



The CO₂ assessment in a school classroom for an optimal natural ventilation strategy

Evaluación de CO₂ en un aula escolar para una estrategia de ventilación natural óptima

PATRICIA GUIJARRO MIRAGAYA

Aeronautical engineering. Universidad Politécnica de Madrid, Spain.
patricia.guijarro.miragaya@alumnos.upm.es

LUCÍA PATRÓN SAADE

Architect, MBA, Universidad Politécnica de Madrid, Spain.
l.patron@alumnos.upm.es

TANIA ESTAY LEAL

Architect. Universidad Politécnica de Madrid, Spain.
tania.estay.leal@alumnos.upm.es

RICARDO TENDERO CABALLERO

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

The global pandemic due to the COVID-19 disease has led to the study of school classrooms as possible vectors of contagion. The CO₂ has been established with an easily captured indicator to determine the adequate ventilation of these spaces. However, continuous ventilation can cause a lack of comfort in students and therefore be detrimental to their cognitive development. Therefore, it is necessary to study an optimal way to ventilate and the objective of this study is to evaluate the CO₂ of a school classroom to optimize natural ventilation, minimizing the loss of comfort and thus reducing the risk factor for COVID-19. CO₂ and air flow measurements were carried out in three study days in a secondary school in Madrid in which tests were carried out on the closing and opening of doors and windows to determine the opening time necessary to reach an optimal level of CO₂.

Ventilation, CO₂, COVID-19, education.

La pandemia mundial por la enfermedad del COVID-19 ha llevado a estudiar las aulas escolares como posibles vectores de contagio. Se ha establecido el CO₂ con un indicador de fácil captura para determinar la adecuada ventilación de estos espacios. Sin embargo, la ventilación continua puede ocasionar falta de confort en los estudiantes y por lo tanto ir en detrimento de su desarrollo cognitivo. Por lo tanto, es necesario estudiar una forma óptima de ventilar y el objetivo del presente estudio es evaluar el CO₂ de un aula escolar en aras de optimizar la ventilación natural minimizando la pérdida de confort y así disminuir el factor de riesgo ante el COVID-19. Se realizaron mediciones de CO₂ y caudal del aire en tres jornadas de estudio en un colegio de secundaria en Madrid en el cual se realizaron pruebas de cierre y apertura de puertas y ventanas para determinar el tiempo de apertura necesario para llegar a un nivel óptimo de CO₂.

Ventilación, CO₂, COVID-19, educación.

1. INTRODUCCIÓN

El 3 de mayo de 2021, la pandemia mundial por la enfermedad COVID-19 ha contagiado a 154'298.022 personas y ha provocado la muerte de 3'229.325 de estas [1], además de llevar a casi todos los países del mundo a tomar medidas sobre mantener la distancia frente a otras personas, la prohibición de eventos masivos, restricciones en transporte y cuarentenas a gran escala. Las autoridades sanitarias reconocen que la transmisión por aerosoles que emitimos las personas al respirar, hablar y toser, son la principal fuente de contagio [2]–[4], validada por estudios sobre casos de múltiples contagios con grandes distancias entre la persona positiva y otros asistentes [5]–[8]. Los aerosoles son partículas sólidas o líquidas suspendidas en el aire, los aerosoles de origen

biológico son los bioaerosoles y son los principales causantes del contagio, estos son partículas transmisoras de patógenos como el Sars-Cov-2, con tamaños que pueden oscilar entre los 0.001 y hasta 100 micrómetros [9]. El contagio se produce cuando estas partículas entran en contacto con los ojos, la nariz o la boca de las personas. De ahí la necesidad de estudiar formas para prevenir el contagio de esta enfermedad. Las medidas preventivas incluyen uso de tapabocas, lavado frecuente de manos, el distanciamiento social y ventilación de los espacios [10]. Existen varias simulaciones con base a casos reales donde se han contagiado muchas personas que modelan el posible contagio de las personas con y sin medidas preventivas que demuestran la importancia de implementarlas de manera conjunta [11], [12], como es el caso del Estimador

de transmisión aérea COVID de la Universidad de Colorado [13] que muestra como el uso de máscaras, distanciamiento social y la ventilación continua de los espacios reduce drásticamente las posibilidades de contagio en espacios con muchas personas. No obstante, estas simulaciones son limitadas y no tienen en cuenta todas las variables que dependen del emisor (carga viral de la persona infectada, concentración y tamaño de los aerosoles emitidos y tiempo de emisión), del receptor (volumen de aire inhalado, tiempo de exposición, concentración viral en los aerosoles inhalados, posición y distancia del emisor, vulnerabilidad persona) y del escenario de encuentro (nivel de transmisión comunitaria y porcentaje de susceptibles, tiempo, espacio, exteriores e interiores, ventilación adecuada, comportamiento aerodinámico de las partículas emitidas) y otros factores que pueden potenciar el contagio como son el volumen de habla del emisor, la actividad física intensa, un mal ajuste en el uso de las mascarillas, un número alto de personas en el mismo espacio, poco distanciamiento social, aumento en los tiempos de exposición y ausencia de ventilación en interiores [14].

Según lo anterior, la ventilación, entendido como renovar el aire interior por el aire exterior, es una de las formas de garantizar la disolución y evacuación de los aerosoles en los espacios cerrados y por ende ha recibido gran atención por las instituciones de sanidad a nivel mundial [14]. Esta se mide renovaciones de aire por hora, ACH por sus siglas en inglés. La ventilación se puede producir de forma natural abriendo puertas y ventanas con acceso al exterior, por medio de equipos mecánicos (ventilación forzada) o por una mezcla entre las dos. A nivel de ventilación natural, la más eficiente es la ventilación cruzada que consiste en abrir dos elementos ubicados en diferentes planos del espacio a ventilar, de tal forma que la corriente de aire pase de un lado a otro del recinto. Ante la actual situación de salud mundial, se prefiere el uso de la ventilación natural antes que el uso de ventilación mecánica, sobre todo cuando implican recirculación de aire o uso de purificadores de aire de poca exigencia ya que estos pueden propiciar el contagio [15], [16]. Según el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) la recomendación del caudal de aire para los espacios de tal forma de garantizar condiciones óptimas es de 20 l/s por persona (5-6 ACH) para hospitales, clínicas, laboratorio y guarderías; 12,5 l/s por persona (4-5 ACH) para tener una calidad de aire buena en oficinas, residencias, salas de lectura, museos, tribunales, aulas escolares y piscinas; 8 l/s por persona (4-3 ACH) con una calidad de aire media para edificios comerciales, cines, teatros, salones de reunión, hoteles, restaurantes, cafeterías, bares, gimnasios y salas de ordenadores; y se considera un espacio con 5 l/s por persona (< 3ACH) una calidad de aire baja, no permitida para espacios habitados [17].

Una de las formas más sencillas de medir las renovaciones del aire es medir la concentración de dióxido de carbono (CO₂) en espacios habitados [18]. Estas concentraciones varían entre

300 y 500 partículas por millón (ppm) en el exterior [19], variando en zonas rurales o urbanas. Según RITE las concentraciones de CO₂ recomendadas son para locales son: 350ppm a 500ppm para una óptima ventilación, de 500 ppm a 800 ppm para una buena calidad del aire, de 800 a 1200 ppm para una calidad de aire media [17]. Según el documento La ventilación como medida preventiva frente al coronavirus SARS-CoV-2 del Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo de España, a partir de 800ppm la concentración se considera deficiente ante prevención de COVID-19 [20]. Dicho esto, en sí esta concentración de CO₂ no pone en peligro la salud humana se debe interpretar como un indicador de una adecuada ventilación y no como una medición directa de presencia de patógenos que pongan en riesgo la salud como es el caso del COVID-19 [21].

La educación es una de las áreas más afectadas por las medidas preventivas de contagio de COVID-19, con un cierre total de instalaciones en momentos iniciales de la pandemia e incluso, cerca de un año y medio después, en varios países, ocasionando repercusiones negativas en el desarrollo social y bienestar de los niños y adolescentes en proceso de formación [22]. Las aulas escolares al ser espacios que albergan muchas personas por altos periodos de tiempo han sido estudiadas para tener óptimas condiciones de ventilación a partir del análisis del CO₂ como medida relativa de ventilación, según publicó la escuela de salud pública de Harvard [18] y aplicado por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas para garantizar la adecuada ventilación en las aulas escolares de España [23], entre otras recomendaciones [24], [25]. Estudios previos sobre las concentraciones de CO₂ y la calidad del aire para la actividad de la educación ya han sido estudiados previamente, independientemente de la nueva contingencia por el COVID-19 [26]–[29], con guías de implementación como la publicada por la Federación europea de calefacción, ventilación y aire acondicionado [30].

Por su parte la Plataforma de Edificación Passivhaus y la Universidad de Burgos publicaron un Proyecto de monitorización de colegios para validar la calidad de la ventilación en 36 colegios a lo largo de toda España, en donde encontraron que las condiciones propicias para el estudio solo se logran en promedio 68% del tiempo, sobre todo a nivel de CO₂ en donde solo hay condiciones óptimas para el estudio el 32% del tiempo con niveles superiores a las 1.000 ppm [31]. De manera asimilar Alonso et al. [32] estudió las condiciones de confort térmicas y la calidad del aire adecuadas para estudiar en dos aulas escolares durante el invierno de 2020 en España con sistemas de ventilación mecánica e híbrido con ventilación natural. Las instalaciones son de una escuela primaria construida recientemente. Los resultados mostraron que en cerca del 60% del tiempo, si bien se logra disminuir la concentración de 300 ppm promedio a la semana con la ventilación mecánica y hasta 400ppm cuando hay ventilación natural en todo momento, no hay confort térmico.

