



Use of filters and special materials in classrooms, based on the assessment of the presence of CO₂ as an indicator of Covid reduction and control in closed spaces

Uso de filtros y materiales especiales en aulas, basado en la evaluación de presencia de CO₂ como indicador de reducción y control de Covid en espacios cerrados

MARÍA CATALINA BOHORQUEZ

Architect. Universidad Politécnica de Madrid, Spain.
catalina.bohorquez@alumnos.upm.es

JOSE LUIS CHAPA

Architect. Universidad Politécnica de Madrid, Spain.
joseluis.chapa@alumnos.upm.es

DARÍO LÓPEZ

Architect. Universidad Politécnica de Madrid, Spain.
dario.lopez@alumnos.upm.es

MARÍA ALEJANDRA MANRIQUE

Architect. Universidad Politécnica de Madrid, Spain.
ma.manrique@alumnos.upm.es

CRISTIAN MIRANDA

Architect. Universidad Politécnica de Madrid, Spain.
cristian.miranda@alumnos.upm.es

RICARDO TENDERO CABALLERO

E.T.S. Edificación. Universidad Politécnica de Madrid.
ricardo.tendero@upm.es

The research aims to analyze how the monitoring of CO₂ levels can be used as an environmental pollution control strategy and mitigate the spread of diseases such as COVID-19 in closed spaces. In this article, a classroom located in the School of Building of the Polytechnic University of Madrid will be taken as the object of the analysis to collect data on the fluctuations of CO₂ levels in different ventilation scenarios where the occupation of the classroom, speed of air entering through windows or doors, and type of activity being carried out. According to the results obtained, different mitigation alternatives are proposed to maintain CO₂ in the ranges recommended by recognized institutions and consequently improve air quality, such as the incorporation of nanotechnology materials and HEPA filters in the ventilation of rooms.

Monitoring of CO₂, COVID-19, ventilation, air quality, nanotechnology, HEPA filters

La investigación tiene como objetivo analizar cómo la monitorización de los niveles de CO₂ puede utilizarse como una estrategia de control de contaminación ambiental y atenuar la propagación de enfermedades tales como el COVID-19 en espacios cerrados. En el presente artículo se tomará, como objeto del análisis, un aula ubicada en la Escuela de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid para tomar datos de las fluctuaciones de los niveles de CO₂ en diferentes escenarios de ventilación donde se tomará en cuenta la ocupación del aula, velocidad del aire que ingresa por las ventanas o puertas y tipo de actividad que se está realizando. De acuerdo a los resultados obtenidos, se plantean diferentes alternativas de mitigación para mantener el CO₂ en los rangos recomendados por instituciones reconocidas y por consecuencia mejorar la calidad del aire, tales como la incorporación de materiales de nanotecnología y filtros HEPA en la ventilación de ambientes.

Monitorización de CO₂, COVID-19, ventilación, calidad de aire, nanotecnología, filtros HEPA.

1. INTRODUCCIÓN

Al revisar la bibliografía referente a la temática principal, se ha podido encontrar información sobre diferentes factores climáticos

que demuestran la necesidad de una correcta ventilación en los ambientes de uso público y privado. Entre ellos es importante resaltar condicionantes como la humedad ambiental, los niveles de CO₂ y otros factores contaminantes que afectan la calidad del aire en espacios cerrados [01].

1.1. HUMEDAD AMBIENTAL

La humedad ambiental es uno de los parámetros menos considerados como determinantes en el confort térmico, en comparación con la temperatura.

Las condiciones interiores de diseño establecidas por el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios – RITE mantienen que los valores ideales en los meses de verano deben estar entre los 23 hasta los 25 grados centígrados de temperatura y entre un 45% y 60% de humedad relativa. En los meses de invierno se considera que deben estar entre los 21 hasta los 23 grados centígrados de temperatura y entre 40% y 50% de humedad relativa.

En el libro *Bioaerosols handbook* [04] se afirma que, en ambientes interiores, el factor más influyente en los resultados de estudios aerobiológicos es la humedad relativa. La multiplicación o replicación de microbios está relacionada a condiciones acuosas y cuando ciertos microorganismos se depositan en una superficie húmeda, comienzan a crecer y a alimentarse de la superficie a la cual están adheridas. Por el contrario, mientras más baja está la humedad, los microorganismos pierden células de agua de manera más rápida y se deterioran. De acuerdo con el documento *Fungal fragments as indoor air biocontaminants* [18], los factores responsables del deterioro biológico de los microorganismos en estado aerosol son la deshidratación, rehidratación, radiación, ventilación, concentración de oxígeno y temperatura.

Se conoce que la humedad relativa bajo el 50% es usualmente letal para la mayoría de bacterias vegetativas.

1.2. FACTORES CONTAMINANTES

Los elementos imprescindibles dentro de los aspectos salubres de los habitantes en un entorno interior son los siguientes [01]:

Contaminantes biológicos: Virus, bacterias (presentes en aerosoles), polen, hongos, esporas de hongos, moho, escamas de piel, partes de insectos y excrementos de animales [04].

Contaminantes químicos: Benceno, dióxido de carbono, polvo, fibras minerales, gases, vapores y compuestos orgánicos volátiles (COV)

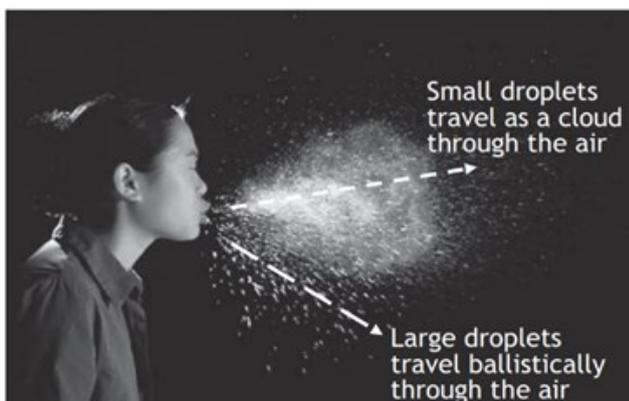


Fig. 1. Aerosoles presentes en el aire tras estornudo.

1.3. MONITORIZACIÓN DEL CO₂ COMO ESTRATEGIA PARA REDUCIR LA PROPAGACIÓN DEL CORONAVIRUS

Existe evidencia que los elevados niveles de CO₂ en edificaciones están relacionados directamente con la propagación de infecciones. Cada persona dentro de una edificación exhala aproximadamente 8 litros de aire por minuto, aire que ha estado en contacto directo con tejido de los pulmones. Junto con el CO₂, la exhalación contiene aerosoles que debido a su tamaño pueden flotar en el aire por un período largo de tiempo. [15] Estas gotículas pueden contener también cualquier tipo de virus presente en los pulmones. [17]

La velocidad en que los aerosoles bajan del aire es de aproximadamente un metro por hora y la actividad infecciosa por virus biológicos tienen una vida media de 3 horas en condiciones de laboratorio. Si una persona sana inhala estas gotículas contaminadas y el número de partículas del virus que contienen excede el mínimo de dosis infecciosa es muy fácil que se transmita una enfermedad. A pesar de ser difícil medir la carga viral directamente, los sensores son la forma ideal de controlar los niveles de CO₂ y, por lo tanto, evitar la acumulación de aire reutilizado en los espacios.

Con evidencia apuntando a que la transmisión por vía aérea es el factor principal de la propagación de los virus, la inferencia es que los niveles de CO₂ en las habitaciones y otros espacios cerrados pueden usarse como un indicador del riesgo de transmisión de COVID-19.

Un estudio de 2019 sobre un brote de tuberculosis en la Universidad de Taipei, Taiwán, proporciona evidencia detallada. Muchas de las habitaciones estaban mal ventiladas y alcanzaron niveles de CO₂ superiores a 3000 ppm y cuando los ingenieros bajaron los niveles a menos de 600 ppm, el brote se detuvo.

