorias balísticas y están fuera de la envoltura de la pluma de aerosol.

Una bomba eléctrica llena un tanque de agua de 14 galones con un sistema interno de vejiga de aire precargado; La bomba está configurada para apagarse cuando la presión del tanque alcanza los 60 psi, momento en el cual el inodoro está listo para ser descargado (la válvula del fluxómetro tiene una presión de suministro recomendada entre 10 y 100 psi). El tanque se conecta a la entrada del fluxómetro, y el ciclo de descarga se inicia a través de un botón remoto que activa un solenoide en la válvula del fluxómetro. Durante la descarga, la presión en el tanque cae de tal manera que la presión de suministro a $t = 7.5$ s (paneles finales en Figs. 3 y 4) ha bajado a 45 psi. Después del ciclo de descarga y la adquisición de datos, la bomba se activa para restablecer la presión del tanque a 60 psi. Los experimentos se realizan en un espacio de laboratorio abierto, y confiamos en el sistema HVAC del laboratorio para ventilar las partículas generadas al ras entre los experimentos.

Obtención de imágenes con láser continuo. Para capturar imágenes en color (Figs. 2 y 6) y video (Película S1) de la pluma de aerosol, utilizamos un láser de onda continua (CW) (IPG Photonics GLR-50, longitud de onda de 532 nm, operando a un nivel de potencia de 11 W) para iluminar un plano vertical alineado con el eje de simetría del inodoro. La óptica de la hoja de luz extiende el haz en una hoja con una cintura de haz de 2 mm centrada en el campo de visión (FOV). La dispersión Mie de la luz láser por partículas de aerosol se visualiza con una cámara Sony (a6300) equipada con una lente Sony 50 mm f/1.8. Las imágenes fijas se adquieren con una velocidad de obturación de 1/50 s a una resolución de 4000 x 6000 píxeles, y los videos se adquieren a 60 fps con una velocidad de obturación de 1/60 s y una resolución de 1920 x 1080 píxeles.

Si bien nuestra técnica de imagen es más efectiva para obtener imágenes de la ubicación y el movimiento de aerosoles más grandes (5-10 μ m) que dispersan más luz, el procesamiento posterior de las imágenes para aumentar el brillo y reducir el contraste (Fig. 6) demuestra que también es capaz de capturar luz más tenue dispersada por aerosoles más pequeños, y que las partículas más pequeñas se mueven dentro de la misma envoltura que las más grandes.

Obtención de imágenes con láser pulsado. Para cuantificar la evolución espaciotemporal y la cinemática de las plumas de aerosol inducidas por el lavado (Figs. 3, 4) utilizamos un láser Nd:YAG de doble cavidad y doble pulso (Quantel EverGreen 200, longitud de onda de 532 nm, que funciona a 200 mJ/pulso). El láser emite pares de pulsos ($dt = 2,25$ ms), cada uno con un ancho de pulso de 5 ns. Los pares de pulsos se repiten a 15 Hz. Al igual que con el láser CW, utilizamos la óptica de la hoja para crear una hoja de luz de 2 mm que abarca el FOV. Las imágenes se adquieren utilizando dos cámaras sCMOS (LaVision Imager sCMOS; monocromo de 16 bits, resolución de 2160 x 2560 píxeles) equipadas con lentes Nikkor 50 mm f/1.2. Las cámaras están apiladas verticalmente (Fig. 1C), con el eje largo de los sensores orientados verticalmente y apuntando de tal manera que hay una superposición del 15% en el campo de visión de cada cámara; esto permite que las imágenes individuales se unan para proporcionar un campo de visión combinado (0,57 m de ancho x 1,23 m de alto) que es lo suficientemente grande como para capturar toda la pluma del inodoro durante los primeros 8 s después del inicio de la descarga, con una resolución espacial de 260 μ m / píxel. La estrecha profundidad de campo asociada con la apertura de la lente f / 1.2, junto con la hoja de luz delgada y los pulsos de iluminación de 5 ns, permite obtener imágenes selectivas de la luz dispersa de los aerosoles en hoja para el cálculo posterior de las envolturas de penacho y las velocidades de los aerosoles.

