



Calidad del aire interior en los edificios para el bienestar: estrategias de aplicación práctica

Miguel Ángel Campano
Jessica Fernández-Agüera
Juan José Sendra
(Eds.)

Calidad del aire interior en los edificios para el bienestar: estrategias de aplicación práctica

Miguel Ángel Campano
Jessica Fernández-Agüera
Juan José Sendra
(Eds.)

Calidad del aire interior en los
edificios para el bienestar:
estrategias de aplicación
práctica

Colección Horizontes

Título: *Calidad del aire interior en los edificios para el bienestar: estrategias de aplicación práctica*

Este volumen reúne una parte de los resultados del Proyecto I+D+i FEDER Andalucía: Evaluación de la capacidad de protección frente a la contaminación de los centros de Educación Infantil en Andalucía. Incluye aportaciones de investigadores comprometidos con la calidad del aire interior y la salud, constituyendo una red científica internacional. Los capítulos han sido revisados por pares por investigadores internacionales. De esta manera contribuye, de forma esencial, a la transferencia del conocimiento a la sociedad.

Palabras clave: calidad del aire, concentración de CO₂, ozono, compuestos orgánicos volátiles, material particulado, contaminantes, transmisión aérea de enfermedades, partículas biológicas, filtración, ventilación e infiltraciones.

© Primera edición: 2023

© Miguel Ángel Campano, Jessica Fernández-Agüera, Juan José Sendra (eds.)

© De esta edición:

Ediciones OCTAEDRO, S.L.

C/ Bailén, 5 – 08010 Barcelona

Tel.: 93 246 40 02

octaedro@octaedro.com

www.octaedro.com

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley. Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos, www.cedro.org) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra.

ISBN: 978-84-19506-75-7

Maquetación: Fotocomposición gama, sl

Diseño y producción: Octaedro Editorial

Publicación en acceso abierto – *Open Access*

Sumario

Agradecimientos	9
Introducción	11
1. Ventilación y CO ₂ , contaminante e indicador indirecto de la degradación ambiental	15
MIGUEL ÁNGEL CAMPANO; JESSICA FERNÁNDEZ-AGÜERA; JUAN JOSÉ SENDRA; MARÍA SÁNCHEZ-MUÑOZ	
2. Estimación del riesgo relativo de transmisión de enfermedades aéreas mediante el modelo de Wells-Riley	31
MIGUEL ÁNGEL CAMPANO; JESSICA FERNÁNDEZ-AGÜERA; PEDRO BUSTAMANTE; JOSÉ LUIS JIMÉNEZ	
3. CO ₂ y transmisión aérea de enfermedades	53
MIGUEL ÁNGEL CAMPANO; SAMUEL DOMÍNGUEZ-AMARILLO; IGNACIO ACOSTA; JOSÉ LUIS JIMÉNEZ	
4. Material particulado y ozono en espacios interiores	69
DIANA RODRÍGUEZ; ELENA JIMÉNEZ	
5. Compuestos orgánicos volátiles en ambientes interiores	85
SONIA LARA; FLORENTINA VILLANUEVA	
6. Las partículas biológicas en el aire: la atmósfera como vector de las partículas biológicas y su acción sobre los seres vivos	103
EUGENIO DOMÍNGUEZ-VILCHES; JESSICA FERNÁNDEZ-AGÜERA; FABIO ORLANDI; MARCO FORNACIARI DA PASSANO	

7. Filtración de aire en espacios interiores	123
JAVIER PÉREZ	
8. Ventilación e infiltraciones en viviendas	141
JESSICA FERNÁNDEZ-AGÜERA; MIGUEL ÁNGEL CAMPANO; SAMUEL DOMÍNGUEZ-AMARILLO; IGNACIO ACOSTA	
9. Calidad del aire por monitorización de CO ₂ en centros educativos	165
PILAR REMACHA; ÁLVARO MUELAS; ANTONIO PINA; EDUARDO TIZNÉ; JAVIER PÉREZ; JOSÉ MANUEL FELISI; JAVIER BALLESTER	

Agradecimientos

La edición del libro ha sido financiada por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) y la Consejería de Transformación Económica, Industria, Conocimiento y Universidades de la Junta de Andalucía, dentro del Programa Operativo FEDER 2014-2020 de la Junta de Andalucía a través del proyecto UNCOVER «Evaluación de la capacidad de protección frente a la contaminación de los centros de Educación Infantil en Andalucía» (Ref. US-1381053).

