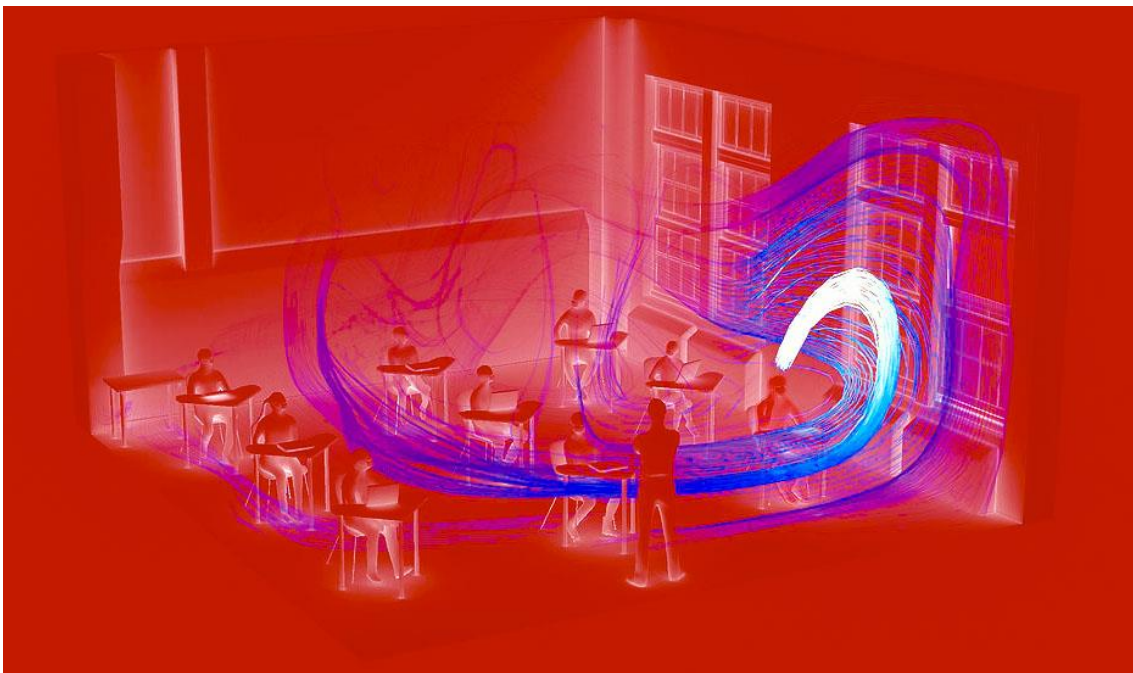


ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD AMBIENTAL DEL IES ARQUITECTO VENTURA RODRÍGUEZ



Ángela Rodríguez Gonzalo

Tutora: Esther Torres Gallego

IES Arquitecto Ventura Rodríguez

CURSO 2021-22

1. AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer al IES Arquitecto Ventura Rodríguez por brindarme la oportunidad de hacer este trabajo de investigación. A Esther Torres Gallego, mi tutora del trabajo, por su ayuda, correcciones y aportaciones. Al resto de profesores, por las charlas impartidas y a resolver las dudas que han surgido por el camino.

A Jose Ignacio Moreno, Catedrático de Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad Politécnica de Madrid, y gran amigo; por ayudarme a encontrar la idea para hacer este proyecto, sus consejos, correcciones y aportaciones durante todo este proceso.

A todas los que han tomado mediciones: mis compañeros de clase, de otras clases, y profesores.

A mis compañeros de clase “excelentes” por compartir esta experiencia y anécdotas de las que me acordaré siempre.

A mi familia, a mi madrina, a mis abuelos Chon, Ángela, Dioni y Pedro, por su apoyo, amor y ánimos, a mi madre por su paciencia y en especial a mi padre, por no matarme aquel día en el que se me olvidó darle al botón de guardar.

A mis amigas, porque a pesar de no tener ni idea, ofrecerse a ayudar y hacerme reír siempre.

A mi hermana Matilda por aguantarme cada día, a cada hora.

2. ABSTRACT

SARS-CoV-2 virus is transmitted through droplets, and aerosols, which are emitted when a person breathes, talks, sings, or shows symptoms of the infection, such as sneezing or coughing. Moreover, these aerosols remain in the air during a period, being inhaled by people around the infected person. In fact, it is more probable for them to spread if located in a closed space that is not well ventilated. Ventilation consists of the renovation of inside air with air from the outside. It may be carried out naturally, mechanically, or by purification. According to the recommendations established by the Community of Madrid, air quality in a classroom is healthy around 500 ppm.

In this project, air quality parameters from IES Arquitecto Ventura Rodríguez have been studied in order to know if SARS-CoV-2 could be transmitted. To enable this research, the different rooms from the IES have been classified as well as catalogued according to their function and size. Different parameters such as noise, temperature, humidity, and CO₂ concentration have been measured with two sensors, during a week, throughout the year 2021.

Finally, after making and analysing the charts with the obtained data, it has been concluded that when a room is well ventilated, its air quality is healthy. However, it is impossible to maintain natural ventilation due to external factors such as noise from the outside or low temperatures. Consequently, in the future, forced ventilation systems should be installed.

INDICE

1. AGRADECIMIENTOS	1
2. ABSTRACT	2
3. INTRODUCCIÓN	4
4. OBJETIVO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....	5
5. MARCO TEÓRICO	6
5.1.PROPAGACIÓN DEL SARS-COV-2 MEDIANTE AEROSOLES	6
5.2.VENTILACIÓN DE INTERIORES	7
5.2.1.VENTILACIÓN NATURAL	9
5.2.2.VENTILACIÓN MECÁNICA	9
5.2.3.PURIFICACIÓN.....	10
5.3.NORMATIVA DE VENTILACIÓN EN LAS AULAS.....	11
6. MARCO PRÁCTICO	12
6.1.CARACTERIZACIÓN DE LAS INSTALACIONES DEL IES ARQUITECTO VENTURA RODRÍGUEZ	12
6.2.METODOLOGÍA DE TOMA DE MEDIDAS.....	12
6.3.DESCRIPCIÓN DE PARAMETROS A MEDIR	14
6.4.EXPLICACIÓN DEL PROCESO DE MEDICIÓN	14
7. ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS.....	16
8. CONCLUSIONES	23
9. BIBLIOGRAFÍA.....	24

3. INTRODUCCIÓN

El lunes 9 de marzo de 2020, la Comunidad de Madrid anuncia el cierre provisional de centros educativos con el fin de evitar la propagación de un desconocido virus. Dos días más tarde, la OMS (Organización Mundial de la Salud) declara la situación creada por el virus SARS-CoV-2 pandemia mundial.

El cierre de centros educativos se basaba en el contexto de las pandemias de la gripe, en las que las tasas de contagio son más altas en la infancia que en la población adulta. Lo contrario que el SARS-CoV-2, que afecta más a la población adulta.

Los últimos avances científicos en relación con la transmisión del virus indican que hay dos posibles vías de transmisión: el contacto con superficies contaminadas (con la posible contaminación de los ojos o boca), y la respiratoria (inhalando partículas susceptibles al virus). Por esto, la “vuelta al cole” en septiembre de 2020, trajo consigo nuevas medidas de prevención de la propagación del SARS-CoV-2 en las aulas. Entre estas, se incluyen el uso de mascarilla, la distancia de seguridad (1,5m), la limitación de aforos, el uso de gel hidroalcohólico y la desinfección y ventilación de las aulas.

Esta última medida se podría considerar la más efectiva en cuanto a la transmisión por la vía respiratoria (aerosoles) y la más desconocida. En ciertas épocas del año, debido a temperaturas extremas, las ventanas tienden a permanecer cerradas durante horas o días. Está demostrado que solo la apertura de ventanas durante unos minutos antes y después del inicio de las clases, no asegura una calidad de aire interior adecuada. En el momento en el que se cierran las ventanas, la concentración de contaminantes en el aire se incrementa, llegando a valores altos y aumentando la concentración de aerosoles susceptibles a contener el virus, así como la posibilidad de contagiar a los presentes en el aula.

Aun así, durante el primer trimestre de actividad educativa presencial del curso 2020-2021 en España, el número de brotes en centros educativos ha sido bajo en proporción con los generados en entornos familiares o comunitarios.

El 25 de octubre de 2020, el diario El País publica un estudio sobre la transmisión del SARS-CoV-2 en un salón, un bar y una clase. La lectura de este artículo nos debe llevar a preguntarnos cómo es la calidad del aire en las aulas del IES Arquitecto Ventura Rodríguez.

4. OBJETIVO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

La reanudación de la docencia en colegios e institutos durante el curso 20-21 y las medidas de prevención adoptadas en los mismos nos deben llevar a plantearnos si estas son suficientes o si, por el contrario, podemos relajarlas. También es conveniente establecer mecanismos de prevención que nos permitan identificar situaciones de riesgo epidemiológico.