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el espacio de estudio debe ser un ambiente limpio, seguro y confortable de tal forma que reduzca la exposición de agentes químicos y biológicos que puedan ocasionar o ayudar a propagar enfermedades, y ayudar al desarrollo cognitivo de las estudiantes, evitando así la inequidad educativa [33]. La pérdida de confort ocasionada por la ventilación constante en los meses de invierno va también en detrimento de la calidad del proceso educativo, además de generar pérdidas energéticas importantes según demostró el estudio realizado por Stabile et al. [34]. Por esta razón consideramos importante conocer más acerca de cómo mejorar las condiciones ventilación de las aulas escolares con la infraestructura actual de tal forma que se puedan implementar parámetros sencillos que permitan optimizar la ventilación minimizando en lo posible la pérdida del confort y mantener la ventilación adecuada para disminuir el contagio del COVID-19.

2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

El objetivo del presente estudio es evaluar la concentración de CO₂ en un aula escolar como forma de optimizar la ventilación natural y garantizar un nivel de CO₂ óptimo para las condiciones de aprendizaje.

A nivel de metodología se estudia el edificio ESO del Instituto de Educación Superior Ramiro Maeztu en Madrid, el aula 210 en la segunda planta, con ventilación natural hacia un patio semi-abierto con orientación este, según la Ilustración 1. La edificación cuenta con 4 plantas con una distribución variada entre diferentes pisos; el aula a estudiar se caracteriza por no tener ventilación cruzada hacia el costado oeste de la edificación. Una fuente complementaria de ventilación es la que se encuentra en el punto fijo de la edificación en donde están las escaleras de la escuela que tiene entrada de aire desde la planta baja, y de manera más directa 2 ventanas de dimensiones similares a las encontradas en el aula que abren al patio interior con orientación del aula hacia el norte (ver Ilustración 2).

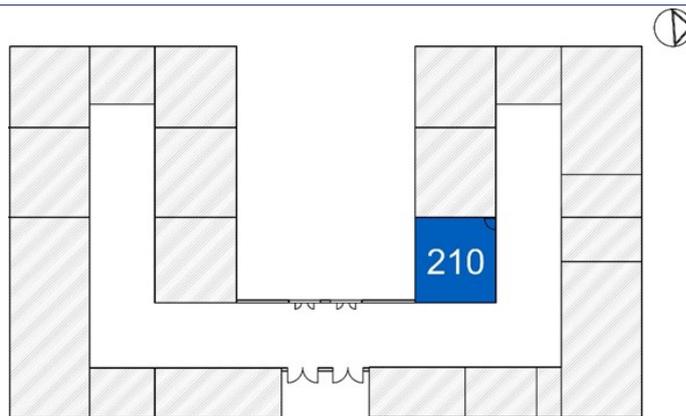


Fig. 2. Localización del aula a estudiar en la segunda planta de la edificación.

El aula tiene 45m² (3.0 x 3.0m ancho por alto), en el cual hay 21 personas presentes constantemente, un profesor y 20 alumnos. Hay dos ventanas de 9m² (3.0 x 3.0m) de las cuales solo hay apertura del 1.215m² (2 hojas de 0.45 x 1.35m), que junto con una puerta área de apertura de 1.67m² (0.76 x 2.2m), se tiene un área útil de ventilar de 7.02m² para un volumen de 136,8 m³ (altura 3.04m). La distribución del aula se presenta en la Ilustración 3, seguidos de imágenes generales del aula en la Ilustración 4 y una ventilación indirecta a través de ventanas en el pasillo de la edificación en la Ilustración 5.

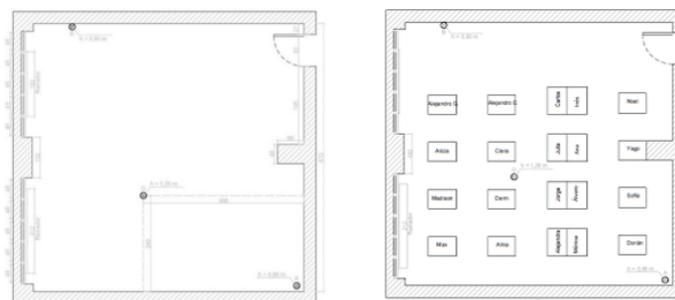


Fig. 3. Planta y distribución del aula E210.

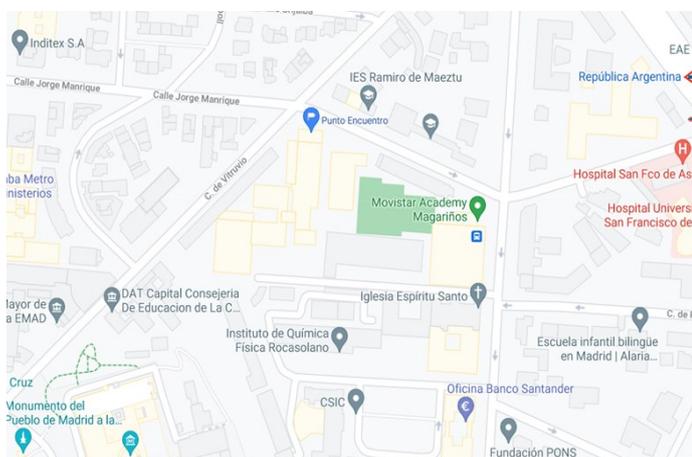


Fig. 1. Localización. Fuente: Google Maps.



Fig. 4. Fotografía interior del aula.



Fig. 5. Fotografías ventanas del pasillo principal, desde el corredor y desde el aula de clases.

Se realizaron mediciones con sensores de CO₂ de referencia comercial Wohler-cdl-210 con la misma calibración. Se tomaron medidas en 3 días, el 12 de marzo de 2021, 9 y 30 de abril de 2021 desde las 8:20 hasta las 15:10 (6 horas y 50 minutos) los primeros dos días y de 8:20 a 2:10 (5 horas y 50 minutos) en el 30 de abril. Los datos se registran cada 10 segundos en 3 o 4 sensores diferentes según el día de estudio. Adicionalmente el día 30 de abril se realizó mediciones complementarias de velocidad del aire con un dispositivo Testo 445 a la altura de cada sensor de forma paralela y perpendicular a las aperturas de la ventana.

La ubicación de los sensores en el aula y su altura presenta en la Ilustración 3 y en la Ilustración 6 se observa su instalación.



Fig. 6. Fotografías de la ubicación de los sensores.

Durante las tres jornadas se registraron las aperturas y cierres de las ventanas y puerta del salón, de tal forma que pudieran tener una correspondencia de los niveles de CO₂ con los cambios en el flujo de la ventilación y otras actividades especiales que puedan presentarse durante las horas de clases. El desarrollo de estas actividades se ha visto afectado por el comportamiento natural de las personas que se encontraban en el aula y fueron motivo de control en el estudio.

Durante la medición del día 9 de marzo de 2021 se realizaron pruebas de cierre total de las ventanas y puerta para determinar hasta llegar a 1000ppm en el sensor más desfavorable (sensor C, esquina del aula) y apertura al 100% de la puerta y ventanas del salón hasta llegar a 750ppm. Las pruebas se realizaron con las ventanas del pasillo cerradas.

El día 30 de abril se realizó un ejercicio similar logrando cuatro pruebas de la siguiente forma:

- ◆ Cierre total de puertas y ventanas hasta llegar a 1000ppm en el sensor B (Sobre trípode), abriendo al 100% la puerta y las ventanas hasta lograr bajar los niveles hasta 750ppm. Ventanas del pasillo abiertas.
- ◆ Cierre total de puertas y ventanas hasta llegar a 1000ppm en el sensor B (Sobre trípode), abriendo al 100% la puerta y al 50% las ventanas (solo las dos hojas más externas con apertura total) hasta lograr bajar los niveles hasta 750ppm. Ventanas del pasillo abiertas.
- ◆ Cierre total de puertas y ventanas hasta llegar a 1000ppm en el sensor B (Sobre trípode), abriendo al 100% la puerta y las ventanas hasta lograr bajar los niveles hasta 750ppm. Ventanas del pasillo abiertas.
- ◆ Cierre total de puertas y ventanas hasta llegar a 1000ppm en el sensor B (Sobre trípode), abriendo al 100% la puerta y al 50% las ventanas (solo las dos hojas más externas con apertura total) hasta lograr bajar los niveles hasta 750ppm. Ventanas del pasillo cerradas.

Se toma como medida de referencia el CO₂ exterior desde una de las ventanas del aula.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. TOMA Y ANÁLISIS DE DATOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO

3.1.1. MEDICIONES DE CO₂ 12 DE MARZO

Se realizaron medidas de CO₂ en un aula de colegio, en el cual se posicionaron cuatro sensores, tomando en cuenta altura y ubicación estratégica respecto a la cercanía de los alumnos y ventanas. Los sensores registraron mediciones de CO₂ desde las 8:00 am hasta las 14:40 de la tarde, cuyo objetivo es registrar los valores de CO₂ en un día normal de aula, respecto de la apertura y cierre de ventanas.