Se utiliza un gran objetivo de calibración espacial que consiste en una cuadrícula cuadrada de alto contraste que cubre todo el campo de visión del conjunto de cámaras combinadas (i) para calcular el aumento óptico del sistema de imágenes, (ii) para hacer referencia a los datos de la imagen a la geometría del inodoro en el espacio físico, y (iii) para mapear cada cámara a un punto común en el espacio físico, permitiendo la unión precisa de los dos FOV individuales en una sola imagen de datos que cubre el total de FOV resuelto. La geometría conocida de la rejilla en la placa de calibración también se utiliza para crear un agujero de alfiler m odel³² para deformar las imágenes individuales de la cámara, corrigiendo posibles distorsiones de imagen asociadas con pequeños ángulos de imagen oblicuos y / o distorsiones de la lente. El modelo estenopeico es apropiado para nuestra configuración de imágenes planas con acceso óptico sin interrupciones a través del aire. La incertidumbre estimada en los datos de imagen reconstruidos/combinados es inferior a 0,5 px.

Se adquieren pares de imágenes muy espaciadas (2,25 ms de separación) de cada cámara a una velocidad de 15 Hz durante los eventos de enrasado. Las imágenes se utilizan para cuantificar la evolución espaciotemporal de la envoltura del penacho (Fig. 3) y para calcular las velocidades de los aerosoles (Fig. 4) Uso de la imagen de partículas V elocumetría^{30, 31, 33}. Todas las secuencias de temporización láser y de cámara y la adquisición, almacenamiento y procesamiento de imágenes asociadas se logran en una computadora de alto rendimiento que ejecuta el software DaVis 10.2 (LaVision GmbH).

Resolución del sistema de imágenes. Para la resolución de 260 μ m/píxel de nuestro sistema óptico (descrito anteriormente), las partículas de aerosol individuales (0,1 μ m - 10 μ m) son solo una pequeña fracción del tamaño de imagen de un píxel individual. Sin embargo, para nuestro sistema óptico de bajo aumento, la

difracción de apertura^{34, 35} hace que el tamaño de la imagen de estas partículas de aerosol aumente al menos a un mínimo teórico de aproximadamente 0,25 píxeles, independientemente de su tamaño físico. Luego, las aberraciones de la lente amplían aún más el tamaño mínimo teórico de la difracción hasta en un orden de magnitud, particularmente para sistemas con grandes distancias de trabajo (> 1 m) como es el caso del nuestro (≈ 2 m). La digitalización y cuantización de la señal de imagen de partículas continua en una cuadrícula de píxeles discreta también puede ampliar el tamaño de partícula grabada. Por lo tanto, se espera que las partículas de aerosol individuales produzcan puntos de imagen de varios píxeles o más de diámetro. Además, dado que el tamaño real de las partículas de aerosol individuales es pequeño en comparación con la resolución de píxeles de nuestro sistema, es razonable esperar que la luz recogida por un solo píxel se deba a una gran cantidad de partículas, todas las cuales contribuyen a la intensidad de la imagen en ese punto. De acuerdo con estos argumentos, nuestras imágenes grabadas exhiben imágenes de partículas fuertes con diámetros típicos d_D de 1.5 a 4 píxeles (consulte la sección PIV a continuación). El resultado es que las fuertes imágenes multipíxel de partículas (o incluso un gran número de partículas) son muy adecuadas para el mapeo instantáneo de la envoltura espacial de la pluma de aerosol (Fig. 3) y calcular las velocidades de los aerosoles (Fig. 4). Sin embargo, las mismas propiedades ópticas que hacen que el sistema óptico sea adecuado para estas tareas impiden su uso para contar y dimensionar aerosoles individuales. Por esta razón, el conteo y el tamaño se realizan por separado con el contador de partículas en el aire (Fig. 5).