Partiendo de las siguientes hipótesis:

- ¿Es óptima la calidad del aire en el IES?
- ¿Existe ventilación en las aulas?
- ¿Cumple el sistema de ventilación en las aulas las necesidades establecidas por la normativa y recomendaciones actuales?

El objetivo de este trabajo es el desarrollo de un estudio de la calidad de parámetros medioambientales en el IES Arquitecto Ventura Rodríguez con el fin de conocer el nivel de riesgo de propagación del SARS-CoV-2 a través de aerosoles en las diferentes estancias del centro, así como la propuesta de posibles soluciones y mejoras a la hora de acondicionar las estancias con la finalidad de reducir dicho riesgo.

Este trabajo de investigación se desarrolla en dos fases. Inicialmente se realizará un estudio teórico que incluirá la revisión de la normativa más relevante aplicable, identificando los parámetros medioambientales objetivo, así como sus umbrales aceptables para un entorno educativo. También se hará una caracterización de los espacios que conforman el IES Arquitecto Ventura Rodríguez en función de su utilización y riesgo, para en una segunda fase realizar un estudio experimental que mida los parámetros en estancias seleccionadas. Este estudio experimental se ha llevado a cabo durante los últimos meses del curso 20-21 y el comienzo del 21-22 y ha supuesto el uso de distintos sensores medioambientales en diversas ubicaciones previamente seleccionadas. A partir del estudio se extraen conclusiones y se sugiere el uso futuro de distintas acciones de mejora.

5. MARCO TEÓRICO

5.1. PROPAGACIÓN DEL SARS-COV-2 MEDIANTE AEROSOL

Todas las personas al respirar o hablar emiten aerosoles de distintos tamaños a través de sus vías respiratorias. Así, las personas con una infección respiratoria emiten aerosoles con patógenos, denominados bioaerosoles. Dependiendo de la densidad y tamaño de estos aerosoles, el comportamiento aerodinámico de estos es distinto. Las partículas con un tamaño entre 100 μm y 300 μm , se consideran de carácter “balístico”, siendo junto a las gotículas la principal vía de transmisión del virus. Estas, procedentes de las vías respiratorias superiores, son capaces de alcanzar e impactar en zonas susceptibles de una persona cercana (nariz, ojos o boca) y causar una infección; además de ser depositadas, en pocos segundos debido al efecto de la gravedad, en superficies a distancia de 2 metros desde la persona que las ha emitido.

Las partículas de tamaño mayor a 300 μm se denominan gotículas. Al igual que los bioaerosoles, vencen la resistencia del aire y se depositan en zonas susceptibles y distancias menores a dos metros.

Las partículas de tamaño menor a 100 μm se consideran verdaderamente aerosoles, puesto que a diferencia de las partículas de carácter “balístico”, estas quedan suspendidas en el aire y se condensan (especialmente en espacio cerrados con escasa ventilación) durante un tiempo variable, que dista desde segundos hasta un máximo de tres horas, pudiendo ser inhaladas por las personas a una distancia superior de dos metros del emisor, así como en ausencia de este. Estos se originan mayoritariamente al hablar o respirar (normalmente de tamaño $\leq 2,5 \mu\text{m}$) generando más de 500 por litro de aire respirado, y al hablar emitiendo 10 veces más partículas que estando en silencio. También pueden producirse a partir de la evaporación de las partículas de mayor tamaño depositadas en las superficies cercanas; por cada gotícula emitida se liberan alrededor de 1200 aerosoles. Dependiendo del comportamiento aerodinámico y tamaño, los aerosoles pueden alcanzar diferentes partes de la vía respiratoria; los aerosoles de tamaño menor o igual a 5 μm tienen capacidad para alcanzar el alveolo, los aerosoles desde 5 μm a 15 μm pueden llegar a la tráquea y los bronquios principales, mientras que los aerosoles desde 15 μm a 100 μm solo alcanzan las vías respiratorias superiores (Ministerio de Sanidad, 2020).

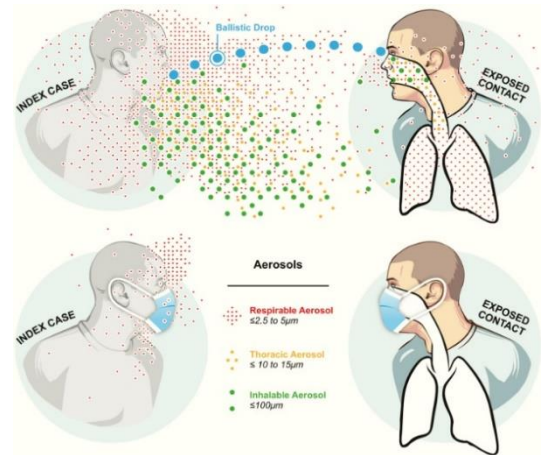


Fig 1: Propagación del Sars-CoV-2 mediante aerosoles (Fuente: Milton. A Rosetta Stone for Understanding Infectious Drops and Aerosols. Journal of the Pediatric Infectious Diseases Society)

5.2. VENTILACIÓN DE INTERIORES

La ventilación es el proceso de suministrar aire del exterior y retirar aire del interior de un espacio, con el fin de controlar los niveles de contaminación de este, potencialmente ligados a la humedad y/ o temperatura del aire en este espacio.

Aunque la transmisión del Sars-CoV-2 mediante los bioaerosoles (aquellos de tamaño mayor a $100\mu\text{m}$) es altamente probable en cualquier espacio y situación, incluso al aire libre, la transmisión del virus mediante los propios aerosoles se da en casos más específicos: mayoritariamente en espacios cerrados con escasa ventilación y altos aforos de personas que permanecen durante largos periodos de tiempo en dicho espacio.

Para evitar la propagación, se recomienda la ventilación de los espacios propensos a una posible transmisión. Con un correcto sistema de ventilación, mantenimiento y purificación del aire, las posibilidades de transmisión del SARS-CoV-2 pueden reducirse exponencialmente. La ventilación puede hacerse de manera natural o mecánica.

La ventilación o renovación del aire se denomina mediante las siglas ACH, del inglés **A**ir **C**hanges per **H**our. Se mide en los cambios de aire por hora, pues es el cociente entre la tasa de flujo de aire que entra en un espacio (m^3/h) y el volumen de la sala (m^3). Si un espacio tiene 1 ACH quiere decir que en este se da una renovación de aire por hora. Por lo tanto, en una hora entra en un determinado espacio el mismo volumen de aire exterior que de aire interior. Teniendo en cuenta la continua mezcla de aire, en una hora, se renueva el 63% del aire. Con dos renovaciones es el 86% mientras que con 3 es el 95%. Consecuentemente, para una renovación del 100% se necesitarían más renovaciones de

aire por hora. La guía de ventilación de Harvard, realizada en octubre de 2020, recomienda entre 5 y 6 ACH en aulas de $100m^2$ con una media de 25 estudiantes. (Harvard TH Chan School of Public Health, 2020)

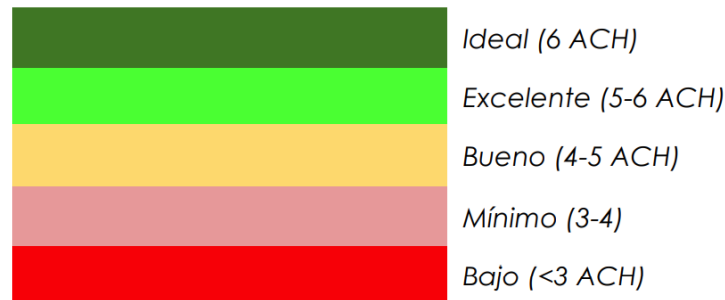


Fig 2. Clasificación de ACH de la guía de la Universidad de Harvard

Además de ACH, la ventilación se puede medir en litros por segundo (lps) por persona que entran del exterior. La misma guía, recomienda 14 lps por persona. Siendo la mínima recomendada de 12,5 lps por persona. La relación entre ambos parámetros (ACH y lps) es:

$$ACH = \frac{\text{lps por persona} \times n^{\circ} \text{ de personas} \times \frac{3600 \text{ segundos}}{1 \text{ hora}} \times \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ m}^3}}{\text{volumen de la sala (m}^3\text{)}}$$

La renovación del aire necesaria para cada espacio depende de varios factores: el volumen de la sala, el número de personas, su edad y sexo, la actividad llevada a cabo, o la incidencia de casos Covid-19 en la localidad. Se debe insistir que la renovación del aire es el intercambio con aire fresco exterior, los ventiladores convencionales no renuevan el aire interior con aire fresco del exterior, al contrario, lo remueven y dispersan provocando la dispersión de partículas susceptibles a contener el virus.

Para determinar si la ventilación de un espacio es correcta hay que basarse en la concentración de CO₂ en dicho espacio.