Traer este aire fresco del exterior diluye cualquier contaminante en un edificio, ya sea un virus o algo más, y reduce la exposición de cualquiera que esté adentro.

1.4. RANGOS RECOMENDADOS DE CO₂

El profesor John Wenger, director del Centro de Investigación de Química Atmosférica de la UCC, sugiere un objetivo de 1000 ppm si se utiliza el CO₂ como indicador de COVID-19 en las aulas. Cuando se supera este rango la cantidad de virus en el aire se acumula y tenemos mayor exposición al riesgo de una infección. Si una persona está en el interior de una habitación mal ventilada, corre un riesgo bastante alto, incluso si está alejado de las demás personas, por el movimiento propio del aire.

Los indicadores de concentración de CO₂ recomendados por cada país y cada institución educativa pueden ser relativamente subjetivos, sin embargo existen asociaciones que establecen ciertas pautas para los protocolos de ventilación. La norma ASHRAE 62-2001 "Proporciona pautas de calidad de aire que será aceptable para los ocupantes humanos, destinada a minimizar el potencial efecto adverso para la salud", recomendando niveles de CO₂ no mayores a 1100 ppm en espacios cerrados, comparado con el aire exterior aproximado de 400 ppm. Las recomendaciones pretenden indicar niveles adecuados de aire limpio de 15 A 20 CFM, por persona dentro de un aula. Por su parte, la REHVA, aconseja mantener un rango entre 800 ppm a 1000 ppm, como límite máximo admisible.

En consecuencia, una concentración menor a 1000 ppm es higiénica-

mente inofensiva. Una concentración entre 1000 y 2000 ppm es peligrosa y cualquier cosa por encima de ella es inaceptable. [15]

Si estamos en una habitación con varias personas, la medición de la concentración de CO₂ proporciona una medida referencial del porcentaje del aire que inhalamos ya ha sido exhalado por otras personas. El balance de masa muestra que una concentración de CO₂ de 1200 ppm significa que casi el 2% del aire de la habitación ya ha tenido contacto con los pulmones de otras personas al menos una vez. En este nivel, cada 50 respiraciones que una persona inhala contiene aire que ya ha sido exhalado. El riesgo de infección de coronavirus específico resultante es más complejo de cuantificar, ya que depende de varios factores que aún se están investigando intensamente en la actualidad, como por ejemplo, el tipo de actividad que se realiza dentro de cada ambiente.

A pesar de estas advertencias, está claro que la medición de CO₂ ofrece una solución rentable para clasificar el riesgo actual de aerosoles potencialmente infecciosos.

1.5. ESTRATEGIAS PARA REDUCIR EL RIESGO DE INFECCIÓN

Los espacios cerrados requieren unas consideraciones especiales para la mitigación de transmisión de virus e infecciones de tipo aerotransportado, entre las cuales se encuentra la evaluación de concentración de CO₂ para determinar la tasa de ventilación, ajustes en los sistemas de recirculación de aire [17] y el uso de materiales alternos que permitan mitigar riesgos para los ocupantes de los espacios [16].

En el caso específico del coronavirus, se han realizado diferentes estudios para la revisión de estrategias de ventilación e intercambio de aire, restricciones en ocupación y uso de sensores para monitorizar los índices de concentración de partículas en el ambiente. La REHVA, ha pedido la instalación en las escuelas de monitores de CO₂ con indicadores de semáforo por lo menos en las aulas donde la ventilación depende de la apertura de ventanas.[17]

Como medida preliminar en espacios donde no exista ventilación mecánica, se recomienda adaptar ventanas abatibles o corredizas con el fin de implementar protocolos de apertura en intervalos de 15 a 20 minutos por un periodo de 3 a 5 minutos para garantizar la ventilación de las aulas durante las clases y de forma permanente durante los descansos. En los casos donde exista ventilación mecánica, es recomendable implementar de igual forma estas prácticas.

1.6. IMPLEMENTACIÓN DEL SENSOR DE CO₂

Para seguir estas estrategias, los dispositivos de monitoreo de CO₂ deben estar conectados, por ejemplo, para activar alarmas cuando la concentración de CO₂ supera los umbrales del semáforo [16], incluso para enviar alarmas a las redes de gestión de edificios o teléfonos inteligentes a través de redes inalámbricas. Al enviar los valores medidos a un receptor o puerta de enlace para su posterior procesamiento, se pueden activar alarmas e iniciar la acción apropiada. Por ejemplo, es posible poner en marcha un sistema de ventilación de la habitación para reducir la concentración de CO₂.

Además, pueden combinarse fácilmente con otros dispositivos, como sensores de ocupación de habitaciones [17] y control de acceso, que son parte integral de las medidas contra la COVID-19.

2. METODOLOGÍA

Existen riesgos de contraer virus cuando los espacios no tienen la ventilación adecuada, por lo tanto es recomendable instalar sensores de CO₂ en las zonas donde se tenga ocupación temporal por más de una hora como lo son las aulas de clase.

Estos sensores cuentan con semáforos que indican los niveles de riesgo de acuerdo a la concentración en contextos normales, sin embargo, teniendo en cuenta las condiciones actuales, estos rangos se deben ajustar a 800 ppm como nivel alerta (naranja) y 1000 ppm como nivel máximo permitido (rojo).

Como caso de estudio, se realizaron experimentos teniendo en cuenta mediciones ambientales de humedad relativa, temperatura del aire y niveles de concentración de CO₂, mediante el uso de los siguientes equipos:

El Wöhler CDL 210 Logger se configuró para medidas en intervalos cada XX minutos. Los equipos se ubicaron a una altura aproximada de XX, perimetralmente cada XX como muestra el esquema.

2.1. CONDICIONES DEL ESPACIO A EVALUAR

El espacio a evaluar trata del aula Gráfica -"P1-G1" ubicada en la PLANTA 1. Debido a la cantidad de alumnos que demandan las asignaturas que se imparten en dicha aula (Alrededor de 55 alumnos), dispone de unas dimensiones bastante generosas (265 m²).

Esta aula cuenta con 10 ventanas abatibles, con dimensiones de hueco de 1,30 m. x 0,70 m. con dirección al **norte**.



Fig. 2. Área de estudio: Aula P1-G1 ETSEM UPM. Ubicación de sensores.

2.2. VELOCIDAD DEL VIENTO

Según las fuentes consultadas podemos apreciar que los vientos dominantes provienen de la dirección **Oeste Sur Oeste** durante la gran mayoría del año, debido a esto el aula a analizar no cuenta con la mejor disposición para el aprovechamiento de estos vientos.

2.3. PROTOCOLO DE MEDICIÓN

Condiciones del espacio a evaluar:

Área	265m ²
% Vanos en la envolvente	3,50%
Características de los vanos de la envolvente	18-25 años
Radio de ocupación	5.3 m ² /persona

Tabla 1. Condiciones del espacio estudiado

2.4. METODOLOGÍA DEL PROTOCOLO DE MEDICIÓN APLICADO

El espacio a evaluar trata de un espacio educativo localizado en la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid denominado aula **Gráfica P1-G1** ubicada en la Planta 1.

Las dimensiones de esta área son de 265 m², cuenta con 10 ventanas hacia el exterior, tipología abatibles, orientadas hacia el norte; cuyas dimensiones se detallan en la tabla **Tabla 2**.