La publicación quiere agradecer, igualmente, el apoyo brindado por el Contrato de Acceso del VI Plan Propio de Investigación de la Universidad de Sevilla en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas 1, mediante el cual ha sido posible el desarrollo del proyecto y la edición del libro.

Como contribución final, hay que reconocer la participación e implicación en la redacción de este libro, y en todas las actividades de divulgación social para la protección de la salud de las personas, a los componentes de las redes de comunicación y divulgación científica Aireamos y VentilANDO.



Introducción

Por editores

Este libro forma parte de las acciones de difusión y transferencia del Proyecto de investigación «Evaluación de la capacidad de protección frente a la contaminación de los centros de Educación Infantil en Andalucía», incluido en el Programa operativo FEDER Andalucía 2014-2020. Este proyecto se encuadra en las líneas de investigación del Grupo TEP-130 Arquitectura, Patrimonio y Sostenibilidad: Acústica, Iluminación y Energía de la Universidad de Sevilla. En su elaboración han colaborado diversos investigadores internacionales pertenecientes a las redes de comunicación y divulgación científica Aireamos y VentilANDO.

Las personas estamos constantemente expuestas a la composición del aire que nos rodea, tanto en el exterior como en los espacios construidos. En el momento actual, el ambiente interior se ha convertido en una de las principales preocupaciones en cuanto a la salud de los ciudadanos.

Los datos más recientes en discusión indican que, de promedio las personas en áreas desarrolladas invierten hasta el 90% de su tiempo en interiores –quizás algo menos en las zonas meridionales de Europa, pero aun así en una tendencia similar–.

Estas cifras aún se han incrementado más como consecuencia de la pandemia de COVID-19, y sus efectos resultantes (como el teletrabajo y las nuevas relaciones laborales). Ello ha llevado, en muchos casos, a la descentralización de los espacios laborales, lo que ha provocado el aumento del aislamiento ambiental de muchos trabajadores. Esta situación puede presentar algunos aspectos que se consideran positivos desde el punto de vista de la salud, como que, dejando aparte factores psicológicos o ergonómicos, el aumento de los periodos de aislamiento relativo de los trabajadores y la existencia de una tendencia a la reducción del tiempo en espacios de aire compartido reduce las tasas de propagación de patógenos de transmisión aérea.

Pero, por el contrario, muchos de estos espacios, tanto los existentes de forma previa para actividades laborales como los nuevos espacios –normalmente situados en las viviendas–, pueden presentar una inadecuada calidad del aire interior (IAQ), en parte debido a su obsolescencia, dada la antigüedad de gran parte del parque de edificios, como la inadecuación de espacios residenciales a las nuevas actividades. Este nuevo escenario puede presentar importantes efectos sobre la salud y la calidad de vida de los habitantes. Estudios recientes sugieren que hasta el 15 % de las muertes o comorbilidades relacionadas con la COVID-19 podrían atribuirse a la mala calidad del aire en los entornos residenciales.

La mala calidad del aire interior, en la que tienen papeles importantes tanto las emisiones químicas –las interiores y las atrapadas procedentes del exterior, junto con los agentes biológicos– como las relacionadas con la humedad y el moho aumentan el riesgo de enfermedades respiratorias en el entorno un 50 %.

Se estima que cada año se producen unos siete millones de defunciones en el mundo atribuibles a la contaminación atmosférica. De esta cifra, llama la atención especialmente que, al menos, seiscientos mil son menores de 5 años. La literatura científica indica que más de uno de cada tres niños en Europa desarrolla episodios de asma bronquial o alergia, que la tasa de enfermedades respiratorias está aumentando progresivamente y que, además, se identifica una clara relación entre el rendimiento escolar y la calidad del aire interior. Solo en la región europea la exposición a partículas (PM) reduce la esperanza de vida teórica de cada persona en un promedio de casi un año, principalmente debido al mayor riesgo de padecer enfermedades cardiovasculares y respiratorias, trastornos neurológicos y cáncer de pulmón. Aunque este factor es de tipo general ambiental, existe un aumento del riesgo potencial asociado a los edificios, en especial por el aumento de la estanqueidad de sus envolventes, la obsolescencia de sus sistemas de ventilación y el aumento de sustancias con potencial de emisiones contaminantes en el interior de los ambientes. Este deterioro de la calidad del aire representa un riesgo importante para la salud general, aunque afecta a las personas de diferentes maneras, y ciertas poblaciones son más vulnerables. Los niños, los ancianos y las personas con enfermedades respiratorias son más sensibles a estos riesgos ambientales que el público en general.