Generación de envolturas de penacho. La extensión espacial de la envoltura del penacho de aerosol se calcula a partir de datos de imagen utilizando un algoritmo simple de procesamiento de imágenes de dos pasos comúnmente utilizado en aplicaciones PIV para delinear regiones sembradas y no sembradas. Primero, se aplica un filtro máximo deslizante para rellenar regiones de baja intensidad de píxeles entre imágenes de partículas individuales. Con la selección adecuada de la longitud del filtro, el efecto es aumentar y homogeneizar las intensidades de píxeles dentro de la envoltura del penacho con un efecto mínimo en las regiones fuera del penacho. Luego se utiliza un umbral de intensidad global para identificar las regiones dentro de la pluma frente a las regiones fuera de la pluma (ya que las intensidades de píxeles más altas corresponden más notablemente a la presencia de aerosoles de la pluma, así como al tamaño y la densidad local de los aerosoles). Si bien los grandes cambios en los parámetros de ajuste producen artefactos locales (por ejemplo, vacíos internos injustificados o suavizado perimetral excesivo), la forma general y la extensión espacial de la pluma son generalmente robustas para una variedad de parámetros de sintonización.

Determinación de campos de velocidad con PIV. La velocimetría de imagen de partículas (PIV) se utiliza para calcular las velocidades de los aerosoles dentro de la envoltura de la pluma detectada³³. Aquí, cada cámara sCMOS adquiere datos de imagen de doble cuadro, donde se adquieren pares de imágenes a la frecuencia de imagen de 15 Hz, lo que establece la resolución temporal de las mediciones de velocidad. El par de imágenes en sí está separado por un corto tiempo dt , la escala de tiempo de correlación cruzada del análisis PIV. Un dt casi óptimo da como resultado desplazamientos máximos de imagen de partículas de aproximadamente 8-10 px para una subventana de correlación de 32 px (la "regla 1/4" o $f/37$) basada en el aumento óptico del sistema de imágenes y las velocidades físicas asociadas con las partículas. Aquí, un dt de 2.25 ms (establecido por el retardo de tiempo entre pares de pulsos láser) es efectivo para resolver las altas velocidades (1 - 2 m/s) asociadas con el fuerte chorro vertical que se desarrolla temprano en el ciclo de descarga (Fig. 3) y minimizar la incertidumbre de velocidad asociada.

El nivel de señal de las partículas en relación con el fondo (recuento de intensidad), la densidad de siembra de partículas (partículas por píxel) y el diámetro de la imagen de partículas (píxeles) influyen fuertemente en el rango de velocidad dinámica (DVR) ^{resuelto}³⁶. Nuestra configuración de imágenes produce niveles de señal (sustracción posterior al fondo) de 8-10 bits, lo que garantiza una buena fidelidad de partículas y fuertes correlaciones de intensidad. Las densidades de siembra se establecen por la densidad local de las nubes de aerosol que evoluciona espaciotemporalmente (y las limitaciones de la resolución del sistema de imágenes descritas anteriormente) y típicamente oscilan entre 0.001 y 0.02 ppp dentro de la envoltura de la pluma. Estas densidades abarcan el valor comúnmente aceptado de 0,01 ppp, suficiente para proporcionar fuertes picos de correlación cruzada y niveles de incertidumbre aceptables. Finalmente, los diámetros típicos de imagen de partículas de $d_D = 1.5$ a 4 px son suficientes para aliviar los efectos de "bloqueo de picos" (desplazamientos de píxeles enteros) cuando se implementan técnicas de correlación de desplazamiento de ventana como se describe en el *below*³⁸. Los conjuntos de imágenes se procesan primero previamente para eliminar los artefactos de fondo y mejorar la fidelidad de las partículas. Los campos de desplazamiento de aerosoles (velocidad) se calculan utilizando técnicas modernas de correlación digital e interrogación que se describen a continuación. El preprocesamiento de imágenes, los análisis de correlación PIV y el postprocesamiento vectorial se logran en una computadora de alto rendimiento que ejecuta el software DaVis 10.2 (LaVision GmbH).