En el exterior la concentración de CO₂ es de aproximadamente 420 ppm (partículas por millón). En el interior, dependiendo del uso del edificio que determina la concentración de CO₂ adecuada para esa estancia, se establecen diferentes categorías de la calidad del aire interior (IDA del inglés **I**ndoor **A**ir **Q**uality).¹

¹ Anexo pág. 1, Tabla 1

Gracias a la relación entre la concentración de CO₂ en el interior y exterior de los edificios, es posible determinar si la ventilación en el espacio es correcta. La guía para ventilación en aulas del CSIC propone un diagrama de búsqueda de soluciones para mantener una correcta ventilación del aire². (Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua, 2020)

5.2.1. VENTILACIÓN NATURAL

Es la opción preferente. Se produce por medio de fuerzas naturales, como el viento, presión o diferencias de densidad del aire. Se da a través de la apertura de ventanas, puertas u otro tipo de apertura intencional en el espacio.

En las aulas, la más efectiva y recomendada es la ventilación cruzada, la cual consiste en la apertura de puertas y ventanas en lados opuestos de la sala, con el fin de favorecer la circulación del aire y garantizar el acaparamiento de todo el espacio.

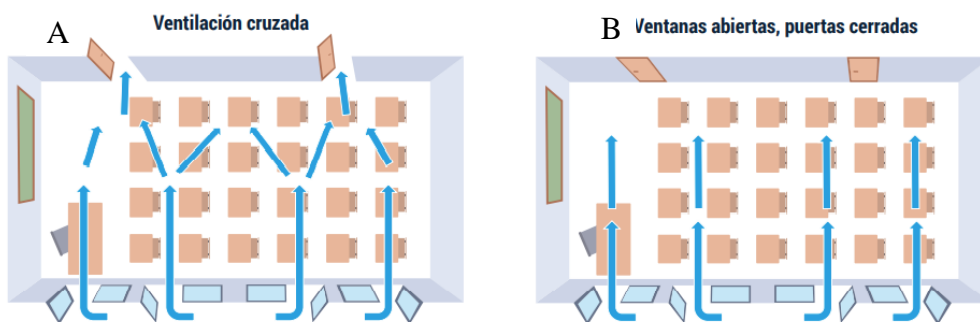


Fig 3: (A) Ejemplo de ventilación cruzada en un aula. (B) Ejemplo de ventilación con solo ventanas abiertas. (Fuente: Guía para ventilación en aulas del CSIC)

5.2.2. VENTILACIÓN MECÁNICA

En el caso de que la ventilación natural no sea suficiente o posible, se debe recurrir a la ventilación mecánica o forzada con el fin de obtener una adecuada renovación del aire.

La ventilación forzada consiste en aumentar la renovación del aire interior con el exterior con la utilización de instrumentación, como sistemas de ventilación o climatización.

² Anexo pág. 2, Figura 1.

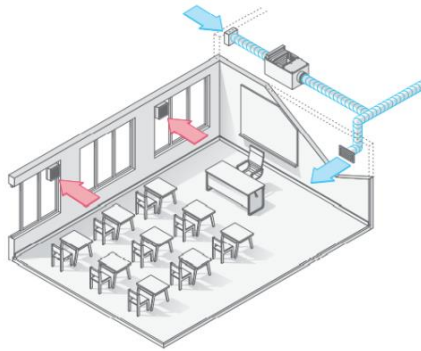


Fig 4: Ejemplo de ventilación forzada, en la que dos ventiladores extractores más una caja de ventilación inyectan aire limpio exterior filtrado. (Fuente: Catálogo de soluciones para ventilar sin abrir ventanas de S&P Sistemas de Ventilación)

- **Ventilación individual forzada**

Se puede conseguir mediante la impulsión (introducir aire del exterior) o la extracción (sacando aire del interior).

La toma de aire puede ser por la ventana, techo u orificio realizado para ello. También puede haber un punto de extracción de aire en una zona común, como un pasillo.

- **Ventilación forzada centralizada**

Consiste en sistemas de ventilación comunes para todo el edificio o gran parte, con el fin de aumentar la renovación de aire interior con el exterior, maximizando la cantidad de aire exterior con respecto al aire recirculado.

El aire recirculado también se puede filtrar mediante la introducción de un filtro en el sistema.

5.2.3. PURIFICACIÓN

La purificación del aire consiste en eliminar las partículas en suspensión, susceptibles a contener el virus del aire interior mediante el uso de filtros.

Se puede utilizar más de un purificador, colocando este en el centro del aula si es posible.

En este caso, la filtración es el sistema más eficiente. En esta, se pasa el aire contaminado por un filtro de alto rendimiento, normalmente HEPA (High Efficiency Particulate Air), el cual retiene las partículas proporcionando aire limpio.

5.3. NORMATIVA DE VENTILACIÓN EN LAS AULAS

No existe una normativa de ventilación de aulas específica con respecto a la propagación del SARS-CoV-2 mediante aerosoles.

No obstante, la Comunidad de Madrid a través de la Subdirección General de Salud Pública propone a fecha de 8 de octubre de 2020 (Departamento de Salud Ambiental & Subdirección de Salud Pública , 2020), una serie de recomendaciones para favorecer la ventilación y reducir el riesgo de propagación del virus:

- El valor mínimo de renovación de aire debe ser de 12,5 lps por persona.
- Se debe hacer un uso continuado y máximo del caudal de los sistemas. Dos horas antes de la apertura y después del cierre se debe usar el máximo caudal, y durante el resto, usar bajo caudal.
- La recirculación del aire se debe reducir o eliminar.
- Inspección de recuperadores de calor, para evitar el paso de partículas superiores al 5% entre el aire de extracción e impulsión.
- En aseos o vestuarios, si hay sistemas de extracción, mantenerlos en funcionamiento continuo. Si se utiliza la ventilación natural, mantener las ventanas abiertas incluso si los espacios no están ocupados.
- Aumentar la ventilación natural, incluso en edificios con ventilación forzada.
- Mantener temperaturas entre 23-25°C.
- Mantener una humedad relativa en valores habituales entre el 30 y 70%.
- Para evitar la resuspensión de agentes contaminantes, las unidades terminales interiores como fancoils, unidades tipo split, o de expansión directa deben funcionar continuamente.
- En caso de filtración o purificación, se recomiendan sistemas portátiles (Filtros HEPA H13 o superior con más de un 99,5% de eficiencia) o centralizados (radiación ultravioleta corta UV-C)

También existen medidas con respecto al mantenimiento de los sistemas de ventilación:

- Revisión y limpieza periódica de sistemas, filtros de aire, y de unidades de impulsión y retorno.
- En caso de positivo de COVID-19, ventilación del espacio durante al menos 4 horas y limpieza de los equipos (rejillas de impulsión y retorno de aire, filtro de la unidad interior si hubiera).

6. MARCO PRÁCTICO

6.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS INSTALACIONES DEL IES ARQUITECTO VENTURA RODRÍGUEZ

El IES Arquitecto Ventura Rodríguez consta de un edificio principal de tres plantas, un segundo edificio destinado a gimnasio y un tercero donde se sitúa el salón de actos. En el edificio principal se ubican 38 aulas de tamaño estándar, 11 aulas más amplias, 10 aseos, 20 despachos, la sala de profesores, la cafetería y la biblioteca del centro. Para este estudio se han realizado durante el año 2021 mediciones de temperatura, humedad, ruido y CO₂, en aulas de tamaño estándar con diferentes orientaciones (este y oeste) y en diferentes plantas (primera y segunda); sala de profesores, salón de actos y en el gimnasio.

Dependiendo de la calidad de aire (IDA³) estas instalaciones se clasifican en dos grupos:

- IDA 2 (aulas de tamaño estándar, sala de profesores) con una concentración de CO₂ media de 500 ppm.
- IDA 3 (gimnasio, salón de actos) con 800 ppm.

Todas las estancias cuentan con ventanas y puertas para ventilar de forma natural, siempre que permanezcan abiertas, con huecos diseñados según la normativa técnica existente en el momento de construcción del edificio.

Se adjunta en el anexo una tabla resumen de los tipos de ubicaciones utilizados en las mediciones realizadas⁴.

6.2. METODOLOGÍA DE TOMA DE MEDIDAS

Para realizar las mediciones se han utilizado dos medidores de CO₂ diferentes, uno con conexión wifi a internet y otro portátil que opera de modo manual.