A partir de la observación e información registrada por parte de los alumnos, se toma cuenta de las acciones durante el día respecto a la apertura y cierre de ventanas y persianas, esto con el objetivo de evaluar los resultados obtenidos por los datos y relacionarlos con el porcentaje de apertura de las ventanas.

Se tomaron en consideración dos variables que podrían suponer una causal de los resultados obtenidos en cada uno de los sensores, en función de su posición y exposición a personas y la altura de cada sensor. Se puede apreciar en la Ilustración 7 la ubicación en planta de los sensores y la exposición a alumnos, para identificar el grado de exposición se ha trazado un círculo de radio de un metro, con el cual se puede reconocer que el sensor A y B tienen una mayor exposición en planta, el sensor D es el siguiente sensor con mayor superficie de contacto con el aula, no obstante este se encuentra cercano a la ventana por lo tanto, debería obtener mejores resultados y finalmente el sensor C, pese a tener una menor superficie de exposición a CO₂, este se encuentra en el otro extremo del recinto por lo tanto a priori puede determinarse que existe menor exposición a ventilación.

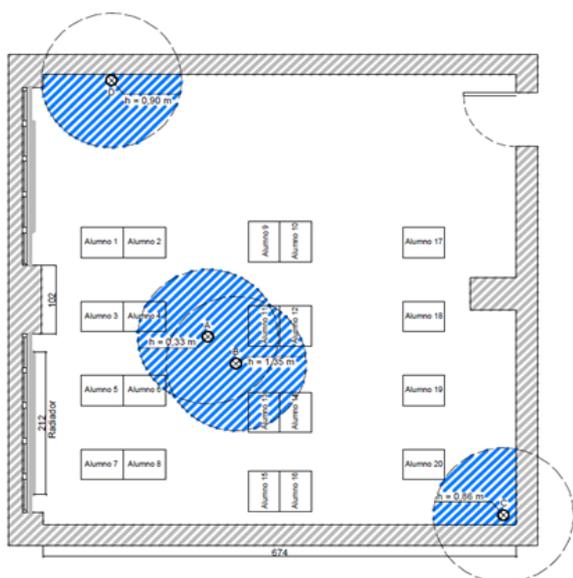


Fig.7. Ubicación de los sensores y grado de exposición a CO₂.

La segunda variable para tomar en consideración respecto de los resultados es la altura del sensor, que se puede apreciar en la Ilustración 8. Cruzando la información de ubicación en planta y la altura del sensor, se reconoce que el sensor B tiene una mayor exposición a CO₂, debido a que tiene alumnos en todo su perímetro, este sensor se encuentra a una altura de 1,35 m, coincidiendo con la altura de la ventana, por lo tanto, la ventilación que obtendría este sensor puede suponer mejores resultados que el sensor A, que se encuentra cercano al sensor B, sin embargo, este está a nivel de suelo

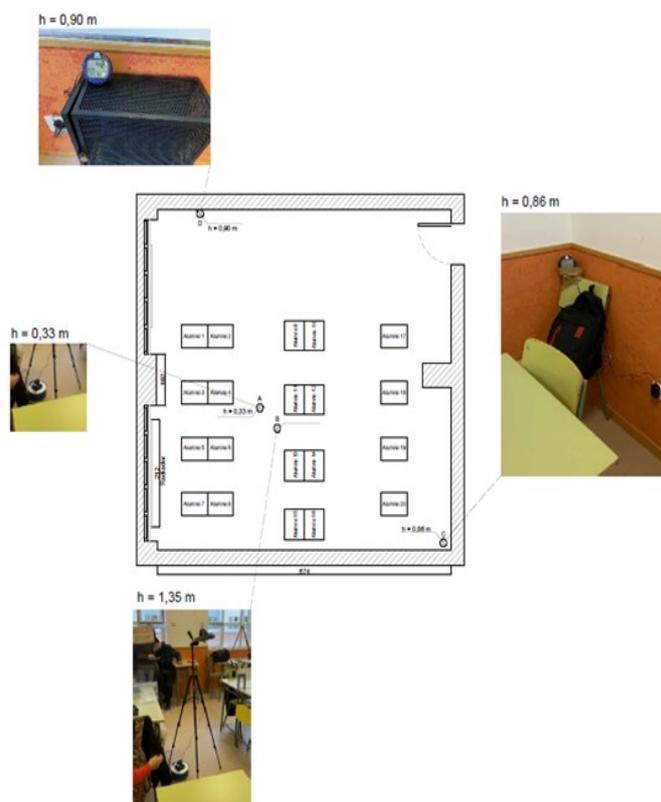
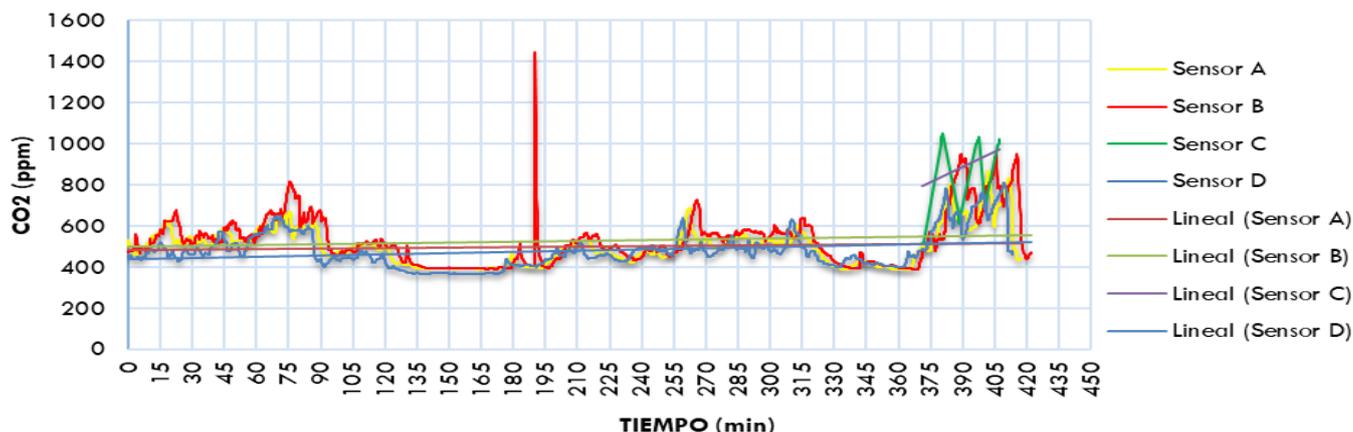


Fig. 8. Altura de los sensores.

Los resultados obtenidos de los cuatro sensores se pueden apreciar en la Gráfica 1. Tomando en consideración las variables anteriores, de altura y posición, se reconoce que el sensor con valores más altos de CO₂ es el sensor B, siendo este resultado coincidente con el sensor con mayor exposición perimetral junto con el sensor A, cuyos resultados de CO₂ son los siguientes con valores más altos. Se reconocen tres hitos importantes a lo largo del día, que se describirán en la Tabla 1.

Hitos	Descripción	Sensor valor máximo	Sensor valor mínimo	Rango de tiempo (min)
Hito 1	Se cierran las persianas	Sensor B	Sensor D	45-105
Hito 2	Recreo	Sensor B	Sensor D	135-165
Hito 3	Abertura y cierre de ventanas	Sensor C	Sensor D	365-420

Tabla 1. Hitos de CO₂.



Gráfica 1. Comparación resultados CO₂ Sensor A, B, y D.

3.1.2. MEDICIONES CO₂ 9 DE ABRIL

A partir de los datos registrados y la ubicación de los sensores el día 12 de marzo, se vuelven a tomar datos, con el objetivo de determinar posibles casos de estudio que a posterior se definirán y analizarán.

En este caso se cuenta con tres sensores, A, B y D, cuya posición se mantiene según mediciones del 12 de marzo y se muestra en la Ilustración 9. La altura de los sensores se mantiene con excepción del sensor B, que en este caso pasa a ser el sensor D y tiene una altura de 1,26 m según la Ilustración 10, resultando en 9 cm más bajo que el sensor B el 12 de marzo, no obstante, la exposición a CO₂, efecto de la cercanía a los alumnos sigue la misma lógica que el caso de estudio anterior. Se puede suponer previo a los resultados que el sensor B tendrá los valores más alto, debido a una mayor cercanía a los alumnos.

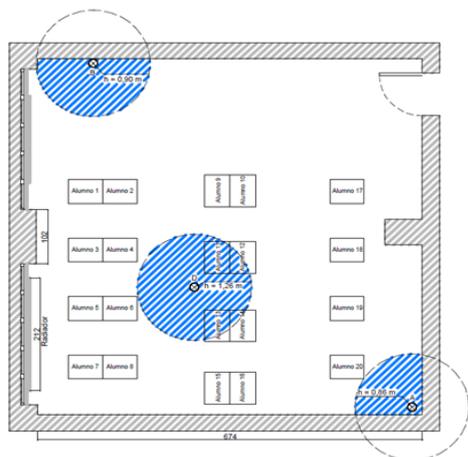


Fig. 9. Ubicación de los sensores y grado de exposición a CO₂.