Los campos de velocidad de aerosol (Fig. 4) se calculan a partir de pares de imágenes a través de la correlación cruzada de patrones de intensidad dentro de pequeñas subventanas de interrogación dentro de las envolturas de penacho detectadas. Las mejores prácticas se utilizan para maximizar el DVR de medición, incluidos esquemas iterativos de múltiples pasadas con subventanas superpuestas (50% - 70%) de tamaños decrecientes (96 px - 32 px), con forma adaptativa a las condiciones de flujo local. Los campos vectoriales resultantes se procesan posteriormente utilizando una relación de picos de correlación mínima impuesta (1.4) para detectar valores atípicos y vectores ruidosos, que se descartan. La relación de picos es la relación entre el pico de correlación más fuerte y el siguiente más fuerte en una ventana de interrogación dada, y se correlaciona bien con el error de medición estimado³⁹, proporcionando un proxy para el DVR efectivo de la medición. Finalmente, cualquier hueco en los campos vectoriales postprocesados se rellena utilizando interpolación

espacial y se suaviza de forma no lineal para preservar los gradientes locales. El campo vectorial resultante está llenando el espacio dentro de la envoltura del penacho con una resolución espacial de 2,08 mm/vector. Las incertidumbres típicas de la velocidad local máxima son inferiores al 5% de la magnitud de la velocidad local y rara vez se acercan al 10% (estimadas utilizando estadísticas de correlación 40). Las relaciones de pico correspondientes que generalmente exceden 10 en toda la envoltura del penacho confirman el alto DVR y la buena fidelidad de las mediciones de velocidad del aerosol.

En las aplicaciones PIV tradicionales, las partículas de bajo número de Stokes se introducen en el flujo como trazadores pasivos ("partículas de siembra"), mientras que aquí usamos los aerosoles mismos para servir como trazadores naturales. Los números de Stokes (St = relación entre las escalas de tiempo inercial de partículas y las escalas de tiempo de advección del flujo) de partículas de 1 micra en las porciones de mayor velocidad de la pluma (alrededor de 1 m/s) son $O(1)$. Mientras que los aerosoles más grandes de alrededor de 10 micras exhiben una mayor *cantidad de St* en estas regiones, las velocidades predominantemente verticales asociadas con el chorro fuerte sugieren que las nubes de aerosol de los tamaños de interés aquí (0.1 - 10 micras) se comportan aceptablemente como trazadores pasivos. La implicación de todo lo anterior para la velocidad basada en PIV es la siguiente: los vectores de velocidad individuales representan la velocidad media promediada sobre pequeñas nubes de aerosoles (produciendo imágenes de partículas individuales en el sensor) y sobre colecciones de nubes de aerosoles discretas (produciendo todas las imágenes de partículas contenidas en una subventana de interrogación PIV).

Mediciones de sonido. Como métrica para la duración e intensidad de la descarga, adquirimos niveles de presión sonora con ponderación de frecuencia dB (A) utilizando un teléfono inteligente Google Pixel 3 con una aplicación móvil precalibrada (Decibel X, SkyPaw Co., Ltd.). Se registran veinte réplicas de un intervalo de 12 segundos que rodea el ciclo de descarga, donde $t = 0$ corresponde a cuando se presiona el botón de descarga. El perfil de presión acústica promedio que se muestra en la Fig. 1D se suaviza con una spline B cúbica, reduciendo el muestreo en un factor de 10 para capturar la forma característica. Se aplicó una segunda spline con el número original de muestras para el alisado.