- **Medidor con conexión a Internet⁵**

En espacios como la sala de profesores, gimnasio y aulas, se ha usado el sensor de Netatmo, “Smart Indoor Air Quality Monitor”. Este sensor, mide la concentración de CO₂ (en un rango de 0 a 5000ppm), la temperatura (0-50°C), humedad (0-100%) y el ruido (35-120 dB). No funciona con batería interna, debe ser conectado a una fuente de alimentación cercana o una batería portátil. Para la transmisión de datos debe conectarse a

³ IDA: Indoor Air Quality

⁴ Anexo pág. 3 Tabla 2

⁵ Anexo pág. 4, Figura 2

una red wifi, volcándose los datos en una página web o en una aplicación móvil. Este aparato ha sido cedido por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicaciones de la Universidad Politécnica de Madrid

El sensor toma una medida nueva cada 5 minutos aproximadamente, pudiendo seguir la evolución de la calidad de aire de la sala mediante la aplicación móvil “Home Coach”⁶ o la web “home assistant”⁷, en la que es posible calibrar/configurar el sensor y descargar los datos en formato CSV/XSL. También se pueden seleccionar los datos que se quieren descargar, desde horas (para ver la evolución en un día) o periodos más largos, con el propósito de estudiar la evolución de la calidad de aire durante una semana.

- **Medidor Portátil⁸**

El medidor portátil utilizado fue aportado por el centro y utilizado en las mediciones realizada en aulas de 1ºC y 1ºE de Bachillerato. Se trata del medidor de CO₂ “PCE-CMM 10” del fabricante PCE Instruments. Este medidor, mide la concentración de CO₂ (400-5000 ppm), la humedad (0-100%) y temperatura (entre -10 y 50°C) de la sala donde se ubique. Estos datos, además de la hora, fecha y % de batería se muestran en la pantalla. Se trata de un medidor portátil que no se conecta a internet y dispone de una batería interna, siendo preciso cargarlo antes y después de cada uso. Posee una desconexión automática, por lo que, a las dos horas, el medidor se apaga para conservar la batería. Además, dispone de una alarma visual y acústica que, al superar las 1000 ppm, la pantalla cambia de color del blanco al rojo⁹, y una alarma acústica (un pitido) comienza a sonar. Esto advierte al usuario de que la calidad de aire no es óptima, aumentando el riesgo y posibilidades de contagio del SARS-CoV-2 y, por lo tanto, el usuario debe ventilar el espacio con el fin de reducir la concentración de CO₂ en el aire.

No existe ninguna aplicación o página web en la que se puedan visualizar o descargar los datos obtenidos por este sensor. En el caso de querer realizar un estudio, se deben anotar los datos manualmente.

⁶ Anexo pág. 4, Figura 3.

⁷ Anexo pág. 5, Figura 4

⁸ Anexo pág. 5, Figura 5

⁹ Anexo pág. 5, Figura 6

6.3. DESCRIPCIÓN DE PARAMETROS A MEDIR

Las variables a estudiar son:

- Concentración de CO₂: Determina si un espacio está siendo ventilado correctamente. Se mide en ppm (partículas por millón) y se clasifican de la siguiente manera:
 - En el exterior la concentración es de 420 ppm.
 - Desde 420 ppm a 800 ppm la calidad de aire se considera óptima.
 - Entre 800 ppm y 1000 ppm es aceptable.
 - Mientras que más de 1000 ppm se considera negativa.

En cuanto a la propagación por aerosoles, se considera que a partir de 700/800 ppm supone de riesgo de propagación de virus.

- Temperatura: Se refiere a la temperatura del interior de la sala, expresándose en grados centígrados (°C). La OMS recomienda mantener una temperatura mayor a 21°C, entre 23 y 25°C. Las temperaturas altas favorecen la concentración del virus en el caso de no haber ventilación.
- Humedad: Se expresa el porcentaje de humedad. Se suele mantener en valores entre el 30 y 70%. La OMS recomienda más del 40%. Un ambiente demasiado seco puede favorecer la concentración del virus en el aire.
- Ruido: Se expresa en decibelios (dB). Al hablar o gritar la emisión de aerosoles es 30 veces superior a estar en silencio. Por ello, niveles de ruido demasiado altos aumentan la cantidad de aerosoles susceptibles de propagar virus en el aire. La apertura de puertas o ventanas puede incrementar el ruido interno al que se une el ruido procedente del exterior. En escuelas, la OMS recomienda un nivel de 35dB¹⁰.

6.4. EXPLICACIÓN DEL PROCESO DE MEDICIÓN

Para realizar este estudio, se han llevado a cabo distintos procesos de medición, en los que se han utilizados los dos medidores de CO₂, los cuales no miden con la misma exactitud, pero con un rango asumible.

Del 21 de abril de 2021 al 14 de mayo de 2021, se midió en dos aulas de 1º Bachillerato durante 8 días lectivos con el medidor “PCE-CMM 10” aportado por el IES. Primero en

¹⁰ (Departamento de Salud Ambiental & Subdirección de Salud Pública , 2020)

el aula de 1ºE, del 21 al 30 de abril de 2021, y seguidamente del 5 al 14 de mayo de 2021 se midió en el aula de 1ºC.

Las medidas se tomaron manualmente cada 15 minutos durante una jornada escolar (desde las 8:30 hasta las 14:15 o 15:30). Se contabilizó el número de alumnos y alumnas, temperatura exterior y las variables aportadas por el medidor: temperatura interior, humedad y concentración de CO₂. También se anotó la apertura de puertas y ventanas. Todos los datos del medidor portátil fueron recogidos en tablas de Excel para posteriormente realizar el estudio¹¹.

Durante este proceso, se han identificado los siguientes problemas:

- El tiempo entre recogida de nuevos datos (15 min) es demasiado extenso.
- Al ser una toma de datos manual en las diferentes aulas, se ha requerido la ayuda de varios alumnos y docentes del centro.
- La toma de datos solo se realizaba mientras había personas en el aula, por tanto, no es posible realizar un estudio completo del día.
- Al alcanzar ciertos valores (>1000ppm) el medidor tendía a apagarse, dificultando la toma de datos.

En el segundo proceso se utilizó el medidor de Netamo “Smart Indoor Air Quality Monitor”. Primero, se midió en la sala de profesores, del 20 al 28 de mayo de 2021, y para ello, gracias a la ayuda de profesor de TICO, se creó un punto wifi con repetidor para poder conectar el medidor a internet. Una vez conseguida la conexión vía wifi, se colocó el medidor en la sala de profesores durante 8 días. Los datos obtenidos se podían ver en tiempo real desde la aplicación del móvil. Posteriormente, se midió en el gimnasio del 16 al 23 de septiembre de 2021, en el aula de 2º de bachillerato E del 24 septiembre al 21 de octubre y finalmente del 21 de octubre al 28 de octubre se midió en el salón de actos. Se adjuntan en el anexo una tabla resumen de las medidas realizadas¹² y un ejemplo de tabla de datos del medidor con conexión a internet¹³.

¹¹ Anexo pág. 6, Tabla 3

¹² Anexo pág. 7, Tabla 4

¹³ Anexo pág. 8, Tabla 5

7. ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS

Los datos obtenidos durante las mediciones de ambos medidores se han representado en gráficas con el fin de observar con claridad los resultados. En todos los casos estimamos que se han seguido las recomendaciones establecidas para realizar la medición, y tanto las ventanas como puertas han permanecido abiertas, ventilando la estancia.

En las aulas, observamos como, durante la semana, se muestra un comportamiento repetitivo con pequeñas variaciones. De lunes a viernes, los días lectivos, la concentración de CO₂ en el aire aumenta de 8h a 14h (horas de clase) y disminuye considerablemente por la tarde y por la noche, así como fines de semana. Si consideramos la media de CO₂ semanal, esta se encuentra alrededor de las 600 ppm, por lo que la calidad de aire sería óptima y saludable. Pero esta media computa muchas horas en la que las aulas no están ocupadas, por lo tanto, no se puede considerar real, ya que el estudio trata de analizar cuáles son las concentraciones en los periodos en los que el edificio se encuentra en funcionamiento. En la gráfica siguiente se demuestra que en las horas en las que se realiza la actividad docente, las concentraciones de CO₂ aumentan, existiendo picos con concentraciones superiores a 1400 ppm. Además, se observa como la media de concentración de CO₂ durante el periodo lectivo es bastante más alta (934 ppm) superando en casi el doble la cifra de calidad óptima (500 ppm IDA 2) así como de propagación del virus (750 ppm).