El proceso que determina la calidad del aire interior está determinado por varios aspectos. Los niveles de contaminación exterior, los mecanismos de transporte de contaminación entre el interior y el exterior, las emisiones internas, las reacciones químicas de los gases en partículas y superficies, los procesos dinámicos (p. ej., resuspensión, deposición, evaporación, crecimiento, coagulación, etc.), así como la interacción con los sistemas de ventilación/filtración de aire interior serán los factores que establecerán el estado

de calidad del ambiente interno para cada momento, ya que, además, es un proceso dinámico y cambiante.

Objetivos

El libro plantea que la consecución de un ambiente saludable y con capacidad de protección frente a enfermedades de transmisión aérea solo puede ser logrado mediante un planteamiento holístico e interdisciplinar. Es fundamental, pues, que todos los agentes involucrados en el proceso del ambiente construido, desde su construcción, gestión, explotación y mantenimiento del edificio hasta incluso sus diferentes tipos de usuarios, estén involucrados e informados para perseguir un entorno adecuado para la promoción de la salud de las personas.

El objetivo principal del libro es explicar los beneficios de la adecuada ventilación de los espacios interiores, entendida esta en su concepción sistémica y compleja. Para ello, se han establecido los siguientes objetivos específicos:

- Sensibilizar sobre la importancia de la calidad del aire interior en la salud de los ocupantes de los edificios y su impacto en el rendimiento de los ocupantes.
- Incrementar la conciencia y comprensión de los riesgos e implicaciones de la calidad del aire interior en la ciudadanía.
- Explicar cómo se produce la evaluación de distintos parámetros de calidad ambiental (CO₂, material particulado, componentes orgánicos...) en espacios interiores.
- Identificar las fuentes principales de contaminantes internos del aire en los diferentes edificios.
- Describir cómo la medición de la concentración del CO₂ permite realizar estimaciones de la degradación ambiental.
- Difundir cómo la medición de la concentración del CO₂ permite establecer predicciones y mecanismos para reducir los riesgos de contagio de enfermedades aéreas.
- Empoderar a la ciudadanía para disponer de un mayor control de la exposición a contaminantes, alérgenos y virus, partiendo del diagnóstico de su estado actual, para permitir así un mejor diseño de sus actividades, horarios de desarrollo y valoración de los riesgos asumiendo un papel activo.
- Proporcionar información con resolución detallada a las administraciones públicas sobre medidas que permitan la mejora y control de la calidad del aire interior.

Usuarios del libro

El libro va dirigido a entidades, organismos, comunidades y asociaciones preocupadas por la calidad del aire de los espacios habitables; a centros de investigación donde se aborden estas cuestiones; a estudiantes de Arquitectura, Ingeniería Civil, Ingeniería Ambiental y Ciencias de la Educación; a administraciones públicas y profesionales y a promotores privados involucrados en los procesos de construcción, mantenimiento, adecuación o gestión de los edificios, así como a directores y gestores de personal de centros educativos.

Contenido y organización

El libro está compuesto por nueve capítulos que, si bien disponen de un contexto temático conjunto, pueden ser leídos de forma independiente en función del interés de cada cual, de los enfoques o la consulta. Cada capítulo presenta un resumen gráfico. Los tres primeros capítulos desarrollan los beneficios de la ventilación de los espacios interiores, controlando el aporte de renovación de aire exterior a través de la monitorización ambiental. Proponen el uso de la medición del CO₂ como indicador del estado de la atmósfera interior de los edificios, dado su adecuado ajuste y capacidad de representar el estado interior, siendo muy asequible en términos tanto de manejo como económicos. Con el adecuado soporte, es de utilidad, igualmente, para poder realizar una estimación indirecta del riesgo de transmisión aérea de patógenos.

Los capítulos 4, 5 y 6 se enfocan en explicar y evaluar otros contaminantes presentes en el aire interior de los edificios, también comunes en espacios interiores, que pueden resultar perjudiciales para la salud, como las partículas, y los compuestos volátiles orgánicos. Igualmente, se discute la acción de las partículas biológicas sobre los seres vivos.

Los capítulos 7, 8 y 9 proponen diversas experiencias de evaluación de la calidad ambiental interior en viviendas o en colegios, ya sea a través de la monitorización de CO₂, o bien de la caracterización de la estanqueidad al aire de las envolventes y de su ventilación en la promoción de un ambiente saludable.