Conteo de partículas en el aire. El conteo de partículas se realiza con un contador de partículas en el aire portátil (Particle Measuring Systems HandiLaz Mini II) suspendido en las ubicaciones que se muestran en la Fig. 5A. El contador es sensible a partículas que varían en tamaño de $0,2 \mu\text{m}$ (d_{50}) a $10 \mu\text{m}$, y genera recuentos en 60 contenedores discretos espaciados logarítmicamente en todo este rango. Para mayor claridad, agrupamos los recuentos de partículas del instrumento en los tres contenedores más amplios que se muestran en la Fig. 5; No se muestran tamaños de partícula mayores de $2,5 \mu\text{m}$, ya que estos recuentos fueron cercanos a cero. El contador ingiere 2,83 litros/min, y la boquilla está orientada hacia abajo, ya que el penacho generalmente se acercaba desde abajo. Para cada ubicación, las partículas se cuentan en tres intervalos de 37 s (Fig. 5B). Cada intervalo consta de cinco muestras 5s separadas por períodos de 3 s cuando los datos se escriben en el almacenamiento. El tiempo de los intervalos en la ubicación 3 difiere ligeramente de los de las ubicaciones 1 y 2 debido a las diferencias de fase en el muestreo discreto del instrumento. Se adquieren cinco réplicas, con desviaciones estándar promedio y aritméticas reportadas en la Fig. 5C.

Disponibilidad de datos

Los conjuntos de datos generados y / o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a petición razonable.

Recibido: 21 de septiembre de 2022; Aprobado: 18 Noviembre 2022

Published online: 08 December 2022

Referencias

1. H. Darlow, W. Bale, Riesgos infecciosos de los inodoros. *Lancet* pp. 1196–1200 (1959).
2. W. Bound, R. Atkinson, Aerosol bacteriano de inodoros. Una comparación de dos tipos de sartén y dos tipos de cobertura. *Lancet* pp. 1369–1370 (1966).
3. Gerba, C. P., Wallis, C. & Melnick, J. L. Peligros microbiológicos de los inodoros domésticos: producción de gotitas y el destino de los organismos residuales. *Appl. Microbiol.* **30**, 229 (1975).
4. Barker, J. & Jones, M. La posible propagación de la infección causada por la contaminación por aerosol de las superficies después de descargar un inodoro doméstico. *J. Appl. Microbiol.* **99**, 339 (2005).
5. Schreck, J. H., Lashaki, M. J., Hashemi, J., Dhanak, M. & Verma, S. Generación de aerosoles en baños públicos. *Phys. Fluidos* **33**, 033320 (2021).
6. Johnson, D. L., Mead, K. R., Lynch, R. A. & Hirst, D. V. Lifting the lid on toilet plume aerosol: a literature review with suggestions for future research. *Am. J. Infectar. Control* **41**, 254 (2013).
7. Abney, S., Bright, K., McKinney, J., Ijaz, M. K. & Gerba, C. Toilet hygiene—review and research needs. *J. Appl. Microbiol.* **131**, 2705 (2021).
8. Bourouiba, L. La dinámica de fluidos de la transmisión de enfermedades. *Annu. Rev. Fluid Mech.* **53**, 473 (2021).
9. Vardoulakis, S., Espinoza Oyarce, D. A., & Donner, E. Transmisión de COVID-19 y otras enfermedades infecciosas en baños públicos: una revisión sistemática. *Ciencia. Entorno total.* **803**, 149932 (2022).