Nombre de abertura y dimensión	Áreas individuales (m ²)	Número de unidades	Sumatoria e unidades en m ²	Sumatoria de unidades (puerta + única ventana en m ²)
Puerta (P) (1x2.10)	2.1	1	2.1	-
Ventana A (0.73x1.30)	0.94	1	0.94	3.04
Ventana B (0.73x1.30)	0.94	2	1.89	3.99
Ventana C (0.73x1.30)	0.94	3	2.84	4.94
Ventana D (0.73x1.30)	0.94	4	3.79	5.89
Ventana E (0.73x1.30)	0.94	5	4.74	6.84

Tabla 2. Dimensiones y áreas de aberturas individuales y en sumatoria

Se elige como escenario de medición una mañana de clases (08:30-12:30 hrs), de modo que la ocupación de la sala (alrededor de 55 personas) y el tiempo que permanecen al interior sean representativos para el efecto de esta toma de datos.

La medición realizada con cuatro sensores Wöhler CDL 210 Logger (A, B, C, D), los cuales se programaron para registrar datos cada 7 segundos, distribuidos en 4 sitios del salón de

clases donde se ha considerado el número de personas en determinado punto y cercanía a las aberturas de ventilación. Así también, se tiene presente en este protocolo, los elementos tanto variables como constantes en el proceso. Las constantes serán las condiciones del espacio como volumen y número de personas dentro del mismo, un promedio de 54; de otra mano, las variables están liderados principalmente por las fluctuaciones en la concentración de CO₂ ambiental, datos regentes para el incremento paulatino u obstrucción abrupta de las áreas de ventilación, sumatoria entre puerta única (P) y ventanas (A, B, C, D, E).

Con ello, los sensores marcan la cuantía de CO₂ junto a las horas y el tiempo donde la zona ha superado las 1000 ppm de gas, como el declive de dicha cuantía conforme las superficies de aireación se incrementan a lo largo del ensayo.

Para las aberturas de ventilación (puertas y ventanas) se han transformado sus dimensiones lineales a metros cuadrados, con finalidad de traducir en datos numéricos las áreas que no solo sirven para interpretarlas en el presente trabajo, sino también como números referente para investigaciones futuras. Ver **Tabla 2**.

En la **gráfica 1**, se visualiza el esquema básico del protocolo para la medición junto a los elementos a considerar. Desde arriba hasta abajo, están las variantes principales desde el nombre de la abertura, los metros cuadrados que posee, tanto el elemento individual o sumatoria del conjunto; datos establecidos por el grupo investigativo, luego se encuentra el nivel de CO₂ inicial más bajo, el cual varía entre picos y valles conforme se abren o cierran ventanas, y finalmente el tiempo en horas, el cual marca cronológicamente las concentraciones del dióxido de carbono.

Es importante remarcar que estos dos últimos factores (concentración de Co₂ y tiempo) son registrados por los sensores en los cuatro puntos del salón, para los cuales no existe riesgo de alteraciones por manipulación alguna.

Mientras en la línea horizontal superior se halla cada abertura mural por su nombre asignado, puerta (P) y ventanas (A, B, C, D y E), acompañadas por el número en metros cuadrados que representa su área individual, la puerta como caso único, y los grupos de sumatoria del área de puerta más una, tres o cinco ventanas que se abren tras alcanzar el máximo de concentración de CO₂ ambiental (1000 ppm aproximadamente) tras el punto de cierre total de aberturas marcado con X1, X2 y X3.

En este ejercicio desde el inicio se ha mantenido únicamente la puerta abierta (2.10 m²), pues al ser la única entrada al salón y evitar variaciones derivadas del ingreso o salida infrecuente de estudiantes durante la práctica.

Tras esta aclaración se manifiesta a breves rasgos como el protocolo establecido permite aumentar la superficie de ventilación periódicamente tras cada punto de cierre y alcance máximo de concentración de dióxido de carbono en el aula.

En este ejercicio, se han contabilizado diez ventanas batientes, no obstante, solo se han abierto cinco a lo largo de la medición ubicadas principalmente después del área donde los estudiantes usualmente ocupan como se muestra en la gráfica 1, pues se evidencia las molestias que los vientos y las temperaturas menos favorables durante el año ocasionan a quienes ocupan estos puestos al borde del salón.

La ruta de medidas empieza con un área de ventilación de (P) 2.10 m², y las cinco ventanas completamente cerradas en el punto X1, se llega aproximadamente a las 1000 ppm, número indicador para abrir junto a la puerta la ventana A (P+A) cuyas áreas suman 3.04 m².

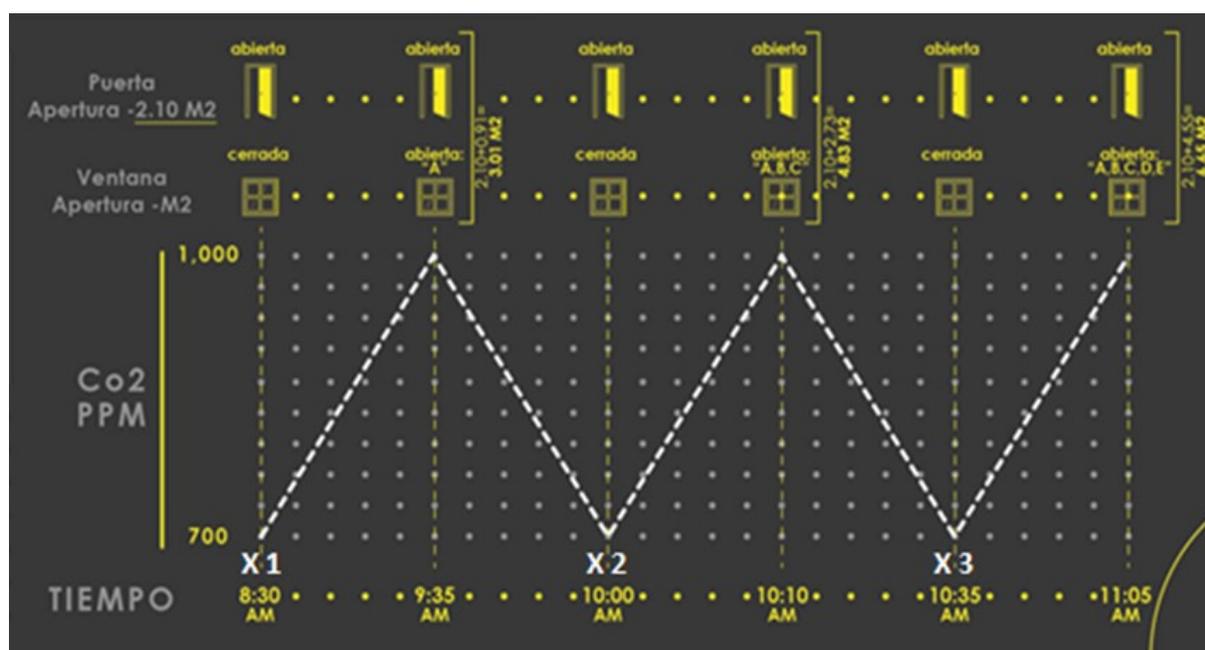
Tomando en cuenta otro punto de cierre total de ventanas para saturar el CO₂ interior hasta llegar nuevamente al máximo establecido, se añade al área de la puerta abierta un grupo de tres ventanas (P+A+B+C).

Finalmente se cierra todas las ventanas, se visualiza la concentración hasta 1000 ppm de dióxido de carbono en al menos tres sensores en la zona y se suma a la superficie de la puerta abierta permanentemente las cinco ventanas (P+A+B+C+D+E); con este procedimiento el cual toma 4

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tomando en cuenta las circunstancias espaciales, protocolo empleado y técnicas de medición, a través de los sensores principalmente, se han obtenido gráficas cuyos valores registrados se han clasificado dependiendo de las condiciones de la ubicación, tales como factibilidad de ventilación (mayor o menor) y concentración de usuarios conforme se evidencia en las gráficas.