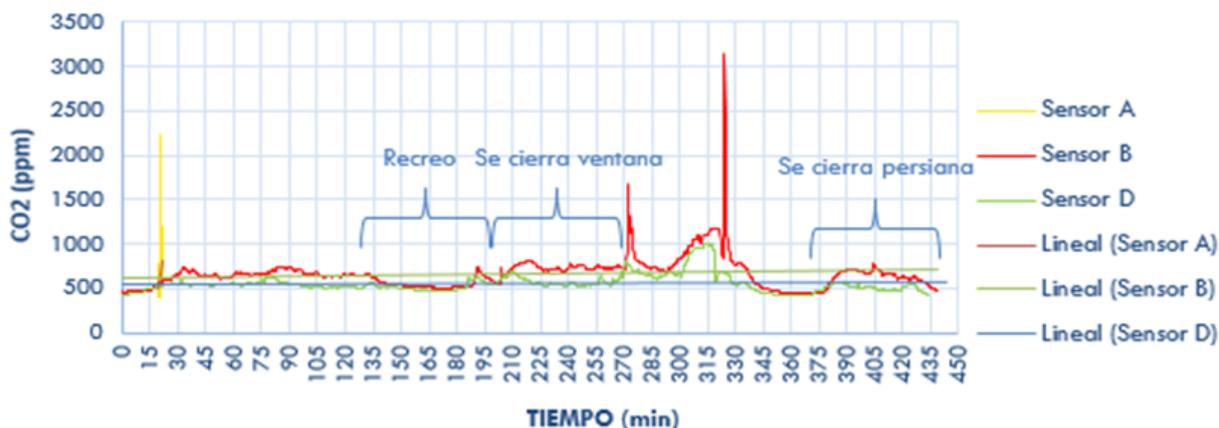
Se colocaron los sensores con todas las ventanas abiertas a las 8:00 de la mañana y estos se recogieron a las 15:15 aproximadamente. Se programaron los sensores para recoger medidas cada 10 segundos, pudiendo así evaluar que sucedía a lo largo de la mañana según variaban las actividades del aula, así como la ventilación de esta de manera aleatoria.

Al inicio de la toma de medidas, se encuentran todas las ventanas abiertas, y la clase está ocupada únicamente por cuatro personas hasta las 8:15 aproximadamente que es cuando empiezan a entrar todos los alumnos.

Al observar la Gráfica 2, se puede apreciar que, aunque se mantienen constantes los niveles de CO₂ durante la mañana, cuando se alcanza la hora del recreo, los valores de CO₂ descienden, alcanzando los mínimos. El sensor con valores más altos sigue siendo el sensor B, cuya mayor exposición a alumnos respecto de su ubicación es la mayor, mostrando los mismos resultados que el estudio de mediciones del 12 de marzo. Se reconoce un segundo hito en el cual se cierran las ventanas, resultando en un aumento de CO₂, con alcanzando los valores máximos en el rango de tiempo entre los 240-330 minutos. Los hitos que se reconocen durante el día se muestran en la Tabla 2.

Hitos	Descripción	Sensor valor máximo	Sensor valor mínimo	Rango de tiempo (min)
Hito 1	Recreo	Sensor B	Sensor D	135-165
Hito 2	Se cierran ventanas	Sensor B	Sensor D	195-255
Hito 3	Se cierran persianas	Sensor B	Sensor D	375-435

Tabla 2. Hitos de CO₂.



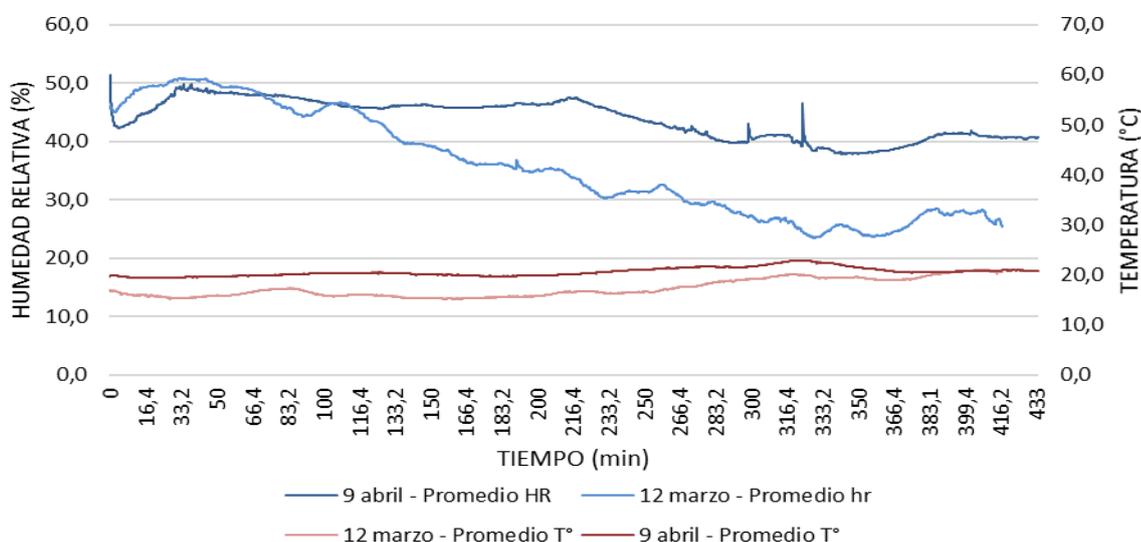
Gráfica 2. Comparación resultados CO₂ Sensor A, B y D.

Una vez hechas todas las mediciones de CO₂, se realiza una comparativa de todos los sensores en ambos días respecto a la temperatura y la humedad relativa, según se observa en la Gráfica 3.

Según se puede apreciar las líneas de tendencia de la temperatura tiene las mismas pendientes en ambos casos, con una pendiente mayor de crecimiento el día 9 de abril. Para el caso de la humedad relativa, la diferencia entre ambos días se hace más pronunciada, con una pendiente más acusada el 12 de marzo.

Si se observan los hitos definidos anteriormente y se compara

con la Gráfica 3, se observa que el comportamiento de las gráficas de la temperatura no arroja una correlación con los resultados de CO₂, manteniéndose con una pendiente poco pronunciada y pequeñas variaciones de rango, no obstante en el caso de la humedad relativa, se observa que en el momento en el que se cierran las ventanas en el caso 9 de abril, aparece un pico de humedad relativa, y en el momento en el que se abren y cierran ventanas en el caso 12 de marzo, se observa la misma tendencia de alza y descenso, con un rango más acotado de variación que el CO₂.



Gráfica 3. Comparación del promedio de temperatura y humedad relativa de los sensores A, B, C y D de los dos días de mediciones.

3.1.3. CASOS DE ESTUDIO

El día 30 de abril de 2021, se colocaron cuatro sensores en el aula con el fin tomar medidas de CO₂, temperatura y humedad durante toda la mañana. Se colocaron los sensores con todas las ventanas abiertas a las 8:00 de la mañana y estos se recogieron a las 14:30 aproximadamente. Se programaron los sensores para recoger medidas cada 10 segundos, pudiendo así evaluar que sucedía en 3 casos de estudio.

Todos los casos consisten en estudiar el tiempo que tarda en subir el nivel de CO₂ del aula a 1000 partículas por millón con todo el aula cerrada, es decir, sin ventilar, para posteriormente observar, el tiempo que se requiere para volver a tener un valor de CO₂ de 750 partículas por millón en el aula ventilando esta, ambas medidas por el sensor B, ubicado, aproximadamente, en la zona central de la clase, a 1'26 m de altura del suelo, con dos alumnos muy pegados, de cara, a él y respirando prácticamente sobre él.

En el primer caso se proporciona al aula toda la ventilación posible, es decir, la apertura de la puerta; las ventanas del pasillo que posibilitan una ventilación cruzada con el aula; y la apertura de las dos hojas de las dos ventanas de las que dispone la sala. Este caso fue el primero que se realizó en la

mañana, empezando a evaluar este a las 9:29 de la mañana del día 30 de abril de 2021, cuando se cierran todas las ventanas y puertas del aula, estando dentro de esta, 24 personas.

En el segundo caso se proporciona al aula la mitad de la ventilación posible, es decir, se abre la puerta, las ventanas del pasillo que posibilitan una ventilación cruzada con el aula, y una hoja de cada una de las dos ventanas de las que dispone la sala. Este se empezó a evaluar a las 9:37 de la mañana del día 30 de abril de 2021, cuando se cierran todas las ventanas y puertas del aula, estando dentro de esta, 24 personas.

En el tercer y último caso de estudio se proporciona al aula parte de la ventilación posible, es decir, se abre la puerta, y as dos hojas de las dos ventanas de las que dispone la sala, dejando cerradas todas las ventanas del pasillo que podrían ayudar a una ventilación cruzada. Este caso fue el último que se realizó en la mañana, empezando a evaluar este a las 9:53 de la mañana del día 30 de abril de 2021, cuando se cierran todas las ventanas y puertas del aula, estando dentro de esta, 24 personas. Estos casos quedan resumidos en la Tabla 3.

Casos	Ventanas clase	Puerta clase	Ventana pasillo
Caso 1	Dos hojas de cada ventana abiertas	Abierta	Abiertas
Caso 2	Hoja exterior de cada ventana abierta	Abierta	Abiertas
Caso 3	Dos hojas de cada ventana abiertas	Abierta	Cerradas

Tabla 3. Descripción de los diferentes casos de estudio.

En todos los casos de estudio cada sensor se encuentra situado en un punto del aula, Ilustración 11, y a una altura diferente, Ilustración 12, de forma que su separación de la ventana, la ventilación que le llegue, y la cantidad de personas que tiene a su alrededor, sea diferente.