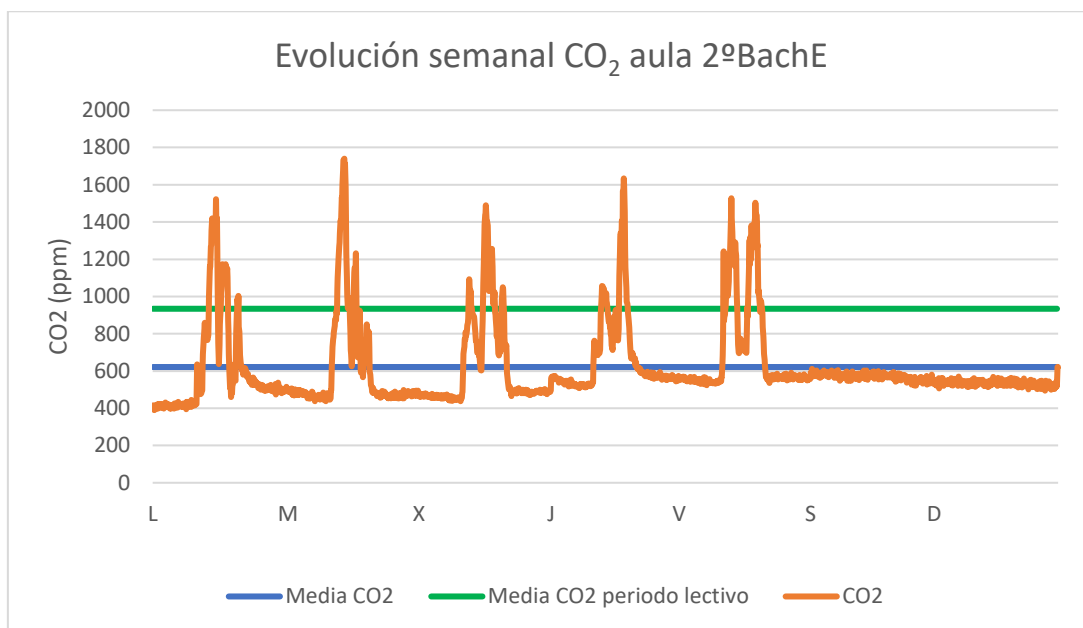


Fig 5 Evolución Media semanal CO₂ Aula 2º Bachillerato E

En la gráfica 6 se puede ver la evolución de la concentración de CO₂ en un día tipo donde se objetiva con más claridad el considerable aumento que se produce durante las horas lectivas.

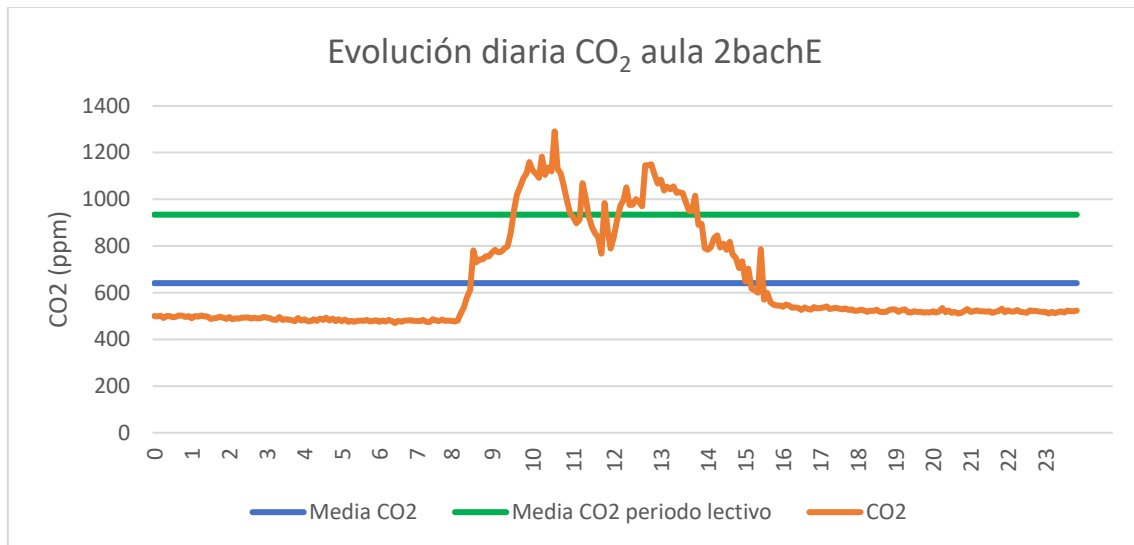


Fig 6 Evolución media diaria CO₂ Aula 2º Bachiller E

Como se puede observar en la gráfica siguiente; se ha constatado que cuando se procede al cierre de puertas, ventanas o persianas, la concentración de CO₂ en el aire se incrementa exponencialmente, dando lugar a una calidad de aire mala y al aumento de riesgo de propagación del SARS-CoV-2 por aerosoles. Se puede observar el incremento que se produce a partir de las 11:35 de la mañana, llegando a una concentración máxima de 2500 ppm en torno a las 12:30 (durante una clase completa), volviendo a bajar una vez se ventila el aula.

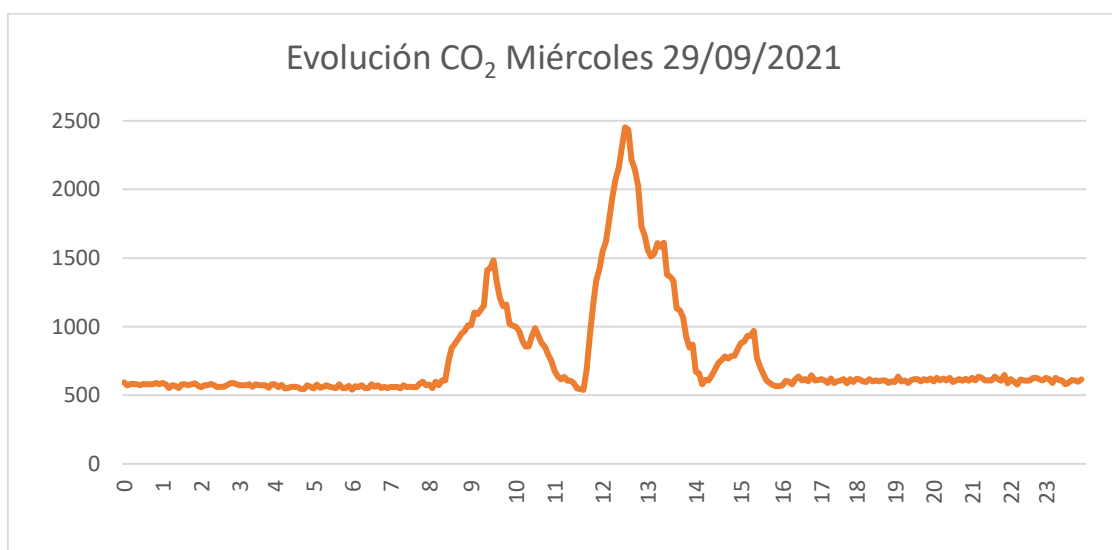


Fig 7 Aumento significativo de CO₂ por cierre de puertas/ventanas/persianas

En las aulas de 1ºBach E y C, solo se ha medido durante las horas lectivas ya que se ha usado el medidor portátil. Además, se evidencia como, al haber realizado las mediciones cada 15 min, las gráficas son menos precisas.