Por medio de una tabla se realiza la síntesis de lo expuesto en las gráficas para cada sensor. La primera columna posee el nombre del conjunto de vanos abiertos para la ventilación, la segunda el porcentaje que estos representan, 100% en relación a las 10 ventanas y una puerta totales del espacio que en área son 11.5 metros cuadrados de los cuales se abren durante el ensayo hasta el 59.13% (6.8%), cantidad que representa a 5 ventanas y la puerta; finalmente la última columna muestra el tiempo en minutos que el CO₂ tarda en descender de valores entre 1000 y 1300 ppm a la más baja registrada en cada caso dependiendo de su ubicación en el aula. Tras el sondeo realizado, se ha podido identificar las variantes entre los tiempos de descenso por minuto de las par-

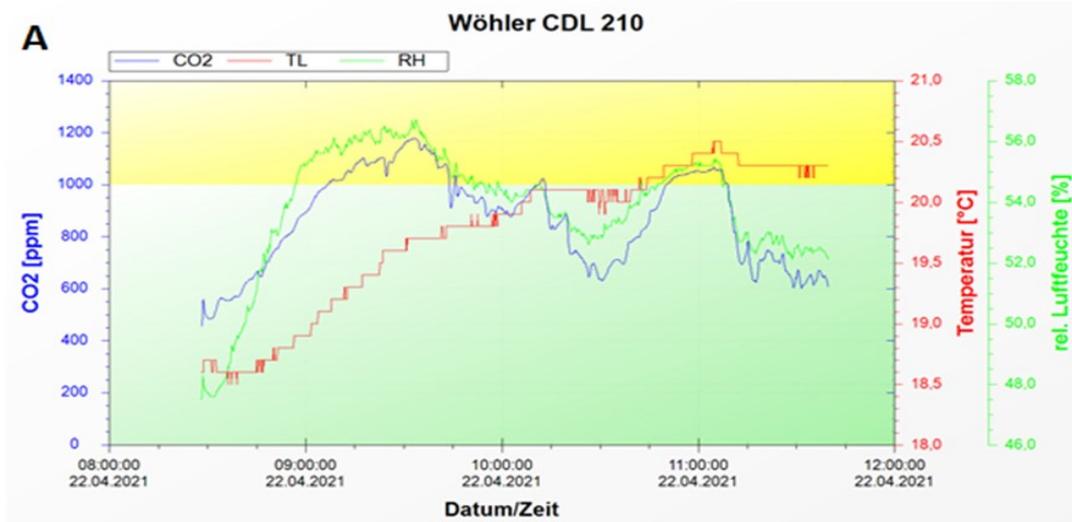


Gráfica 1. Protocolo de medición

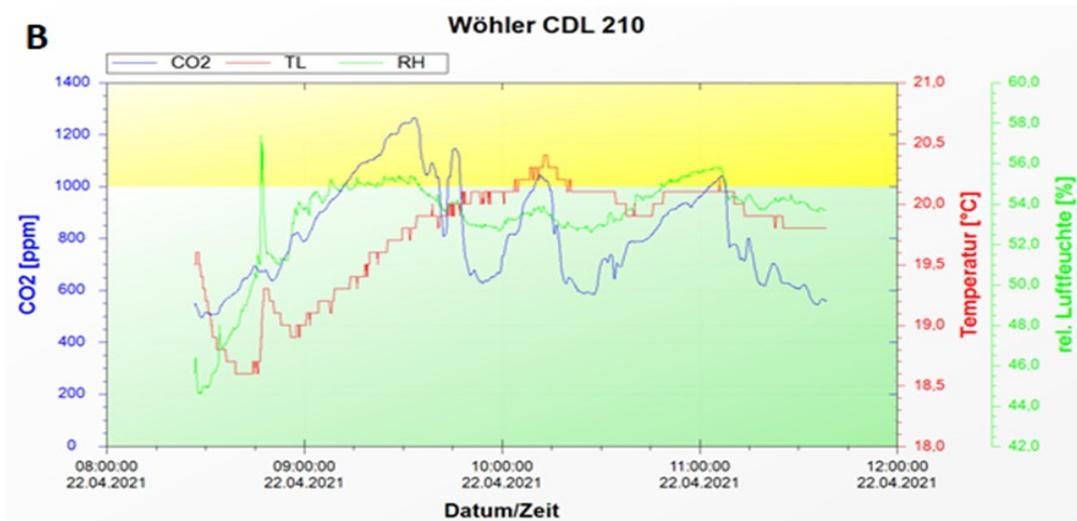
áreas de crecimiento intermitente es factible conocer el tiempo que tarda en renovarse el aire interior con diferentes metros cuadrados de superficies para aireación. Ver **gráfica 1**. Se menciona que las valoraciones de los factores adjuntos tanto como concentración de CO₂ en el ambiente exterior de 413 ppm y las condiciones de temperatura y humedad interior son variantes que no destacan en la práctica, aunque son mencionadas como variables secundarias vinculadas indirectamente con los valores de CO₂ registrados en los sensores.

tículas por millón identificadas en los cuatro sensores, los cuales se ubicaron en diferentes lugares, razón por la cual los promedios establecidos muestran fluctuaciones correspondientes a la factibilidad de ventilación dependiente estrictamente de los metros cuadrados que existan para airear un espacio con un margen de 750 m³.

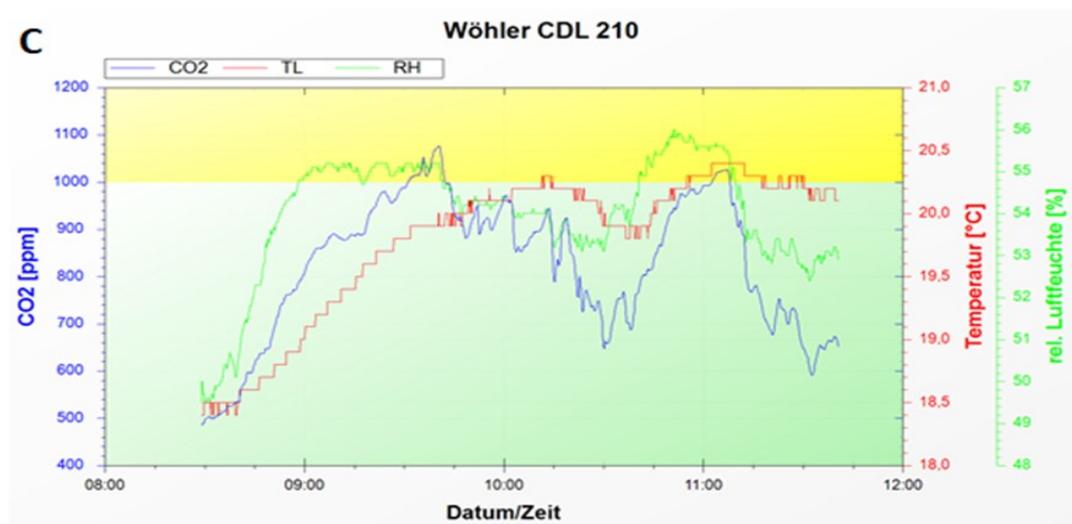
Los niveles de temperatura no varían más de 3 °C promedio en los 4 sensores desde la primera hasta la última apertura del grupo de ventanas, del mismo modo, la humedad ambiental cuyas fluctuaciones no sobrepasan los 3 puntos, por lo tanto son datos desestimados durante el ejercicio.