Esto hace, que, aunque la velocidad media del aire en la zona cercana a la ventana del aula de ese día fuese de entre 0'8 y 1'4 m/s, a los sensores, este aire llegaba a velocidades mucho más bajas, tal y como se muestra en la Tabla 4.

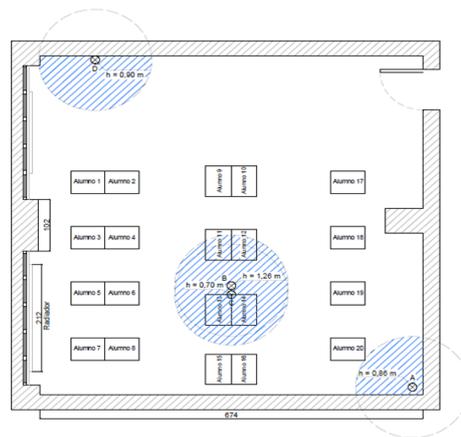


Fig. 11. Ubicación de los sensores y grado de exposición a CO₂.

Sensores	Posición	Altitud	Velocidad del aire
Sensor A	Esquina más alejada de puerta y ventanas	0,86mm	0,020 m/s
Sensor B	Al lado de la ventana de en frente de la puerta	1,26m	0,035 m/s
Sensor C	Debajo del sensor D	0,70m	0,010 m/s
Sensor D	Frente a la ventana de detrás, en la zona central del aula	0,90m	0,034 m/s

Tabla 4. Referencias de ubicación de los sensores en el aula.

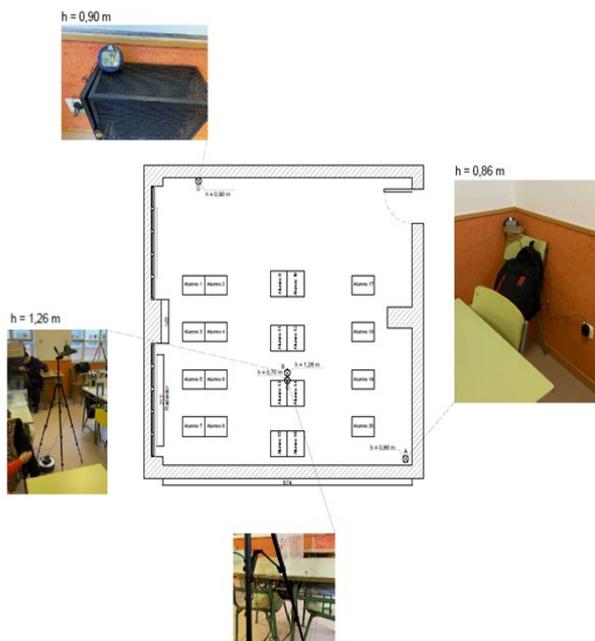


Fig. 12. Altura de los sensores.

A continuación, se muestra una comparativa de los niveles de CO₂ obtenidos para cada uno de los tres casos de estudio en los cuatro sensores instalados en el aula, para evaluar como influye cada modo de ventilación sobre cada sensor.



Gráfica 4. Comparación resultados CO₂ Sensor A en los diferentes casos de estudio.

La Gráfica 4 muestra cómo, en el sensor A, el caso de estudio 1, como era de esperar, es el que más rápido se reduce el nivel de CO₂ presente en el ambiente. La ventilación que proporciona la apertura de las dos ventanas del aula, sumado a la ventilación cruzada que se produce con las ventanas del pasillo, produce en este sensor, una mayor incidencia de aire renovado que hace que la presencia de partículas de CO₂ cerca de este, baje de una forma más brusca de lo que

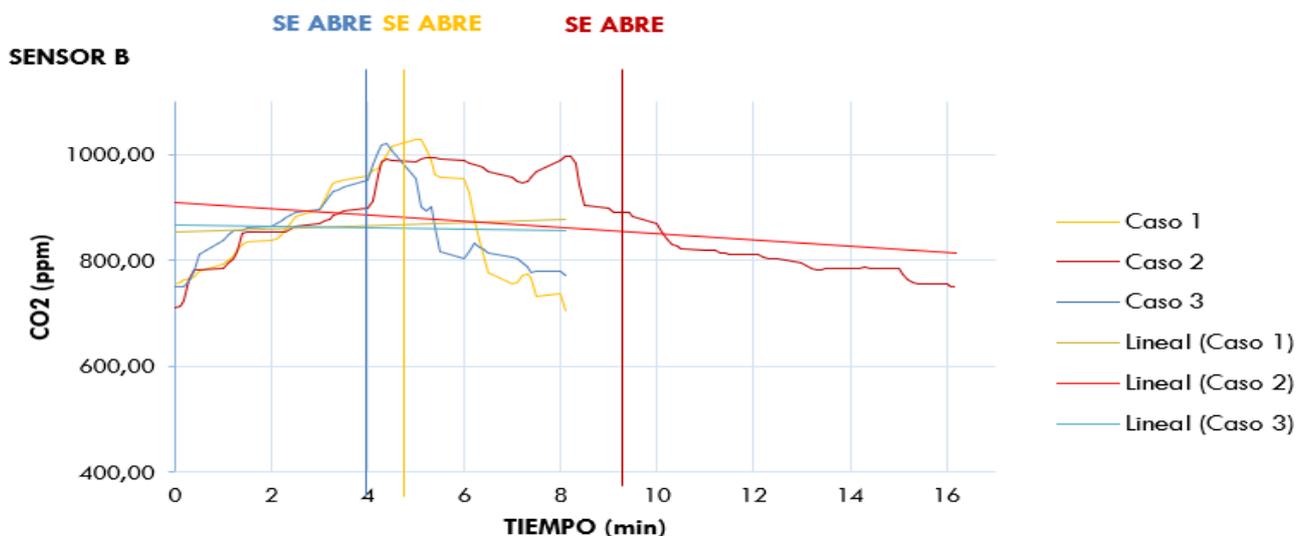
ocurre en el caso de estudio 2, y 3.

Se observa también que en el caso de estudio 3, aunque la reducción de los niveles de CO₂ del ambiente requiere de algunos segundos más de los que requiere el caso de estudio 1, precisa de un menor tiempo del que precisa el caso 2. Es decir, la Gráfica 4 revela también que la apertura de las dos hojas de las dos ventanas del aula proporciona una ventilación más eficiente de la que proporciona la apertura de las ventanas del pasillo que ayudan a esa ventilación cruzada.

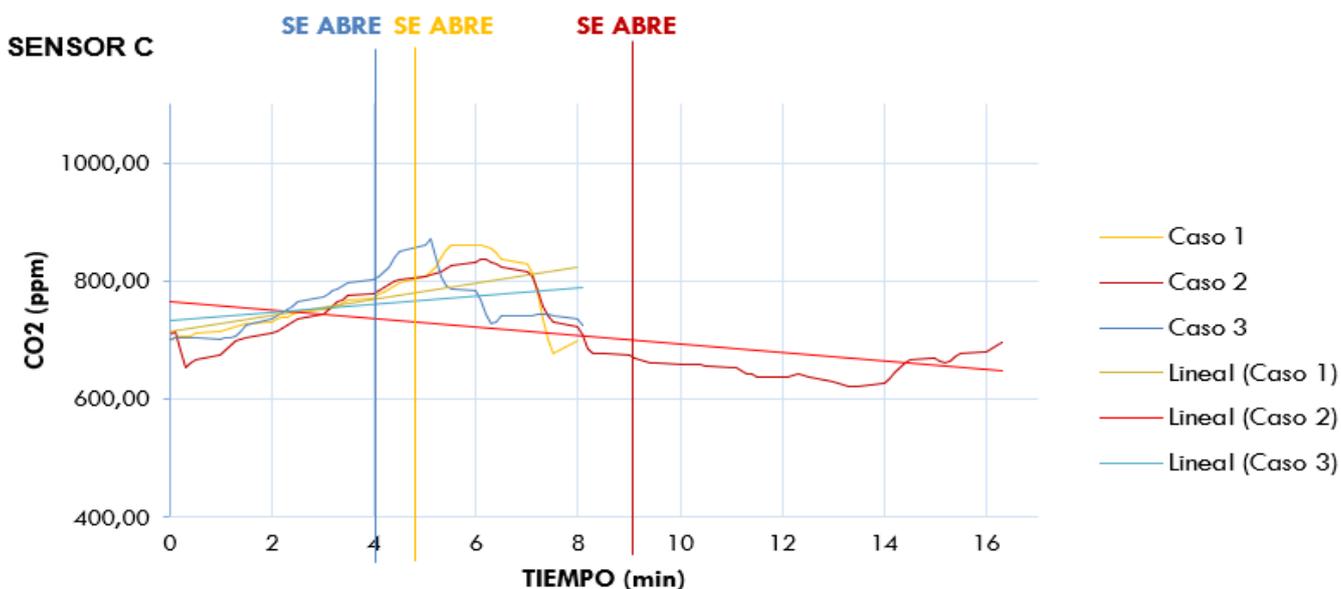
Se aprecia que con el sensor B ocurre algo parecido a lo sucedido con el A. La ventilación que proporciona la apertura de las dos ventanas del aula, sumado a la ventilación cruzada que se produce con las ventanas del pasillo, del caso 1, hace que solo se requiera de 3 minutos para reducir de 1000 ppm a 750 ppm, el nivel de CO₂ presente en el ambiente.