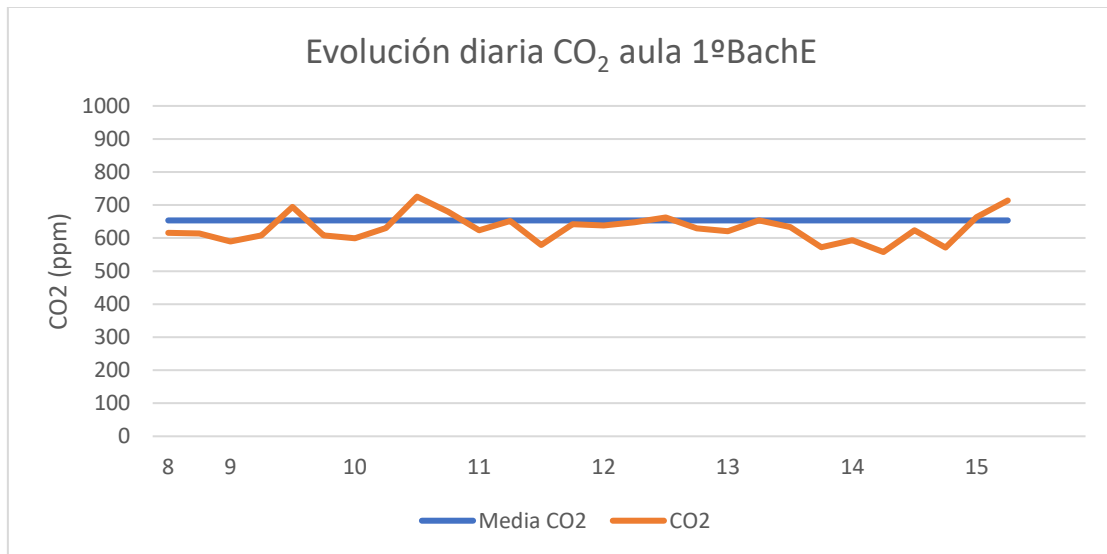


Fig 8 Evolución Media diaria (periodo lectivo) CO₂ Aula 1º Bachiller E

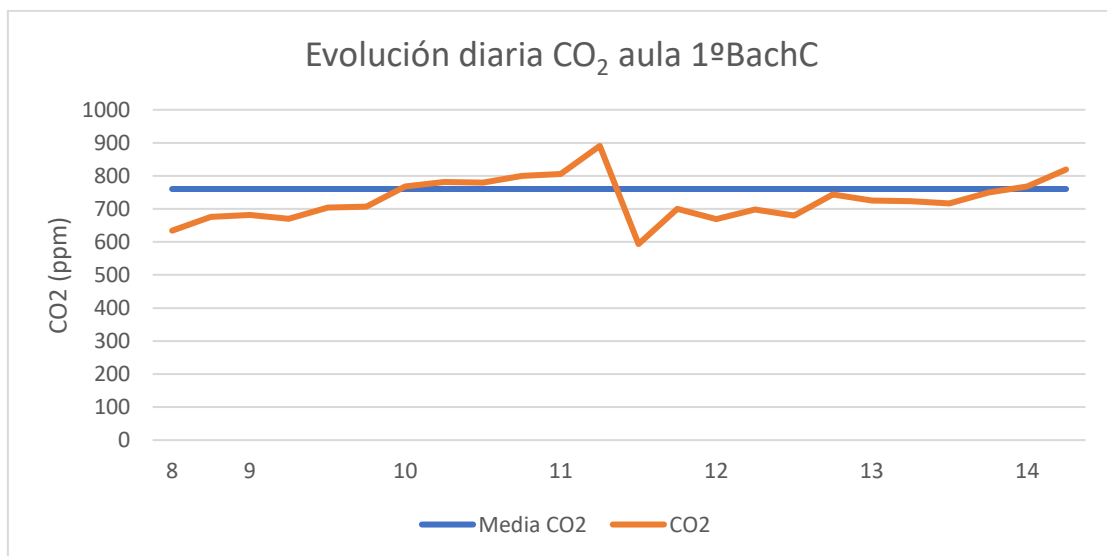


Fig 9 Evolución Media diaria (periodo lectivo) CO₂ Aula 1º Bachiller C

En la sala de profesores al igual que en las aulas, la concentración de CO₂ se repite durante los días lectivos, disminuyendo los fines de semanas. La calidad media del aire es óptima si se considera todas las horas del día a lo largo de una semana, pero si consideramos únicamente los periodos de ocupación de centro, la media oscila en torno a las 700 ppm, por lo que no hay riesgo de propagación del SARs-CoV-2, como hemos observado en las aulas anteriormente. No obstante, debido a la menor ocupación de esta sala, y la diferente actividad que se realiza en ella, las concentraciones de CO₂ no llegan a los niveles

observados en las aulas, por lo que la calidad del aire se puede considerar óptima, aunque debería estar por debajo de 500 ppm (IDA 2).

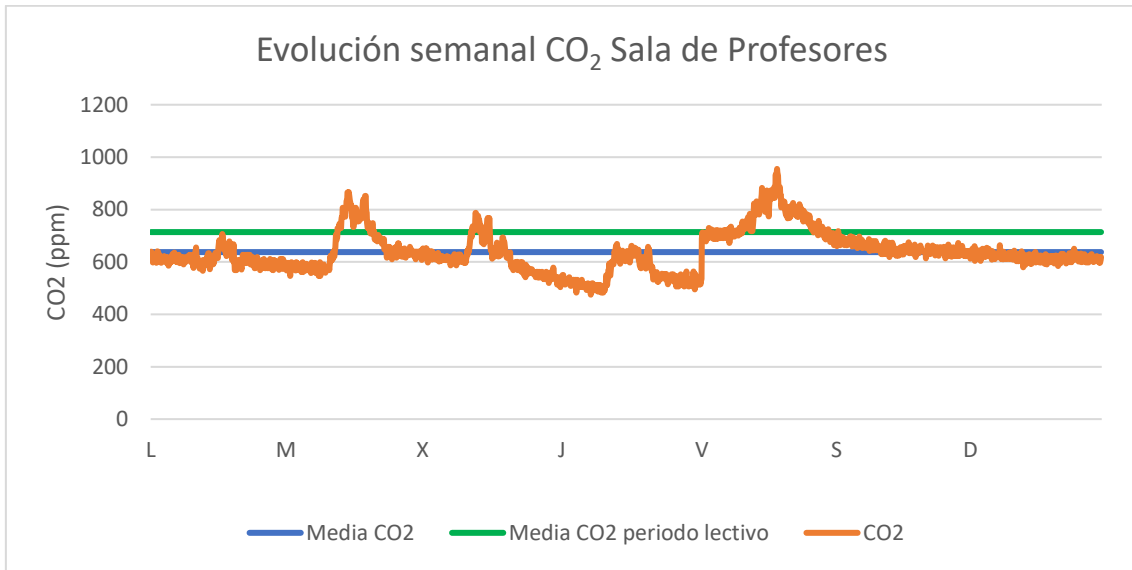


Fig 10 Evolución Media semanal CO₂ Sala de profesores

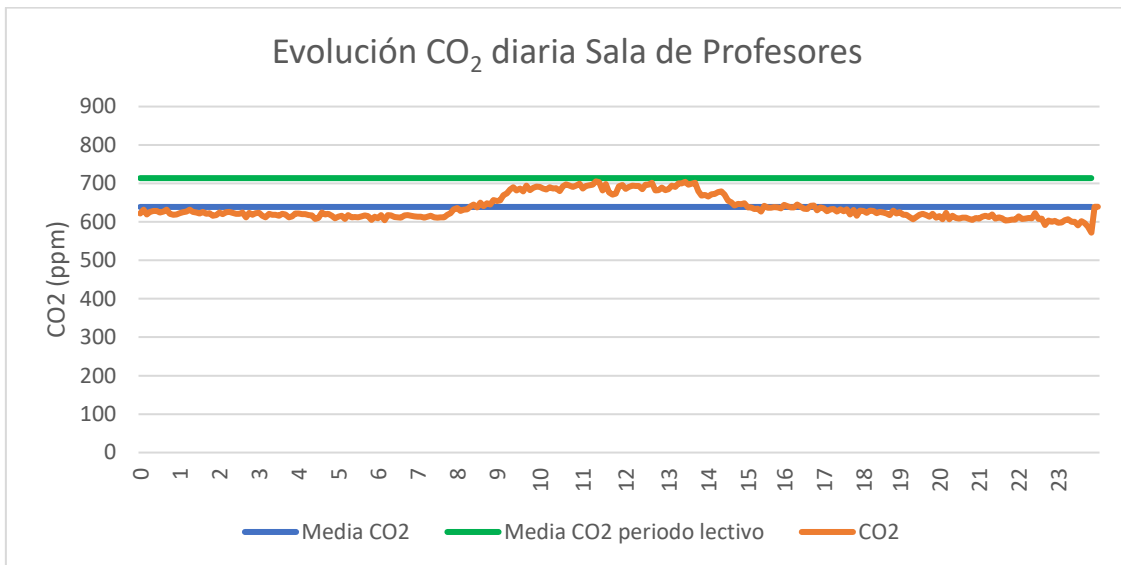


Fig 11 Evolución Media diaria CO₂ Sala de profesores

En el salón de actos, la media de concentración de CO₂ es algo superior a las 400 ppm, muy por debajo de la establecida (IDA 3=800ppm) considerando las 24 horas del día, pero si nos centramos en el periodo docente, la media es muy similar a las 400 ppm. Por tanto, no hay riesgo de propagación del virus, porque la concentración de CO₂ es muy baja. Observamos picos en los momentos en los que hay actividad, los cuales oscilan entre las 700 y 800 ppm. En estos, aunque la calidad de aire sea la establecida, existiría riesgo de transmisión del virus.