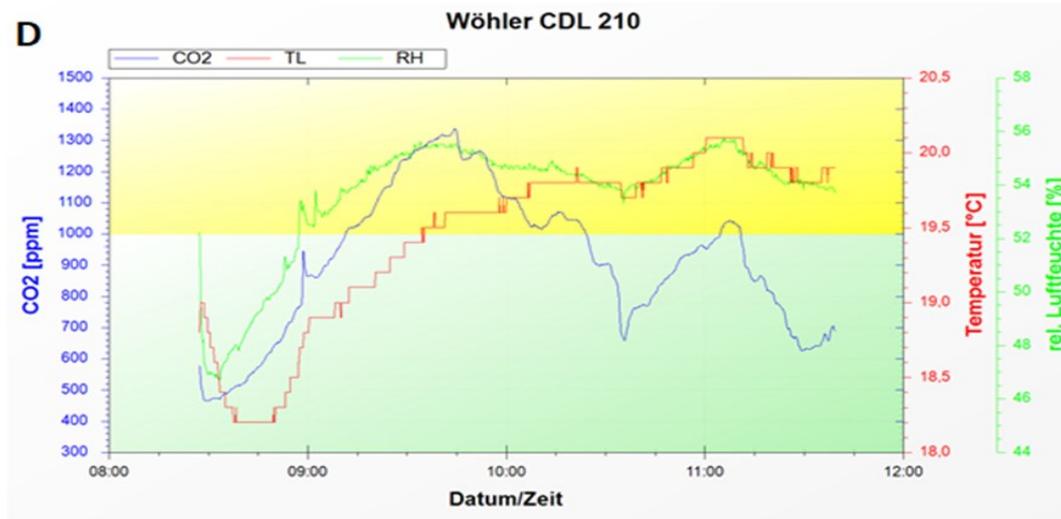
Gráfica 2. Gráfica datos tomados con sensor “A”



Gráfica 3. Gráfica datos tomados con sensor “B”



Gráfica 4. Gráfica datos tomados con sensor “C”



Gráfica 5. Gráfica datos tomados con sensor "D"

Mesa profesor						
	Conjunto de aberturas	Porcentaje equivalente	Área de ventilación	Descenso de CO ₂ (min)	Máximo inicial	Mínimo final
Sensor A	P	18.26	2.1	-	-	456
	P + A	26.43	3.04	21	1177	877
	P + A + B + C	42.78	4.92	14	1020	650
	P + A + B + C + D + E	59.13	6.8	8	1058	608
Mesa profesor						
	Conjunto de aberturas	Porcentaje equivalente	Área de ventilación	Descenso de CO ₂ (min)	Máximo inicial	Mínimo final
Sensor B	P	18.26	2.1	-	-	495
	P + A	26.43	3.04	21	1264	626
	P + A + B + C	42.78	4.92	16	1042	585
	P + A + B + C + D + E	59.13	6.8	7	1040	713
Mesa profesor						
	Conjunto de aberturas	Porcentaje equivalente	Área de ventilación	Descenso de CO ₂ (min)	Máximo inicial	Mínimo final
Sensor C	P	18.26	2.1	-	-	484
	P + A	26.43	3.04	8	1076	882
	P + A + B + C	42.78	4.92	38	951	647
	P + A + B + C + D + E	59.13	6.8	13	1026	676
Mesa profesor						
	Conjunto de aberturas	Porcentaje equivalente	Área de ventilación	Descenso de CO ₂ (min)	Máximo inicial	Mínimo final
Sensor D	P	18.26	2.1	-	-	465
	P + A	26.43	3.04	26	1337	1015
	P + A + B + C	42.78	4.92	20	1070	658
	P + A + B + C + D + E	59.13	6.8	22	1042	625

Tabla 3. Variables medidas por cada uno de los sensores

	Descenso de ppm/minuto		
	P+A	P+A+B+C	P+B+C+D +E
Sensor A	41.3	26.4	56.3
Sensor B	30.4	28.6	46.7
Sensor C	24.3	8	26.9
Sensor D	12.4	20.6	19
Promedio	20.3	20.9	37.2

Tabla 4. Descenso partículas por minuto

De los resultados tabulados anteriormente, a excepción la medición en el sensor C, se puede verificar que para lograr un descenso de niveles de CO₂ sobrepasado las 1000 ppm hasta un nivel inferior de 700 ppm, se requieren no más de 26 minutos, incluso con área mínima de ventilación natural que posee el espacio una ventana y una puerta (3.04 m²).

En los sensores donde la ventilación es más favorable (ubicación de los aparatos A y B) la disminución de CO₂ ambiental es proporcional al aumento de metros cuadrados de aireación, en otros términos, a más mayor aperturas, mayor velocidad de disminución; mientras tanto en los sitios menos ventilados (ubicación de sensores C y D, el declive de dióxido carbónico no presenta la misma velocidad con las mismas condiciones de ventilación antes descritas.

3.1. ESTRATEGIAS PROPUESTAS

Los espacios cerrados requieren consideraciones especiales para mitigar la transmisión de virus e infecciones de tipo aerotransportado. La evaluación de concentración de CO₂ sirve para determinar la tasa de ventilación y determinar ajustes en los sistemas de recirculación de aire y el uso de materiales alternos que permitan mitigar riesgos para los ocupantes de los espacios. En el caso específico del SARS-COV-19, declarado el 30 de enero de 2020 por la OMS como emergencia de salud pública de preocupación internacional tipo pandemia, se han realizado diferentes estudios para la revisión de estrategias de ventilación e intercambio de aire, restricciones en ocupación y uso de sensores para monitorizar los índices de concentración de partículas en el ambiente.

Al poner en práctica la investigación, la UBA (Umweltbundesamt - Agencia Alemana de Medio Ambiente) ha elaborado pautas generales para la evaluación de la salud del dióxido de carbono en el aire interior, que incluye consejos sobre el SARS-CoV-2, consejos que también son relevantes para COVID-19. En consecuencia, una concentración menor a 1000 ppm es higiénicamente inofensiva. La directriz clasifica una concentración entre 1000 y 2000 ppm como cuestionable y cualquier cosa por encima de ella como inaceptable. Asimismo, el grupo de trabajo de ventilación de la UBA recomienda el uso de semáforos de CO₂ para este

fin. La DGV(Unfallkasse) aboga por un valor objetivo de 700 ppm en las aulas en tiempos de epidemia.

Las estrategias que se implementaron en este estudio se centran principalmente en el comportamiento y la concentración de CO₂, analizando una aula educativa donde se realizan variaciones a la apertura del 50% de los vanos de dicho espacio (A, B, C, D, E).

La ejecución de estos protocolos de apertura se realiza con la intención de mantener los valores de CO₂ y la edad media del aire en niveles óptimos (> 1000 PPM). Como consecuencia, se exponen a continuación una serie de estrategias, que según las fuentes consultadas podrán ser de gran ayuda para mantener las condiciones óptimas de ventilación y minimizar la contaminación ambiental dentro del aula.

3.1.1. ESTRATEGIAS DE VENTILACIÓN

Al consultar la *Guía para la ventilación en aulas – "Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua, IDEA-CSIC MESURA", (2020)*, se mencionan los siguientes puntos a considerar para reducir las probabilidades de contagio por Covid-19 por vía área en ambientes **Interiores**.

Estas estrategias ayudarán a mantener condiciones adecuadas de ventilación en las aulas de recintos educativos, donde la **reducción del riesgo del contagio** se consigue disminuyendo la **emisión y exposición**

Apertura de ventanas: Se recomienda adaptar ventanas abatibles o corredizas con el fin de implementar protocolos de apertura en intervalos de 15 a 20 minutos por un periodo de 3 a 5 minutos para garantizar la ventilación de las aulas durante las clases y de forma permanente durante los descansos. En los casos donde exista ventilación mecánica, es recomendable implementar de igual forma estas prácticas.

Un espacio correctamente ventilado, se podría definir como la renovación o sustitución del aire interior, potencialmente contaminado, con el aire exterior libre de virus.