Ventilación y CO₂, contaminante e indicador indirecto de la degradación ambiental

MIGUEL ÁNGEL CAMPANO
JESSICA FERNÁNDEZ-AGÜERA
JUAN JOSÉ SENDRA
MARÍA SÁNCHEZ-MUÑOZ

Escuela Técnica Superior de Arquitectura,
Universidad de Sevilla (US), Sevilla, España

Lista de acrónimos

ACH renovaciones por hora (acrónimo del inglés *air changes per hour*).

CCD (ventilación) continua, cruzada y distribuida.

CO₂ dióxido de carbono.

COVID-19 acrónimo de enfermedad por coronavirus (del inglés *COronaVirus Disease 2019*).

C_r concentración de CO₂ en el aire exhalado por una persona adulta (en ppm).

H⁺ protón.

H₂CO₃ ácido carbónico.

HCO₃⁻ bicarbonato.

IDA calidad del aire interior (acrónimo del inglés *indoor air quality*).

pH medida de acidez o alcalinidad de una disolución acuosa.

PM materia particulada (acrónimo del inglés *particulate matter*).

RFA fracción de aire previamente respirado (acrónimo del inglés *rebreathed fraction of air*).

SBS síndrome del edificio enfermo (acrónimo del inglés *sick building syndrome*).

SMS herramienta de simulación de desempeño estratégico (acrónimo del inglés *strategic management simulation*).

VMC ventilación mecánica controlada.

VOC compuestos orgánicos volátiles (acrónimo del inglés *volatile organic compounds*).

1.1. Introducción

La población de los países industrializados pasa entre un 80 % y un 90 % de su tiempo en interiores, incluyendo especialmente a la población más vulnerable, como niños, ancianos y enfermos [1-3]. De no existir una ventilación adecuada, se producirá una degradación del ambiente interior, lo que puede conllevar sintomatologías y problemas de salud; pérdida de rendimiento cognitivo, es decir, disminución de la capacidad de realizar tareas que requieran pensamiento o concentración, y generación de condiciones de alta transmisión de enfermedades respiratorias.

Es, por tanto, una cuestión de salud pública el procurar que la población esté expuesta a una buena calidad del aire en estos ambientes interiores, recurriendo para ello a una ventilación suficiente.

1.2. Ventilación contra la degradación ambiental

La ventilación permite mantener en niveles adecuados, entre otros, los siguientes parámetros y contaminantes ambientales derivados de la actividad humana (que se describirán con más detalle en capítulos posteriores):

- dióxido de carbono y otros gases;
- vapor de agua;
- materia particulada (PM) y aerosoles;
- compuestos orgánicos volátiles (VOC);
- bacterias, virus, hongos, etc.;
- olores relativos a la actividad humana.

1.2.1. ¿Cómo se realiza la ventilación?

La renovación de aire en un recinto mediante la introducción de aire exterior puede realizarse básicamente de dos formas diferentes (figura 1.1):

- Ventilación natural: el aire se renueva mediante la apertura de ventanas o puertas, así como por la entrada de infiltraciones incontroladas a través de la envolvente. Para que sea efectiva, se recomienda que esta sea CCD, o sea, continua en el tiempo, cruzada (apertura de ventanas y puertas en diferentes paramentos) y distribuida en su superficie.
- Ventilación mecánica controlada (VMC): el aire es tanto introducido como extraído del recinto mediante el empleo de un sistema de ventilación que, entre otros elementos, cuenta con ventiladores capaces de vehicular el aire (sistemas de doble flujo). Al igual que en la ventilación natu-

ral, se recomienda que esta sea continua, con una distribución adecuada de los elementos de impulsión y extracción, y que no tenga zonas donde el aire se acumule y «estaque», impidiendo su renovación.