10. Best, E., Sandoe, J. & Wilcox, M. Potencial para la aerosolización de *Clostridium difficile* después de la descarga de inodoros: el papel de las tapas de los inodoros en la reducción del riesgo de contaminación ambiental. *J. Hosp. Infectar.* **80**, 1 (2012).
11. Knowlton, S. D. *et al.*, concentraciones de bioaerosol generadas a partir de la descarga del inodoro en un entorno hospitalario de atención al paciente. *Antimicrobiano. Resistir. Infectar. Control* **7** (2018).
12. Johnson, D. L. *et al.* Persistencia de la contaminación del agua del tazón durante las descargas secuenciales de inodoros contaminados. *J. Entorno. Salud* **80**, 34 (2017).
13. Aithinne, K. A., Cooper, C. W., Lynch, R. A. & Johnson, D. L. Tasa de generación de aerosoles de penacho de inodoro y contaminación ambiental después de la inoculación de agua de tazón con esporas de *Clostridium difficile*. *Am. J. Infectar. Control* **47**, 515 (2019).
14. Johnson, D., Lynch, R., Marshall, C., Mead, K. & Hirst, D. Generación de aerosoles por inodoros modernos. *Aerosol Sci. Tecnología.* **47**, 1047 (2013).
15. Li, Y., Wang, J. X. & Chen, X. ¿Puede un inodoro promover la transmisión del virus? Desde una perspectiva de dinámica de fluidos. *Phys. Fluids* **32**, 065107 (2020).
16. Lee, M. C. J., & Tham, K. W. Los baños públicos con ventilación insuficiente presentan un alto riesgo de infección cruzada. *Ciencia. Representante.* **11** (2021).
17. Boles, C., Brown, G. & Nonnenmann, M. Determinación de la concentración de aerosol de norovirus murino durante la descarga del inodoro. *Ciencia. Representante.* **11**, 1 (2021).
18. Lai, A. C. K., Tan, T. F., Li, W. S. & Ip, D. K. M. Fuerza de emisión de patógenos en el aire durante la descarga del inodoro. *Aire interior* **28**, 73 (2018).
19. Cai, C., Kim, P., Connor, T. H., Liu, Y. & Floyd, E. L. Reducción de las partículas generadas por la descarga de inodoros institucionales. *J. Ocupar. Entorno. Hyg.* **19**, 318 (2022).
20. Ali, W., Yang, Y.-F., Gong, L., Yan, C. & Cui, B.-B. Características de emisión y evaluación cuantitativa del riesgo para la salud de los bioaerosoles en un inodoro interior después de la descarga en diversos escenarios de ventilación. *Build. Entorno.* **207**, 108463 (2022).
21. Morawska, L. *et al.* Aerosoles de interior: desde la exposición personal hasta la evaluación de riesgos. *Aire interior* **23**, 462 (2013).
22. Couch, R. B., Cate, T. R., Douglas, R. G. Jr., Gerone, P. J. & Knight, V. Efecto de la vía de inoculación en la enfermedad viral respiratoria experimental en voluntarios y evidencia de transmisión aérea. *Bacteriol. Rev.* **30**, 517 (1966).
23. Dancer, S. J., Li, Y., Hart, A., Tang, J. W. & Jones, D. L. ¿Cuál es el riesgo de contraer SARS-cov-2 por el uso de baños públicos?. *Ciencia. Entorno total.* **792**, 148341 (2021).
24. Kramer, A., & Assadian, O. Survival of microorganisms on inanimate surfaces, in *Use of biocidal surfaces for reduction of healthcare acquired infections* (Springer, 2014), pp. 7–26.
25. van Doremalen, N. *et al.* Estabilidad en aerosol y de la superficie del SARS-Cov-2 en comparación con el SARS-Cov-1. *N. Engl. J. Med.* **382**, 1564 (2020).
26. Pitou, A. K. & Julian, T. R. Community transmission of SARS-Cov-2 by surfaces: risks and risk reduction strategies. *Entorno. Tecnología. Vamos.* **8**, 263 (2021).
27. Li, P., Zhang, T. T. & Zhang, Y. Medición del flujo generado por lavado y aerosoles en el baño de aviones comerciales. *Entorno. Ciencia. Tecnología. Vamos.* **214**, 108948 (2022).
28. Kitagawa, H. *et al.* Estudio piloto sobre la eficacia de la descontaminación de un dispositivo de desinfección ultravioleta de 222 nm instalado (Care222), con sensor de movimiento, en un baño compartido. *Fotodiagnóstico Photodyn. Ther.* **34**, 102334 (2021).
29. Lai, A. C. K. & Nunayon, S. S. Un nuevo sistema UVC-LED para la desinfección de patógenos generados por la descarga de inodoros. *Interior Air* **31**, 324 (2021).
30. VanSciver, M., Miller, S. & Hertzberg, J. Velocimetría de imagen de partículas de la tos humana. *Aerosol Sci. Tecnología.* **45**, 415 (2011).
31. Westerweel, J., Elsinga, G. E. & Adrian, R. J. Velocimetría de imagen de partículas para flujos complejos y turbulentos. *Annu. Rev. Mech. fluido.* **45**, 409 (2013).
32. Wieneke, B. Stereo-PIV usando autocalibración en imágenes de partículas. *Exp. Fluidos* **39**, 267 (2005).
33. Raffel, M., Willert, C. E., & Kompenhans, J. *Particle image velocimetry: a practical guide*, vol. 2 (Springer, 1998).
34. Olsen, M. & Adrian, R. Efectos desenfocados en la visibilidad y correlación de imágenes de partículas en velocimetría de imágenes de partículas microscópicas. *Exp. Fluidos* **29**, S166 (2000).
35. Kähler, C. J., Scharnowski, S. & Cierpka, C. Sobre el límite de resolución de la velocimetría de imágenes de partículas digitales. *Exp. Fluidos* **52**, 1629 (2012).
36. Adrian, R. Rangos dinámicos de velocidad y resolución espacial de la velocimetría de imágenes de partículas. *Meas. Ciencia. Tecnología.* **8**, 1393 (1997).
37. Keane, R. D., & Adrian, R. J. Optimización de velocímetros de imagen de partículas. Yo. Sistemas de doble pulso. *Meas. Ciencia. Tecnología.* **1**, 1202 (1990).
38. Gui, L. & Wereley, S. Una técnica de desplazamiento continuo de ventana basada en correlación para reducir el efecto de bloqueo de picos en la evaluación digital de imágenes PIV. *Exp. Fluids* **32**, 506 (2002).
39. Charonko, J. J. & Vlachos, P. P. Estimación de límites de incertidumbre para mediciones de velocimetría de imágenes de partículas individuales a partir de la relación de picos de correlación cruzada. *Meas. Ciencia. Tecnología.* **24**, 065301 (2013).
40. Wieneke, B. Cuantificación de incertidumbre PIV a partir de estadísticas de correlación. *Meas. Ciencia. Tecnología.* **26**, 074002 (2015).