La renovación de aire se puede denominar por sus siglas en inglés **ACH (Air Changes per Hour)**. La ventilación necesaria para reducir el riesgo de contagio, depende de una serie de factores, tales como el volumen de la sala, el número y edad de los ocupantes y la actividad realizada. Según las recomendaciones de la *Guía de Harvard*, se recomiendan **5-6 renovaciones de aire por hora**, para aulas de 100 m², con 25 estudiantes de 5-8 años.

Además, el documento de Cruz y Querol 2020, presenta otro método para medir la ventilación, dicho método se basa en valores de caudales de entrada del exterior, por número de personas y tiempo determinado. Un valor adecuado para

reducir el riesgo de contagio es de 14 litros por persona / segundo [05].

3.1.2. MEDIDAS COMPLEMENTARIAS

- ◆ Limpiadores de aire
- ◆ Instalación de ventiladores extractores
- ◆ Uso de rejillas
- ◆ Chimenea de en fachadas
- ◆ Uso de medidores CO₂: REHVA, la Federación de Asociaciones Europeas de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado ha pedido la instalación en las aulas de las escuelas de monitores de CO₂ con indicadores de semáforo por lo menos en las escuelas donde la ventilación depende de la apertura de ventanas.

3.1.3. ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN DE HVAC

La ventilación y otras medidas relacionadas con HVAC y plomería pueden considerarse de mayor prioridad que la aplicación de controles administrativos y equipo de protección personal (incluidas las máscaras).

Los métodos de ventilación varían del espacio que se desea acondicionar, las variables climáticas y el uso. Por ello, se mencionan las alternativas identificadas para dicho propósito, sea esta mecánica o natural, las que reducen el gasto energético entre 30% y 40%, a través de ductos o aberturas. Junto a este factor, se vinculan los métodos de filtrado, los cuales varían en potencia y capacidad al considerar el espacio y uso; por ello existen los destacables filtros HEPA en las cabinas de aeronaves y los sistemas que incorporan nanotecnología para el propósito de asepsia del espacio interno doméstico o laboral [13].

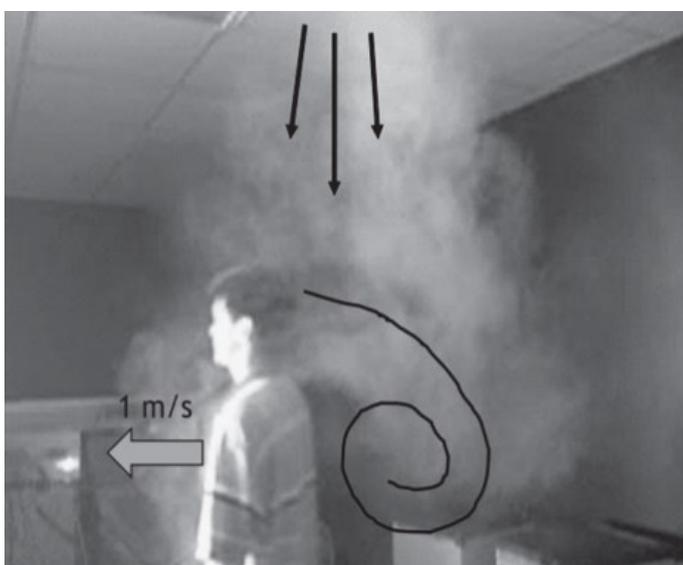


Fig. 3. Sistema de ventilación doméstico.

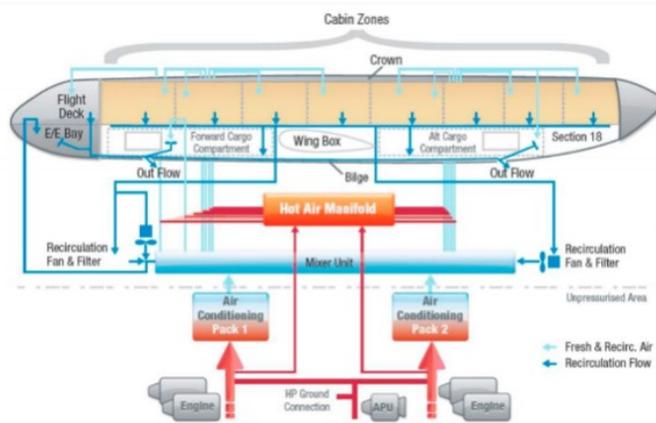


Fig. 4. Sistema de filtrado HEPA

3.1.4. ESTRATEGIAS DE FILTRACIÓN

Los sistemas de filtrado eliminan las partículas que se encuentran suspendidas en el aire, lo que proporciona un efecto similar en comparación con la ventilación del aire exterior. Para ser efectivos, los purificadores de aire deben tener una eficiencia de filtro **HEPA**, es decir, tener un filtro **HEPA** como última barrera de filtrado. Desafortunadamente, los filtros de aire para habitaciones con precios más atractivos no son lo suficientemente eficaces. Los dispositivos que utilizan principios de filtración electrostática en lugar de filtros HEPA, a menudo funcionan con eficiencias similares. Algunos sistemas de purificación de aire cuentan con filtros de micropartículas, dentro de los más populares se encuentran los de certificación **HEPA** – “High Efficiency Particulate Air”.

Este tipo de sistemas se caracteriza por su gran capacidad de filtrado, atrapando hasta un 99% de las partículas nocivas presentes en el ambiente. Sin embargo, no son la única alternativa eficiente de purificación, ya que lo esencial es que el producto cumpla con la norma europea de filtración **UNE-EN-1822-1:2020** [00].

3.1.4.1. FILTROS HEPA H13 – H14

Se puede decir que un filtro **H14**, tiene una eficacia de retener **99.99%** de sustancias volátiles de más de 0,3 micras, mientras que un filtro **H13**, tiene una eficiencia del **99.97%** en la retención de partículas superiores a ese tamaño. En espacios con especial riesgo como colegios, interiores de bares, restaurantes y gimnasios, la rápida renovación del aire es crucial y la implementación de purificadores de aire con filtro **HEPA H14**, podría ser un aspecto a tomar en cuenta.

En cuanto a la utilización del sistema de purificación o filtrado de recirculación de aire, deberán ser considerados factores tales como el volumen del espacio (dimensiones), así como la capacidad de personas dentro del mismo (aforo), para poder determinar la cantidad de filtros que deberán de ser implementados. Podemos mencionar que según los artículos analizados, se consideran medidas más rigurosas para los sistemas

de filtración HEPA, donde se incorporan lámparas UV, con el fin de maximizar los efectos de desinfección de aire a un muy bajo consumo energético. Como la radiación UV es nociva no sólo para las sustancias orgánicas sino también para los materiales técnicos, se presume que el filtro se degradará con mayor rapidez. Por lo que deberán ser considerados dentro de los procedimientos operativos de mantenimiento el reemplazo regular de los filtros HEPA.

3.1.4.2. DESVENTAJAS DE LOS SISTEMAS HEPA

Los filtros HEPA deben renovarse y ser sustituidos por otros nuevos con relativa frecuencia.

Es necesario que los proveedores de los purificadores sean de auténtica confianza en relación a la calidad de los filtros HEPA y que podamos saber que efectivamente estamos comprando un filtro HEPA H14 o H13 y en qué normativa se ha basado el fabricante para asegurar que ese filtro la cumple.

El filtro a sustituir debe considerarse como un residuo tóxico. En él se acumulan todo tipo de ácaros, bacterias y el coronavirus SARS-CoV-2 puede estar presente tras los filtrados. De ahí que se deban extremar las precauciones cuando se realice el cambio del filtro utilizando siempre mascarilla, gafas cerradas, guantes y a ser posible ropa cerrada hasta el cuello. Lo más recomendable será encargar esta labor a una empresa especializada en recogida de este tipo de residuos.