Se observa también, que al igual que pasaba con el sensor A, el sensor B muestra que la apertura de una sola hoja de cada una de las dos ventanas del aula, del caso 2 de estudio, hace que los tiempos de reducción del CO₂ presente en el ambiente sean superiores a los de los otros dos casos.

Esto se aprecia en que para pasar de 1000 ppm a 750 ppm en el caso de estudio 3, se requiere tan solo de 4 minutos, frente a los 8 que se necesitan en el caso de estudio 2.



Gráfica 5. Comparación resultados CO₂ Sensor B en los diferentes casos de estudio.



Gráfica 6. Comparación resultados CO₂ Sensor C en los diferentes casos de estudio.

La Gráfica 6 vuelve a corroborar que la ventilación que se da en el caso 1 de estudio es la que mayor reducción del nivel de CO₂ presente en el aula permite en el menor tiempo, seguida del caso 3, y dejando en el último puesto al caso 2, donde esa bajada del número de partículas de CO₂ presentes por millón es más lenta. Este queda reflejado en la reducción tan pronunciada que se da a 7 minutos del comienzo de evaluación del caso 1.

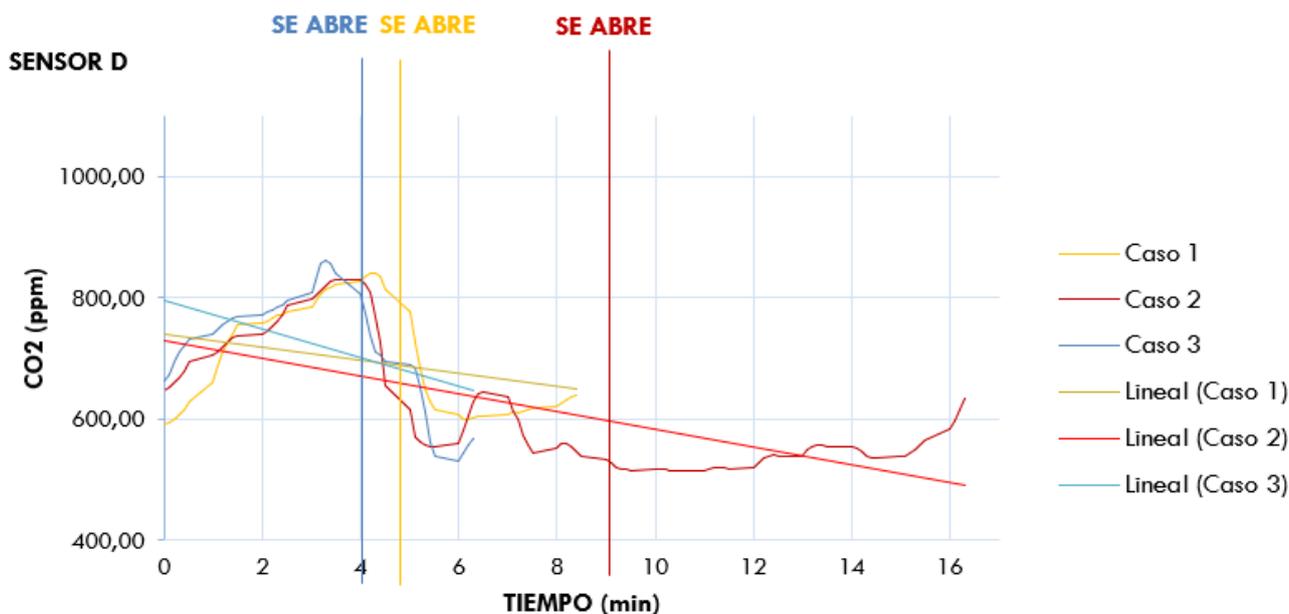
La Gráfica 7 muestra que, en el caso del sensor D, es el caso de estudio 3 el que mayor reducción de CO₂ experimente en el menor tiempo. Apreciando lo ocurrido entre el minuto 3 y el 6 de estudio, se aprecia que la pendiente de la curva azul, caso de estudio 3, es superior a la de la amarilla, caso de estudio 1.

Esta variación de los resultados respecto al resto de las gráfi-

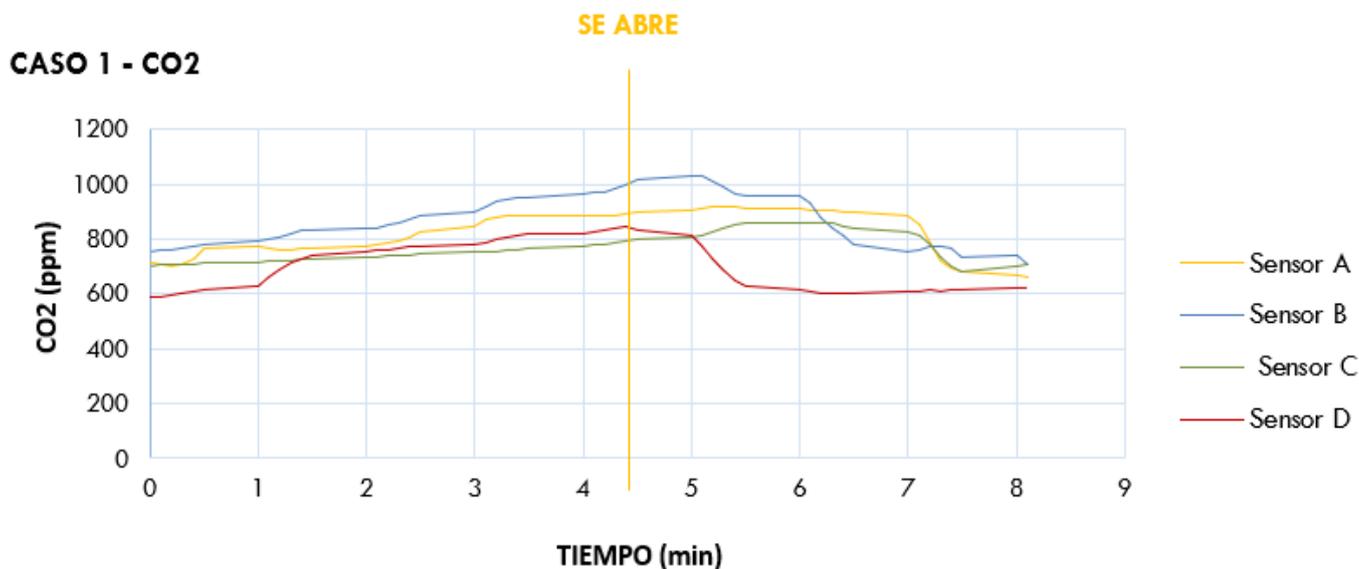
cas evaluadas, de los otros sensores, se debe al posicionamiento de estos y a la incidencia de aire sobre estos, es decir, a la velocidad con la que llega.

Como se indica en la Tabla 4, el sensor D es el más cercano a la ventana, el tiene el menor número de personas a su alrededor, y por tanto el que recibe el aire a una de las mayores velocidades registradas. Esto hace, que sea al sensor D, junto con el B a los que a mayor velocidad les llega el aire renovado.

Seguidamente, se muestra una comparativa de los datos de CO₂ obtenidos por los cuatro sensores instalados en el aula durante los tres casos de estudio diferente, para analizar como influye la ubicación de cada sensor en el aula en cada caso de estudio.



Gráfica 7. Comparación resultados CO₂ Sensor D en los diferentes casos de estudio..



Gráfica 8. Comparación resultados CO₂ caso de estudio 1 en los diferentes sensores.

La Gráfica 7 muestra que, en el caso del sensor D, es el caso de estudio 3 el que mayor reducción de CO₂ experimente en el menor tiempo. Apreciando lo ocurrido entre el minuto 3 y el 6 de estudio, se aprecia que la pendiente de la curva azul, caso de estudio 3, es superior a la de la amarilla, caso de estudio 1.

Esta variación de los resultados respecto al resto de las gráficas evaluadas, de los otros sensores, se debe al posicionamiento de estos y a la incidencia de aire sobre estos, es decir, a la velocidad con la que llega.

Como se indica en la Tabla 4, el sensor D es el más cercano a la ventana, el tiene el menor número de personas a su alrede-

dor, y por tanto el que recibe el aire a una de las mayores velocidades registradas. Esto hace, que sea al sensor D, junto con el B a los que a mayor velocidad les llega el aire renovado.

Seguidamente, se muestra una comparativa de los datos de CO₂ obtenidos por los cuatro sensores instalados en el aula durante los tres casos de estudio diferente, para analizar como influye la ubicación de cada sensor en el aula en cada caso de estudio.

La Gráfica 8: Comparación resultados CO₂ caso de estudio 1 en los diferentes sensores. muestra que durante el tiempo que el aula carece de ventilación, el nivel de CO₂ marcado por todos y cada uno de los sensores posicionados en el aula aumenta progresivamente, pero siempre marcando valores inferiores al sensor B, lo que indica que el sensor B es el más desfavorable cuando no se produce ventilación en el aula, y el más favorable cuando sí, es decir, el que más rápido aumenta su nivel de CO₂ cuando no se produce ventilación, y el que más rápido disminuye este valor cuando sí, o lo que es lo mismo, el que mayor corriente de aire recibe, lo que era de esperar al analizar las velocidades con las que le aire incide sobre cada uno de los sensores.