Agradecimientos

A. Adams ayudó con los experimentos de visualización de penachos. Agradecemos a Cresten Mansfeldt por proporcionar comentarios sobre un borrador de manuscrito.

Contribuciones del autor

J.C. y K.L. conceptualizaron el estudio; A.T., J.C. y M.H. contribuyeron con metodologías experimentales; J.C., A.T., M.H., L.L y A.P. adquirieron datos experimentales; A.T. analizó los datos; J.C. y A.T. escribieron el borrador original. Todos los autores revisaron el manuscrito.

Conflictos de intereses

Los autores declaran que no hay intereses contrapuestos.

Información adicional

Información complementaria La versión en línea contiene material complementario disponible en <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24686-5>.

La correspondencia y las solicitudes de materiales deben dirigirse a J.P.C.

La información sobre reimpresiones y permisos está disponible en www.nature.com/reprints.

Nota del editor Springer Nature permanece neutral con respecto a las reclamaciones jurisdiccionales en los mapas publicados y las afiliaciones institucionales.



Acceso abierto Este artículo está bajo una licencia Creative Commons Attribution 4.0 International

Licencia, que permite el uso, intercambio, adaptación, distribución y reproducción en cualquier medio o , siempre y cuando otorgue el crédito apropiado al autor original (s) y la fuente, proporcione un enlace a la licencia Creative Commons e indique si se realizaron cambios. Las imágenes u otro material de terceros en este artículo se incluyen en la licencia Creative Commons del artículo, a menos que se indique lo contrario en una línea de crédito para el material. Si el material no está incluido en la licencia Creative Commons del artículo y su uso previsto no está permitido por la regulación legal o excede el uso permitido, deberá obtener permiso directamente del titular de los derechos de autor. Para ver una copia de esta licencia, visite <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

© El autor (es) 2022