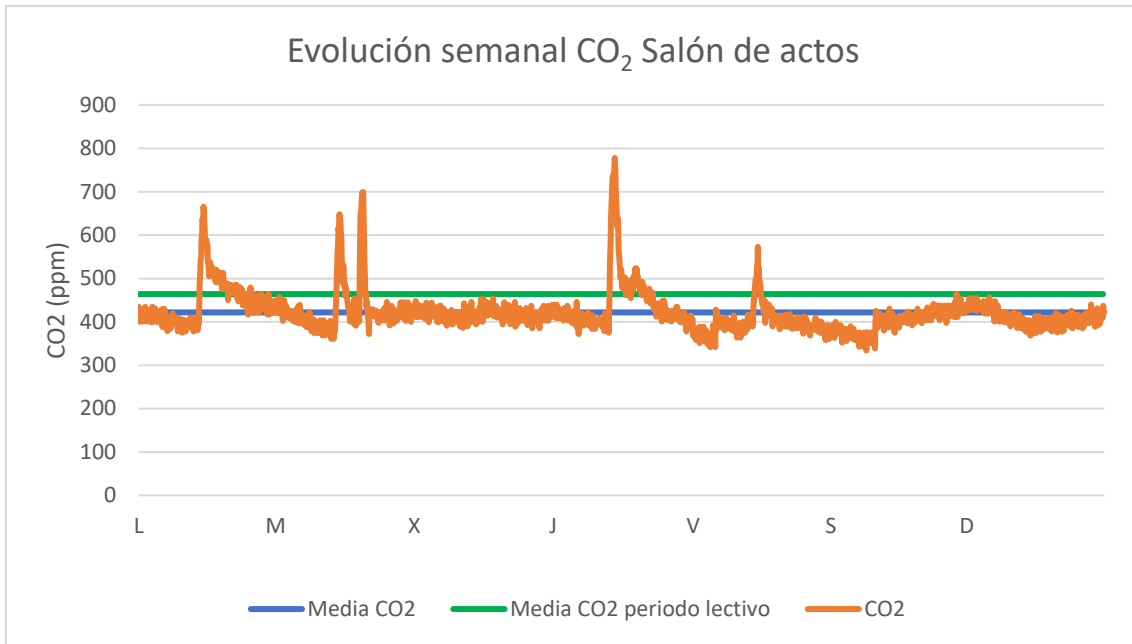


Fig 12 Evolución Media semanal CO₂ Salón de Actos

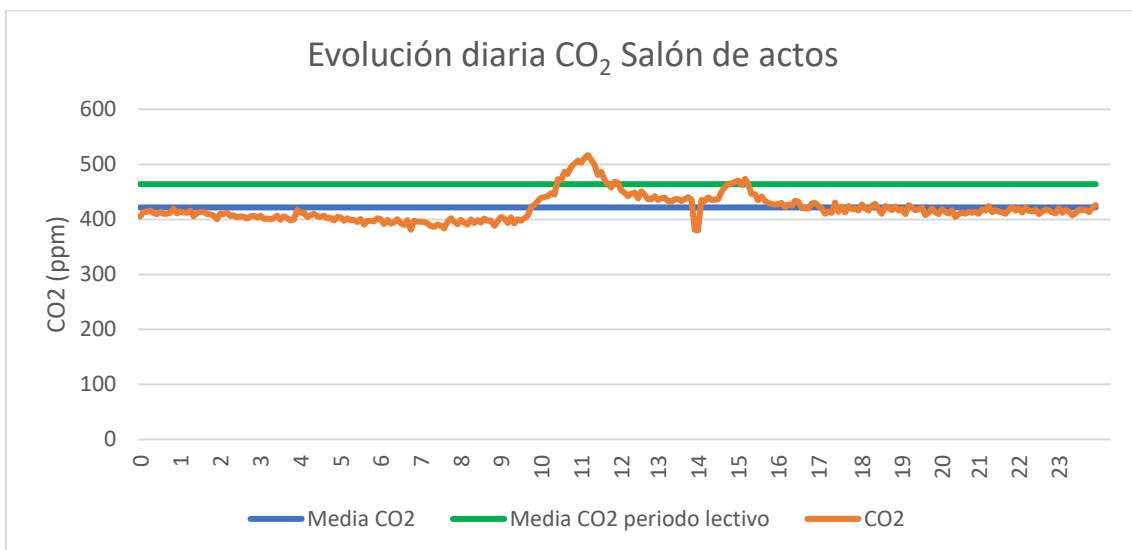


Fig 13 Evolución Media diaria CO₂ Salón de Actos

En el gimnasio, al contrario que, en el salón de actos, la media de concentración de CO₂ es mayor (en torno a las 700 ppm). Si consideramos únicamente las horas donde se produce la actividad la concentración media es superior, de prácticamente 800 ppm. Esta cifra estaría dentro de los parámetros establecidos (IDA 3) aunque al igual que en las otras estancias existiría el riesgo de propagación del SARS-CoV-2.

El comportamiento durante toda la semana es repetitivo, aunque observamos incrementos en la concentración de CO₂ tanto por la mañana (horario lectivo), como por la tarde ya que se realizan actividades extraescolares en esta estancia. Se pueden observar picos en las gráficas superiores a 1000 ppm.

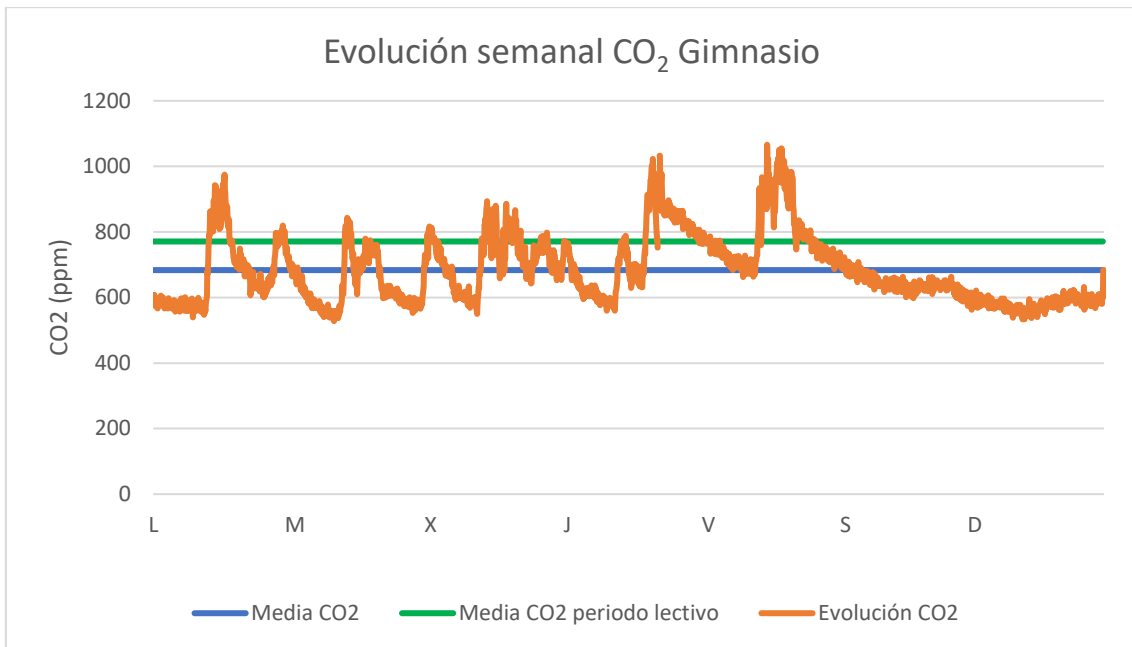


Fig 14 Evolución Media semanal CO₂ Gimnasio

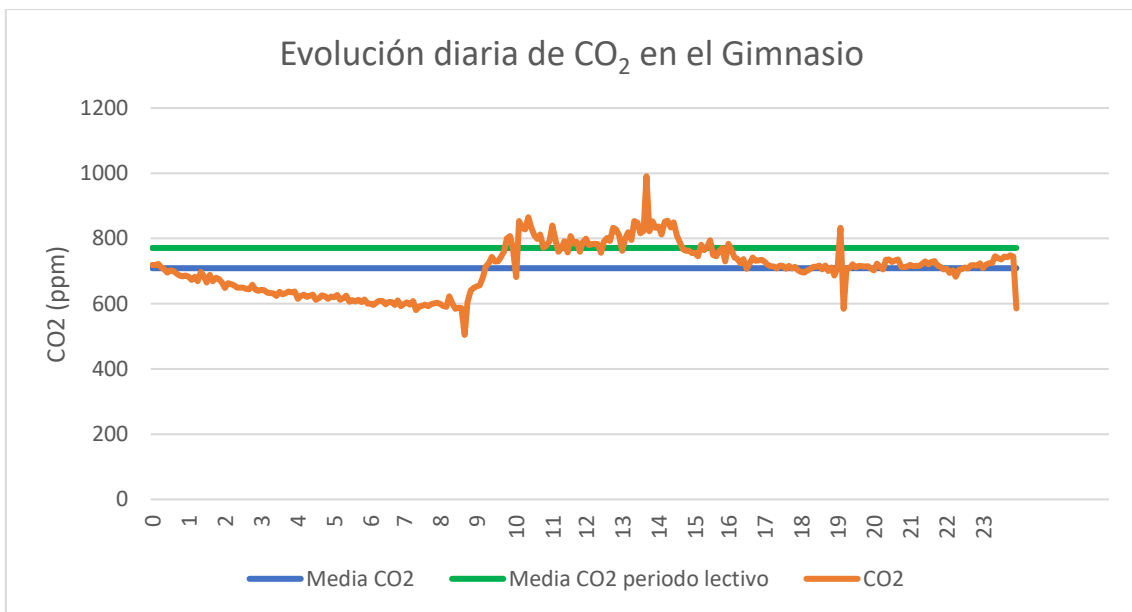


Fig 15 Evolución Media diaria CO₂ Gimnasio

Los sensores registran datos de otras variables como temperatura, humedad y ruido, por lo que también se ha procedido a estudiar la incidencia de estos. En la siguiente gráfica¹⁴, se observa que la temperatura es normal, en torno a los 20°C, y la humedad también se encuentra entre los valores recomendados. Sin embargo, el nivel de ruido es elevado, alcanzando más de 80dB la mayoría de los días. Durante el fin de semana, se puede observar cómo el ruido disminuye, ya que son los días en los que no se utiliza el gimnasio.