A los valores marcados por este sensor, le sigue los del sensor A y el D, donde la bajada del nivel de CO₂ es mucho más pronunciada que la subida de este. En el caso del sensor C, los valores de CO₂ marcados por este son bastante lineales, puesto que en la posición en al que se encuentra, tanto la ventilación como la respiración de las personas, no indican de forma muy directa.

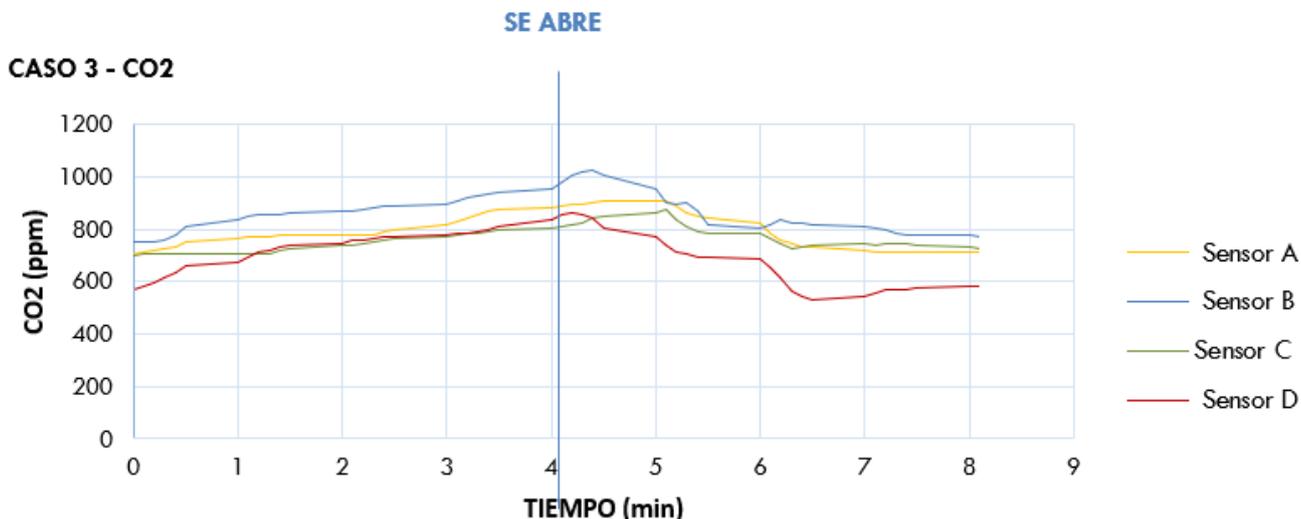
En la Gráfica 9 se observa que durante el tiempo que el aula carece de ventilación, el nivel de CO₂ marcado por todos y cada uno de los sensores posicionados en el aula aumenta progresivamente, al inicio, es el sensor B el que marca los valores más altos de este, y a partir del momento en el que se produce la ventilación, es el sensor A el que registra estos mayores valores. Esto es debido a que, aunque el sensor B es el más desfavorable en cuanto a personas a su alrededor, al ventilar con una sola hoja de cada ventana, el sensor B sí que recibe parte de ventilación mientras que, al sensor A, apenas llega algo de este aire renovado.

El sensor C y D siempre son los que menores cantidades de partículas por millón de CO₂ presentes en el ambiente marcan. Aunque inicialmente, los valores marcados por ambos son bastante parecidos, al empezar a ventilar, el nivel de CO₂ marcado por el sensor C se queda por encima del sensor D, ya que sobre el D es sobre el que mayor cantidad de aire renovado incide, y por tanto el que menores valores de CO₂ va a marcar.

CASO 2 - CO₂



Gráfica 9. Comparación resultados CO₂ caso de estudio 2 en los diferentes sensores.



Gráfica 10. Comparación resultados CO₂ caso de estudio 3 en los diferentes sensores.

Al observar el comportamiento de los cuatro sensores, en la Gráfica 10, durante el tiempo en el cual la ventilación se ve limitada, los niveles de CO₂ aumenta de manera progresiva, siendo el sensor B el que se mantiene por encima de los otros sensores en todo momento. Una vez abiertas las ventanas y puerta se observan que el comportamiento de los sensores es más heterogéneo, siendo el sensor D, el que alcanza los menores valores de ppm CO₂. Estos resultados del sensor D se deben a que debido a su ubicación es el que cuenta con mayor cantidad de aire renovado. El sensor A registra valores similares a los del sensor C, con una tendencia y media similar alcanzando valores máximos cercanos cerrando el caso 3 en prácticamente la misma cantidad de CO₂.

Una vez analizados los datos de niveles de CO₂ obtenidos por cada uno de los sensores en los diferentes casos de estudio, se realiza una comparación del promedio de temperaturas y humedades relativas recogidas por cada uno de los sensores en los diferentes casos de estudio, obteniendo los resultados mostrados en la Gráfica 11.

La Gráfica 11. muestra que, a medida que pasa el tiempo con todos los puntos posibles de ventilación cerrados, el porcentaje de humedad relativa presente en el ambiente aumenta. Esto es debido a que, al carecer de vía de incorporación de aire renovado, las respiraciones de las personas del interior del aula así como la humedad que esta crea, hace que se eleve el nivel de CO₂ presente en esta y por consecuencia la humedad relativa.

Tras abrir las ventanas y permitir una ventilación de la clase, el porcentaje de humedad relativa baja tanto para el caso de estudio 1 como para el 2 y el 3. En el caso de estudio 1, la gran superficie de ventilación de la que se dispone hace que esta reducción de humedad relativa sea la de mayor pendiente, es decir, la que mayor porcentaje disminuye en el menor tiempo. A este caso le sigue el caso 3, donde esta disminución también es destacable, pero en menor medida. En el caso 2, la apertura de únicamente la mitad de la superficie de las ventanas de las que dispone el aula hace que el porcentaje de humedad relativa presente disminuya más lentamente.

Se aprecia que, con la temperatura en los diferentes casos de estudio ocurre lo mismo que con la humedad relativa.

Además, se observa también a medida que pasa el tiempo, con el aula ocupada por 25 personas, se producen variaciones en los promedios de la temperatura en los diferentes casos de estudio, aunque esta siempre se mantiene entre los 19,8 – 21 °C.

El promedio de temperaturas aumenta, experimentando variaciones de subidas mientras se mantienen cerradas las ventanas y la puerta del aula, y bajadas al abrir estas para ventilar, sabiendo que, en la mayoría de los casos la curva superior es superior, la marcada por el sensor B, el cual, en cuanto a presencia de personas a su alrededor, es el más desfavorable. Esto es debido a que el cuerpo humano desprende calor a mayor velocidad de la que entra aire frío por las ventanas o puertas del aula.



Gráfica 11. Comparación del promedio de temperatura y humedad relativa de los sensores A, B, C y D en los diferentes casos de estudio.

4. CONCLUSIONES

A partir de los casos de estudio los primeros dos días, 12 de marzo y 9 de abril, en el cual la apertura y cierre de ventanas se realizó de manera aleatoria, se reconocen tres hitos, los cuales muestran resultados similares entre sí. Se reconoce que, durante el período de recreo, en el cual no hay alumnos en la sala, el nivel de CO₂ alcanza los mínimos en ambos casos. Un segundo hito reconoce el cierre de persianas el cual afecta en un alza de CO₂ en ambos casos y finalmente la apertura y cierre de ventanas genera fluctuaciones destacables en un corto período de tiempo. Concluyendo así en estos dos casos que la apertura de ventanas de la clase implica una mayor superficie de ventilación y por lo tanto menores valores de CO₂.

Tras los estudios realizados a partir de los hitos anteriores donde se pretende evaluar la concentración de CO₂ en un aula escolar como forma de optimizar la ventilación natural y garantizar un nivel de CO₂ óptimo para las condiciones de aprendizaje, se concluye que:

- ◆ La variable que más afecta en la reducción de los niveles de CO₂ en el aula es proporcional a la superficie de ventilación directa, es decir a mayor superficie de entrada de aire renovado, mayores reducciones de niveles de CO₂ en el tiempo.
- ◆ La ventilación cruzada proporcionada por las ventanas del pasillo no supone una variación de resultados considerable, sin embargo, no se cuenta con suficientes datos y mediciones respecto a esta investigación, por lo tanto no es posible realizar una conclusión determinante.
- ◆ La posición dentro del aula afecta respecto a los niveles de CO₂, observando que en las zonas más alejadas de la superficie de ventilación existe un mayor nivel de CO₂ debido a una menor velocidad de llegada de aire renovado.
- ◆ La concentración de personas en una menor superficie del aula implica mayores niveles de CO₂, a causa de mayor exhalación de CO₂.

Estos resultados se encuentran alineados con los resultados obtenidos de las investigaciones analizadas previamente, en donde de mantenerse las ventanas cerradas no se cumple con los estándares óptimos para el nivel de educación, no obstante, como una futura línea de investigación se podrían realizar mediciones con diferentes temperaturas y condiciones climáticas.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Instituto de Educación Superior Ramito Maeztu por facilitarnos la toma de mediciones y a la Escuela Técnica

Superior en Edificación por facilitarnos los implementos de medición utilizados en nuestras pruebas.