3.1.5. ESTRATEGIAS DE MONITOREO

Si el control de ventilación no es adecuado en un recinto, se recomienda instalar sensores de CO₂ en la zona ocupada que advierten contra la falta de ventilación, especialmente en espacios que se utilizan a menudo durante una hora o más por grupos de personas, como aulas, salas de reuniones y restaurantes. Durante una epidemia, se recomienda cambiar temporalmente la configuración predeterminada del indicador de semáforo para que la luz amarilla / naranja (o advertencia) se establezca en 800 ppm y la luz roja (o alarma) en 1000 ppm para activar una acción rápida.

Los dispositivos de monitoreo de CO₂ deben ser confiables y fáciles de colocar donde se necesiten. Idealmente, deben estar conectados, por ejemplo, para activar alarmas cuando la concentración de CO₂ supera los umbrales del semáforo, incluso para enviar alarmas a las redes de gestión de edificios o teléfonos inteligentes a través de redes inalámbricas. Los sensores inalámbricos sin batería representan la solución ideal.

Este tipo de soluciones de rápida instalación, sin necesidad de cableado, permiten el monitoreo continuo de la concentración de dióxido de carbono en el aire del ambiente.

3.1.6. MATERIALES DESARROLLADOS CON NANOTECNOLOGÍA

El uso de materiales desarrollados a través de la nanotecnología ha permitido tener múltiples usos en la lucha contra el COVID dentro de los edificios. La incorporación de nanopartículas de cobre [02] o plata en filtros de aire, textiles y superficies, puede ayudar a restringir la propagación del virus. [03] Existen filtros de aire que han incorporado el uso de fibras ultra ligeras de fibra de vidrio, denominados ULPA, los cuales tienen una eficiencia de filtrado de 0.1 µm; estos también han sido modificados con TiO₂ NP fotocatalítico y adicionando materiales de Nanopartículas Ag, Ag-híbridas, espuma de níquel o Zn-MOF.

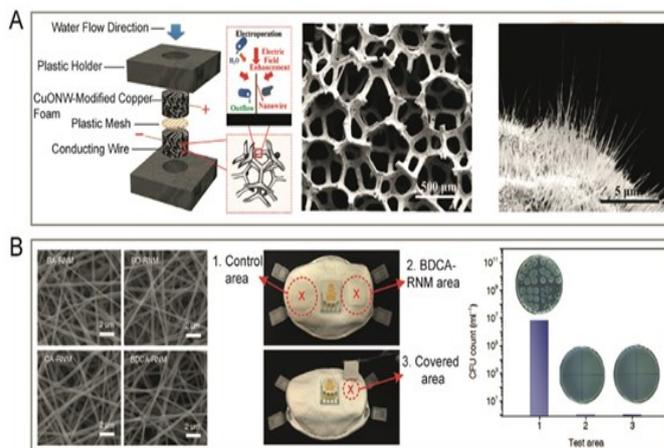


Fig. 5. Textiles utilizados para el desarrollo de materiales con nanopartículas

Estos materiales pueden activarse adicionalmente mediante el uso de biosensores y activación con radiación, LED, ultravioleta o solar. Otro uso es la utilización de oxidación fotoelectroquímica en purificadores de aire que utiliza luz UV-A para activar catalización de nanopartículas en los filtros de aire de contaminantes de aire, técnica que puede incorporarse en los sistemas de ventilación.

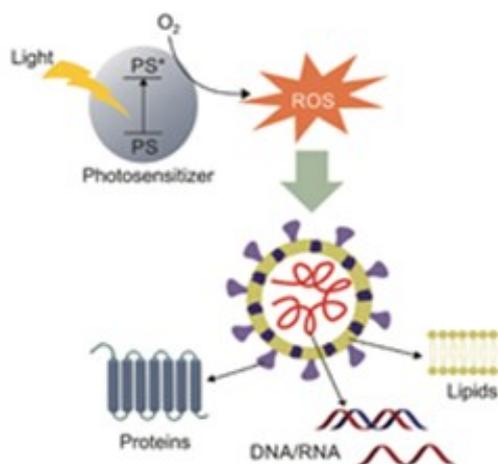


Fig. 6. Funcionamiento de los biosensores

Los nuevos filtros de aires incluyen componentes como carbón activado en forma de polvo granulado o fibras se ha probado con éxito para la absorción de partículas de bacterias y virus junto con el biocida Ag y CuO NP para una mayor eficiencia.[03]

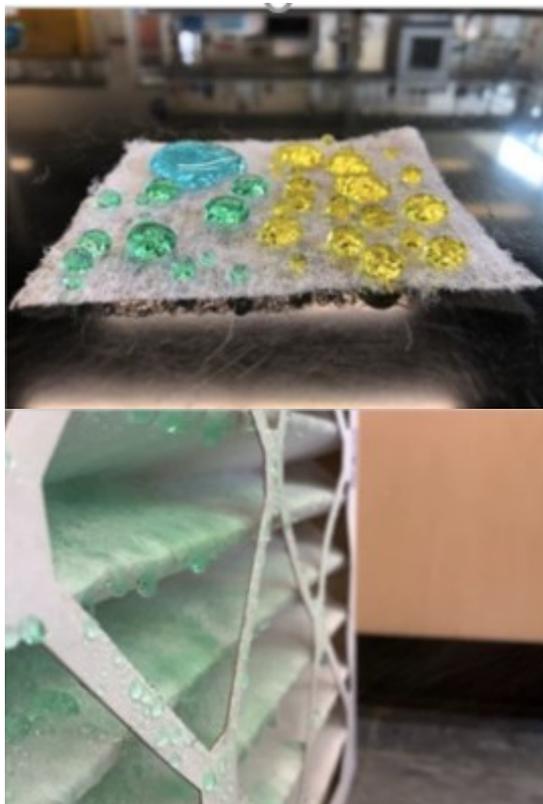


Fig. 7. Filtros de aire con diversos sistemas de nanotecnología

3.1.7. PROPUESTA DE MATERIAL CON PROPIEDADES REGULADORAS DE HUMEDAD Y AGENTES BIOLÓGICOS CONTAMINANTES

Tras los análisis bibliográficos en cuanto a temáticas afines, consideradas como respaldo para el planteamiento de una propuesta vinculada denominada: **Paneles modulares a base de materiales para regular agentes patógenos y humedad aérea en presencia o ausencia de ventilación de espacios habitables.**

Los materiales considerados tanto por sus propiedades antisépticas como por su facilidad para adquirir formas determinadas, entre ellos se encuentran el cobre (formulado como óxido con presencia de vidrios al 4% con significativos resultados contra bacterias y hongos), a modo de partículas, y las bases aglutinantes porosas de cal o yeso. Inclusive, la adición de fibras vegetales incrementa la resistencia a la tracción producidas por las tensiones de dilatación a más de cooperar con la transpiración y reducción significativa de la densidad modular[14].

La propuesta incorpora la compatibilidad entre las partículas metálicas como óxidos y el conglomerante alcalino como la

cal o el cemento, sin reacciones adversas inclusive con las fibras de origen vegetal, estas últimas podrían ser también objeto de estudio ya que hay estudios que demuestran su capacidad de controlar la humedad y temperatura [08].

Conocidas son las propiedades que presenta el cobre como antiséptico además de sus características como fungicida, es que se han realizado estudios que muestran su gran compatibilidad al combinar a través de nanopartículas, con fibras vegetales especialmente con compuestos derivados de la madera, o inclusive usándolo como cobre micronizado sobre madera aserrada, aglomerada o paneles laminados.

Se ha investigado que la dopamina puede formar una capa superadhesiva de polidopamina (PDA) en la superficie de casi todo tipo de materiales orgánicos o inorgánicos mediante polimerización por auto-oxidación [06]. Por lo tanto, la polidopamina puede usarse como un medio con muy buena adherencia entre el sustrato (que en este caso podría ser un panel de material orgánico) y las nanopartículas de cobre.