En el aula de 2º Bachillerato E, se puede destacar como el nivel de ruido es bastante elevado alcanzando los 70dB los días lectivos. Este valor es muy superior al recomendado por la OMS en un aula (35dB), lo que podría afectar a la propagación del virus.

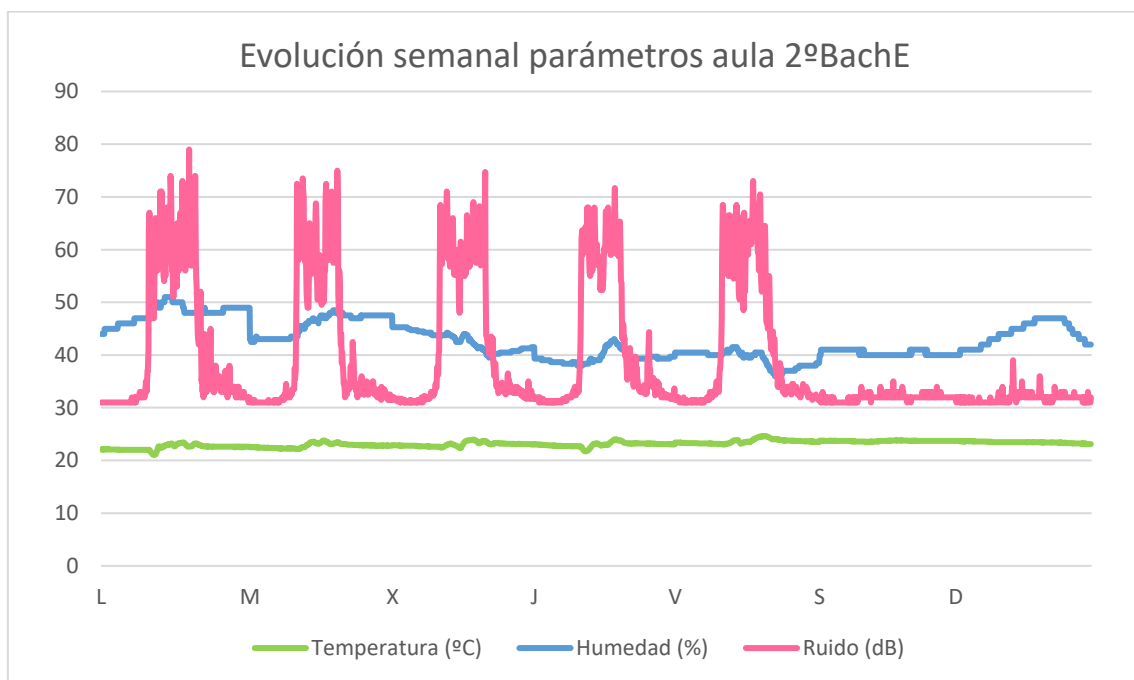


Fig 16: Evolución Media Semanal Temperatura, Humedad y Ruido aula 2º Bachillerato E

¹⁴ Anexo pág. 15, Figura 9

CONCLUSIONES

Tras las mediciones y análisis realizados, tal como se planificó inicialmente, se ha trabajado tanto en un modelo teórico como en un modelo práctico. El primero nos ha permitido identificar la normativa, parámetros medioambientales más importantes y sus umbrales para la monitorización del nivel de riesgo de propagación del SARs-CoV-2 a través de aerosoles. Además, se ha analizado el IES Arquitecto Ventura Rodríguez clasificando las distintas estancias en función del número de personas que lo ocupan y la actividad desarrollada.

En la segunda fase se ha realizado un estudio experimental mediante la obtención de estos parámetros en el desarrollo habitual del centro. En este sentido hemos podido concluir:

- Cuando se siguen las recomendaciones para centros escolares, manteniendo puertas y ventanas abiertas, las concentraciones de CO₂ se encuentran dentro de los parámetros saludables. Por el contrario, cuando no existe ventilación debido al cierre de puertas y ventanas/persianas, la concentración de CO₂ aumenta de forma exponencial, facilitando la propagación del SARs-CoV-2 por aerosoles.
- Debido a factores como el ruido procedente del exterior o el frío, no es posible mantener ventanas y puertas abiertas de forma habitual sin afectar al desarrollo normal de las actividades del aula, disminuyéndose así la capacidad de ventilación de la estancia, por lo que se debe considerar la instalación de mecanismos de ventilación forzada que permitan inyectar aire limpio del exterior.
- Estos mecanismos de ventilación forzada pueden complementarse con el uso de plataformas de control que integran los datos procedentes de sensores medioambientales alertando de situaciones no saludables (mediante email, sms). El seguimiento de los datos del sensor puede realizarse mediante el acceso web de usuarios autorizados. Además, estos sistemas facilitan la actuación en modo manual a través de la notificación o bien integrando esta mediante el uso de conmutadores inteligentes que activen o no la ventilación forzada en función del nivel captado por el medidor.

Como resultado de este trabajo, se propone la instalación de estos sistemas de recirculación de aire de modo forzado, tanto basados en conductos con inyección de aire exterior como otros, así como sensores que permitan monitorizar las aulas como los usados en este trabajo, para que el centro incremente los niveles de prevención frente al riesgo de propagación del SARS-CoV-2 a través de aerosoles y recomendaciones.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua, IDAEA-CSIC. (2020). *Guía para ventilación en aulas*. Consultado el 26 de Abril de 2020
- [2]. Departamento de Salud Ambiental. Subdirección General de Salud Pública. (2020) *Medición de la concentración de CO2 como indicador de una ventilación adecuada de edificios y locales. COVID19*. InfSAM 33.2020. Madrid.
- [3]. Dirección General de Ordenación e Inspección. Consejería de Sanidad de la Comunidad de Madrid. (2010). *Calidad del aire interior en edificios de uso público*. Madrid: BOCM.
- [4]. GREENHALGH T, JIMENEZ J.L, PRATHER K.A, TUFEKCI Z, FISHMAN D, SCHOOLEY R (2021). “Ten scientific reasons in support of airborne transmission of SARS-CoV-2” en *The Lancet*. Vol. 397, issue 10285, pp 1603-1605. <[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)00869-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)00869-2)> [Consulta: 14 de junio de 2021]
- [5]. HARVARD TH CHAN SCHOOL OF PUBLIC HEATH. (2020). *5 step guide to checking ventilation*.
- [6]. Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua, IDAEA-CSIC. (2020). *Guía de ventilación en las Aulas*.
- [7]. MILTON D. K. (2020). “A Rosetta Stone for understanding Infectious Drops and Aerosols”. *Journal of the Pediatric Infectious Diseases Society* <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32706376>> [Consulta: 26 de Abril de 2021]
- [8]. Ministerio de Sanidad (2020). *Evaluación del riesgo de la transmisión del SARS-CoV-2 mediante aerosoles. Medidas de prevención y recomendaciones*.
- [9]. Ministerio de Sanidad. Ministerio de Educación y Formación Profesional (2020). *Medidas de prevención, higiene y promoción de la salud frente a Covid-19 para centros educativos en el curso 2020-2021*.
- [10]. Ministerio de Sanidad. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. IDEA (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía). (2020). *Recomendaciones de Operación y mantenimiento de los sistemas de climatización y ventilación de edificios y locales para la prevención de la propagación del SARS-CoV-2*.

- [11].NETATMO. *Medidor de Calidad del Aire Interior Inteligente*.
<<https://www.netatmo.com/es-es/aircare/homecoach>> [Consulta: 26 de abril de 2021]
- [12].PCE IBERICA SL INSTRUMENTACIÓN. *Medidor de CO2 / dióxido de carbono PCE CMM 10*.
<https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/medidor-de-co2-pce-instruments-medidor-de-co2-di_xido-de-carbono-pce-cmm-10-det_5890507.htm> [Consulta: 25 de abril de 2021]
- [13].S&P SISTEMAS DE VENTILACIÓN (2021). *Soluciones de ventilación profesional adaptadas a las necesidades de cada centro escolar*.
<<https://info.solerpalau.com/es/ventilacion-aulas-centros-escolares>> [Consulta: 14 de junio de 2021]
- [14].World Health Organization (2021). *Roadmap to improve and ensure good indoor ventilation in the context of COVID-19*.
- [15].ZAFRA M, SALAS J (2020). “Un salón, un bar y una clase: así contagia el coronavirus en el aire” en *EL PAÍS*.
<<https://elpais.com/especiales/coronavirus-covid-19/un-salon-un-bar-y-una-clase-asi-contagia-el-coronavirus-en-el-aire>> [Consulta. 15 de enero de 2021]