5. REFERENCIAS

- [1] Worldometer, «COVID Live Update: 154,298,022 Cases and 3,229,325 Deaths from the Coronavirus - Worldometer», may 04, 2021. <https://www.worldometers.info/coronavirus/> (accedido may 04, 2021).
- [2] European Centre for Disease Prevention and Control, «Rapid Risk Assessment: Increased transmission of COVID-19 in the EU/EEA and the UK», European Centre for Disease Prevention and Control, oct. 23, 2020. <https://www.ecdc.europa.eu/en/publications-data/covid-19-risk-assessment-increased-transmission-thirteenth-update> (accedido may 04, 2021).
- [3] CDC, «Coronavirus Disease 2019 (COVID-19)», Centers for Disease Control and Prevention, feb. 11, 2020. <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/science/science-briefs/scientific-brief-sars-cov-2.html> (accedido may 04, 2021).
- [4] World Health Organization, «Coronavirus disease (COVID-19): How is it transmitted?», dic. 13, 2020. <https://www.who.int/news-room/q-a-detail/coronavirus-disease-covid-19-how-is-it-transmitted> (accedido may 04, 2021).
- [5] Y. Li et al., «Evidence for probable aerosol transmission of SARS-CoV-2 in a poorly ventilated restaurant», medRxiv, 2020, doi: 10.1101/2020.04.16.20067728.
- [6] S. L. Miller et al., «Transmission of SARS-CoV-2 by inhalation of respiratory aerosol in the Skagit Valley Chorale superspreading event», *Indoor Air*, vol. 31, n.o 2, pp. 314-323, mar. 2021, doi: 10.1111/ina.12751.
- [7] Y. Shen et al., «Community Outbreak Investigation of SARS-CoV-2 Transmission Among Bus Riders in Eastern China», *JAMA Internal Medicine*, vol. 180, n.o 12, pp. 1665-1671, dic. 2020, doi: 10.1001/jamainternmed.2020.5225.
- [8] K. A. Prather, L. C. Marr, R. T. Schooley, M. A. McDiarmid, M. E. Wilson, y D. K. Milton, «Airborne transmission of SARS-CoV-2», *Science*, vol. 370, n.o 6514, pp. 303-304, 2020, doi: 10.1126/science.abf0521.
- [9] D. K. Milton, «A Rosetta Stone for Understanding Infectious Drops and Aerosols.», *J Pediatric Infect Dis Soc*, vol. 9, n.o 4, pp. 413-415, sep. 2020, doi: 10.1093/jpids/piaa079.
- [10] World Health Organization, «Coronavirus disease (COVID-19) advice for the public», abr. 09, 2021. <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/advice-for-public> (accedido may 04, 2021).
- [11] M. Z. Salas Javier, «A room, a bar and a classroom: how the coronavirus is spread through the air», EL PAÍS, oct. 28, 2020. <https://english.elpais.com/society/2020-10-28/a-room-a-bar-and-a-class-how-the-coronavirus-is-spread-through-the-air.html> (accedido may 04, 2021).
- [12] J. S. Zafra Mariano, «An analysis of three Covid-19 outbreaks: how they happened and how they can be avoided», EL PAÍS, jun. 17, 2020. https://english.elpais.com/spanish_news/2020-06-17/an-analysis-of-three-covid-19-outbreaks-how-they-happened-and-how-they-can-be-avoided.html (accedido may 04, 2021).
- [13] Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences at the University of Colorado Boulder, «COVID-19 Airborne Transmission Tool Available», CIRES, jun. 25, 2020. <https://cires.colorado.edu/news/covid-19-airborne-transmission-tool-available> (accedido may 04, 2021).

- [14] Gobierno de España, «Evaluación del riesgo de transmisión de sars cov-2 mediante aerosoles», Ministerio de Sanidad. Dirección General de Salud Pública: Subdirección General de Sanidad Ambiental y Salud Laboral, nov. 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.msrebs.gob.es/profesionales/saludPublica/ccayes/alertasActual/nCov/documentos/COVID19_Aerosoles.pdf.
- [15] D. A. Christopherson, W. C. Yao, M. Lu, R. Vijayakumar, y A. R. Sedaghat, «High-Efficiency Particulate Air Filters in the Era of COVID-19: Function and Efficacy», *Otolaryngology - Head and Neck Surgery (United States)*, vol. 163, n.o 6, pp. 1153-1155, 2020, doi: 10.1177/0194599820941838.
- [16] S. Ham, «Prevention of exposure to and spread of COVID-19 using air purifiers: challenges and concerns», *Epidemiology and Health*, vol. 42, 2020, doi: 10.4178/epih.e2020027.
- [17] Gobierno de España y Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, RITE - Reglamento instalaciones térmicas en los edificios. 2007.
- [18] Harvard T.H. Chan School of Public Health, «5 Step Guide to Checking Ventilation Rates in Classrooms», *Schools For Health*. <https://schools.forhealth.org/ventilation-guide/> (accedido may 04, 2021).
- [19] ASHRAE, «The Standards for Ventilation and Indoor Air Quality | Standards 62.1 & 62.2», ASHRAE, 2018. <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standards-62-1-62-2> (accedido may 04, 2021).
- [20] Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo, «La ventilación como medida preventiva frente al coronavirus SARS-CoV-2 - Portal INSST - INSST», Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo, Ministerio de trabajo y Economía Social de España, ene. 2021. Accedido: may 04, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.insst.es>.
- [21] P. F. Pereira y N. M. M. Ramos, «The impact of mechanical ventilation operation strategies on indoor CO₂ concentration and air exchange rates in residential buildings», *Indoor and Built Environment*, p. 1420326X20960767, oct. 2020, doi: 10.1177/1420326X20960767.
- [22] H. B. Stage, J. Shingleton, S. Ghosh, F. Scarabel, L. Pellis, y T. Finnie, «Shut and re-open: the role of schools in the spread of COVID-19 in Europe», *medRxiv*, p. 2020.06.24.20139634, ene. 2020, doi: 10.1101/2020.06.24.20139634.
- [23] Consejo Superior de Investigaciones Científicas, «Guía para ventilación de las aulas CSIC». nov. 03, 2020, [En línea]. Disponible en: <https://www.csic.es/es/actualidad-del-csic/una-guia-del-csic-muestra-como-se-deben-ventilar-las-aulas-para-reducir-el>.
- [24] C. Bonell et al., «An evidence-based theory of change for reducing SARS-CoV-2 transmission in reopened schools», *Health & Place*, vol. 64, p. 102398, jul. 2020, doi: 10.1016/j.healthplace.2020.102398.
- [25] J. Panovska-Griffiths et al., «Determining the optimal strategy for reopening schools, the impact of test and trace interventions, and the risk of occurrence of a second COVID-19 epidemic wave in the UK: a modelling study», *The Lancet Child & Adolescent Health*, vol. 4, n.o 11, pp. 817-827, nov. 2020, doi: 10.1016/S2352-4642(20)30250-9.
- [26] M. Griffiths y M. Eftekhari, «Control of CO₂ in a naturally ventilated classroom», *Energy and Buildings*, vol. 40, n.o 4, pp. 556-560, ene. 2008, doi: 10.1016/j.enbuild.2007.04.013.
- [27] T. Salthammer et al., «Children's well-being at schools: Impact of climatic conditions and air pollution», *Environment International*, vol. 94, pp. 196-210, sep. 2016, doi: 10.1016/j.envint.2016.05.009.
- [28] S. Petersen, K. L. Jensen, A. L. S. Pedersen, y H. S. Rasmussen, «The effect of increased classroom ventilation rate indicated by reduced CO₂ concentration on the performance of schoolwork by children.», *Indoor Air*, vol. 26, n.o 3, pp. 366-379, jun. 2016, doi: 10.1111/ina.12210.
- [29] L. Chatzidiakou, D. Mumovic, y A. Summerfield, «Is CO₂ a good proxy for indoor air quality in classrooms? Part 1: The interrelationships between thermal conditions, CO₂ levels, ventilation rates and selected indoor pollutants», *Building Services Engineering Research and Technology*, vol. 36, n.o 2, pp. 129-161, ene. 2015, doi: 10.1177/0143624414566244.
- [30] F. R. d'Ambrosio Alfano, L. Bellia, y F. van Dijken, «Indoor Environment And Energy Efficiency In Schools», REHVA, 2010. <https://www.rehva.eu/eshop/detail/indoor-environment-and-energy-efficiency-in-schools> (accedido may 05, 2021).
- [31] Plataforma Edificatoria Passive House, «Publicación de Estudio de monitorización de colegios PEP», oct. 15, 2020. <http://www.plataforma-pep.org/noticias/1412-publicacion-de-estudio-de-monitorizacion-de-colegios-pep> (accedido may 04, 2021).
- [32] A. Alonso, J. Llanos, R. Escandón, J. J. Sendra, y P. Villoria-Sáez, «Effects of the COVID-19 Pandemic on Indoor Air Quality and Thermal Comfort of Primary Schools in Winter in a Mediterranean Climate.», *Sustainability (2071-1050)*, vol. 13, n.o 5, pp. 2699-2699-2699, mar. 2021, doi: 10.3390/su13052699.
- [33] R. O. for E. World Health Organization, «School environment: Policies and current status», Organización Mundial de la Salud, s. Copenhagen, 2015. [En línea]. Disponible en: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0009/276624/School-environment-Policies-current-status-en.pdf.
- [34] L. Stabile, A. Massimo, L. Canale, A. Russi, A. Andrade, y M. Dell'Isola, «The Effect of Ventilation Strategies on Indoor Air Quality and Energy Consumptions in Classrooms», *Buildings*, vol. 9, n.o 5, 2019, doi: 10.3390/buildings9050110.

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.