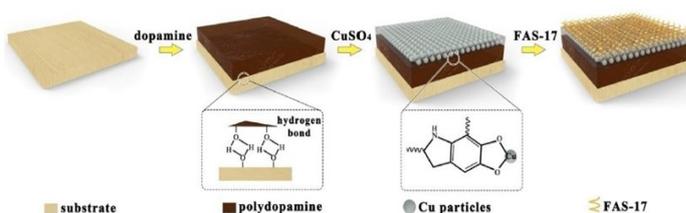


Fig. 8. Proceso de una cubierta de nanopartículas de cobre con propiedades antibacterianas e hidrorrepelentes

Lo anterior podría permitir fabricar elementos de base orgánica a los cuales mediante este sistema se le pueda incorporar esta lámina con las propiedades de controlar agentes nocivos para la salud, sin embargo, falta desarrollar cómo resolver qué esta lámina sea permeable y no afecte las propiedades higroscópicas del material de base para lograr un sistema que responda adecuadamente a lo que buscamos: control de humedad y control de agentes patógenos.

4. CONCLUSIONES

Medir la concentración de CO₂ dentro de un volumen habitado es un indicador aceptable para plantear una estrategia que permita la renovación de aire al interior y alcanzar el nivel recomendado de dióxido de carbono en espacios de uso educativo.

La incorporación de una variación positiva (mayor caudal) en la ventilación del espacio genera de forma inmediata una disminución en la concentración gaseosa y se puede relacionar con la disminución en la concentración de otros agentes patógenos como esporas, bacterias y virus.

La concentración de CO₂ dentro de un espacio cerrado de grandes dimensiones (>250 m²) no es constante en todos sus

puntos, por ende se deben tener en cuenta esto para distribuir los puestos de trabajo en su interior.

Se ha considerado 1000 ppm de CO₂ como rango máximo permitido dentro del cual se establecen estrategias de ventilación natural o mecánica con filtros de diferentes materiales para mantener en espacio dentro de dicho límite.

Para controlar el buen funcionamiento de las estrategias se pueden colocar sensores de CO₂ con alarmas para activar los protocolos necesarios con el fin de disminuir las ppm hasta un nivel aceptable alrededor de 700 ppm.

Como primera estrategia de ventilación se proponen protocolos de apertura en intervalos de 15 a 20 minutos por un periodo de 3 a 5 minutos. La alternativa más utilizada actualmente, además de la ventilación natural, es incluir en los sistemas de HVAC filtros HEPA, los cuales cumplen con filtrar hasta un 99% de partículas nocivas para la salud.

Producto de la búsqueda de materiales alternativos a los filtros HEPA, se ha encontrado una propuesta basada en el uso de paneles modulares sobre una base de aglutinantes porosos de cal o yeso formulado como óxido con presencia de vidrios al 4%, a modo de partículas. Adicionalmente, se han encontrado propuestas que incorporan nanopartículas de cobre o plata en filtros de aire debido a la agresividad letal que estos compuestos tienen sobre la membrana celular de los microorganismos, textiles y superficies. Además existen filtros de aire que han incorporado el uso de fibras ultra ligeras de fibra de vidrio, denominados ULPA, los cuales tienen una eficiencia de filtrado de 0.1 µm. Estas nanopartículas pueden activarse mediante el uso de biosensores y activación con radiación, LED, ultravioleta o solar.

5. REFERENCIAS

[01] Anderson, E. L., Turnham, P., Griffin, J. R., & Clarke, C. C. Consideración de la transmisión de aerosoles para COVID-19 y salud pública.

[02] Bogdanović, U., Lazić, V., Vodnik, V., Budimir, M., Marković, Z., & Dimitrijević, S. (2014). Copper nanoparticles with high antimicrobial activity. *Materials Letters*, 128, 75-78.

[03] Campos, E. V., Pereira, A. E., De Oliveira, J. L., Carvalho, L. B., Guilger-Casagrande, M., De Lima, R., & Fraceto, L. F. (2020). How can nanotechnology help to combat COVID-19? Opportunities and urgent need. *Journal of Nanobiotechnology*, 18(1), 1-23.

[04] Cox, C. S., & Wathes, C. M. (1995). *Bioaerosols handbook*. Boca Raton: Lewis Publishers.

[05] CRUZ, M., QUEROL, X., FELISI, M., GARRIDO, T. 2020. *Guía para ventilación en aulas*, Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del agua, IDAEA-CSIC, Mesura.

[06] Duan, X., Liu, S., Huang, E., Shen, X., Wang, Z., Li, S., Jin, C. (2020) Superhydrophobic and antibacterial wood enabled by polydopamine-assisted decoration of copper nanoparticles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 602, 125145.

[07] Esteban-Tejeda, L., Malpartida, F., Esteban-Cubillo, A., Pecharromán, C., & Moya, J. S. (2009). Antibacterial and antifungal activity of a soda-lime glass containing copper nanoparticles. *Nanotechnology*, 20(50), 505701.

[08] Li, Z., Wei, F., & Liu, W. (2011, May). Manufacture of building blocks of humidity-controlling composite materials used in greenhouse. In *2011 International Conference on Materials for Renewable Energy & Environment* (Vol. 2, pp. 1125-1128). IEEE.

[09] Lidwell, O. (1990). *The microbiology of air*. London: Edward Arnold. Vishal Chaudhary, Abhishek Royal, Murthy Chavali, S. K. Yadav. (2021) Advancements in research and development to combat COVID-19 using nanotechnology 202110.1007/s41204-021-00102-7 Nanotechnology for Environmental Engineering.

[10] Hatcher, J. (2020) Carbon Dioxide monitoring to lower the coronavirus threat. *Smart Buildings Magazine*.

[11] Ordovás, J. M., Esteban, M., García-Retamero, R., González López Valcárcel, B., Gordaliza, A., Inzitari, M., ... & Luis Aduriz, A. (2020). Informe sobre COVID-19 en espacios interiores, en particular restaurantes.

[12] PAJUELO, L., 2021. *Los mejores purificadores para limpiar el aire del hogar de alérgenos y otros virus*. El País.com. https://elpais.com/elpais/2020/12/21/escaparate/1608563347_515506.html

[13] Pecho, P., Škvareková, I., Ažaltovič, V., & Hruz, M. (2020). Design of air circuit disinfection against COVID-19 in the conditions of airliners. *Transportation Research Procedia*, 51, 313-322.

[14] Pelliccia, G., Baldinelli, G., Bianconi, F., Filippucci, M., Fioravanti, M., Goli, G., ... & Togni, M. (2020). Characterisation of wood hygromorphic panels for relative humidity passive control. *Journal of Building Engineering*, 32, 101829.

[15] Tang, J. W., Li, Y., Eames, I., Chan, P. K. S., & Ridgway, G. L. (2006). Factors involved in the aerosol transmission of infection and control of ventilation in healthcare premises. *Journal of Hospital Infection*, 64(2), 100-114.

[16] Carbon Dioxide monitoring to lower the coronavirus threat. (2020) Smart Building Magazine

[17] REHVA COVID-19 guidance document How to operate HVAC and other building service systems to prevent the spread of the coronavirus (SARS-CoV-2) disease (COVID-19) in workplaces. Abril 2021.

[18] GÓRNY, Rafał L., et al. Fungal fragments as indoor air biocontaminants. *Applied and environmental microbiology*, 2002, vol. 68, no 7, p. 3522.

WHAT DO YOU THINK?

To discuss this paper, please submit up to 500 words to the editor at bm.edificacion@upm.es. Your contribution will be forwarded to the author(s) for a reply and, if considered appropriate by the editorial panel, will be published as a discussion in a future issue of the journal.