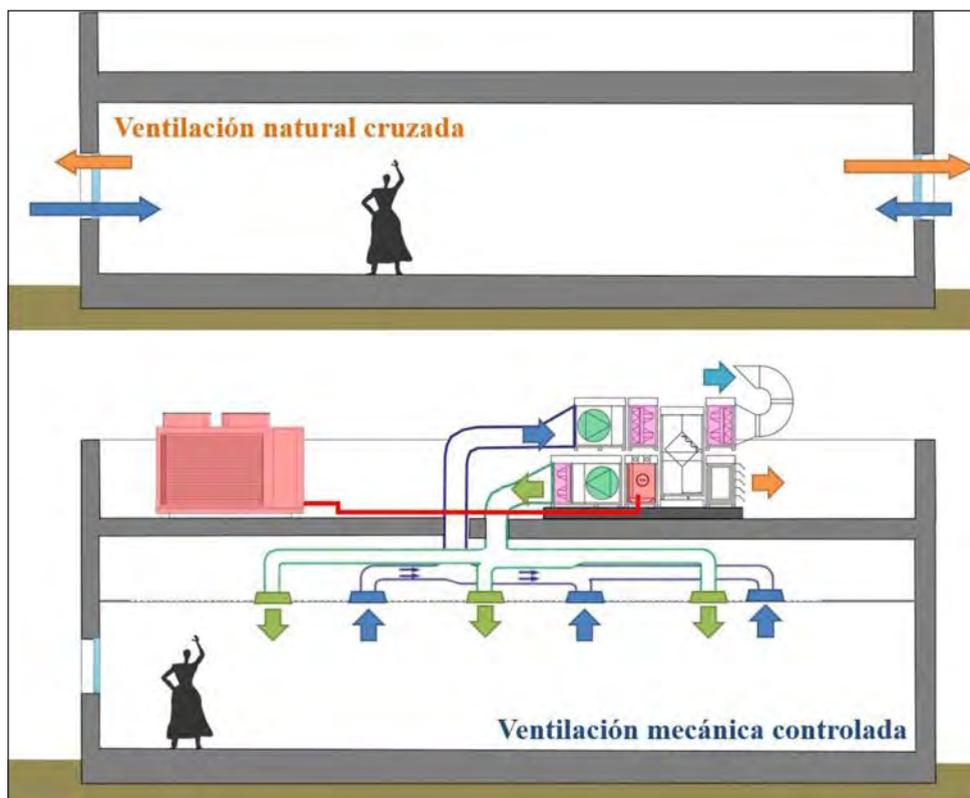


Figura 1.1. Ventilación natural y ventilación mecánica controlada.

Existen otros modos de ventilación, además de estos dos, como el modelo de ventilación híbrido, de flujo simple, en el que la extracción se realiza mecánicamente y la admisión se produce mediante la entrada incontrolada de aire en el recinto a través de huecos o aperturas en la envoltura, debido a la depresión generada; o la variante simétrica de este modelo de ventilación, en el que la impulsión es realizada mecánicamente, lo que genera una sobrepresión en el recinto, confiando en que el aire será extraído a través de las grietas o huecos de la envoltura.

Siempre que esté adecuadamente dimensionada, se considera que la VMC es la opción más fiable y adecuada para solventar la ventilación de un recinto, ya sea de forma constante o regulándose según la necesidad. Así lo recogen las diferentes normativas de ventilación, como se indicará posteriormente. En el caso de la ventilación natural, al depender enormemente de las con-

diciones exteriores (temperatura del aire, además de dirección y velocidad del viento), no se puede garantizar que solvente las necesidades del recinto a lo largo del tiempo, especialmente en días calurosos con baja o nula presión de viento.

Para regular el sistema de VMC o para modular la apertura de ventanas y puertas con ventilación natural, es altamente deseable conocer cuál es la necesidad real de ventilación del espacio, ya sea para evitar el exceso de consumo energético del espacio o para aumentar la tasa de ventilación.

1.2.2. ¿Cómo se cuantifica y evalúa la ventilación?

El nivel de ventilación que requiere un recinto puede expresarse con diferentes indicadores, todos ellos relacionados entre sí. Esto permite controlar el nivel de los parámetros y contaminantes anteriormente descritos.

Dichos indicadores del nivel de ventilación pueden ser indirectos (se asume que con una cantidad de aire determinada se puede lograr la dilución requerida) o directos (permite regular la cantidad de aire fresco según la evolución del recinto).

Entre los indicadores indirectos más usados están los siguientes (figura 1.2):

- Caudal de aire. Es habitual que, para mayor comodidad, se indique que el flujo de aire de renovación exterior se establezca por ocupante o por unidad de superficie (m^2). Puede expresarse en:
 - metros cúbicos por hora (m^3/h),
 - litros por segundo (l/s).
- Renovaciones por hora (ACH, *air changes per hour*, en h^{-1}). Con 1 ACH se introduce en una hora un caudal de aire exterior equivalente al volumen de la sala.



Figura 1.2. Ventilación según ACH y caudal de aire (l/s) [4].

Sin embargo, para poder regular con mayor precisión la cantidad de ventilación necesaria de un recinto, es preciso determinar su nivel de degradación a lo largo del tiempo mediante indicadores de tipo directo.

Con este fin, se puede recurrir a la medición continuada del dióxido de carbono, dado que, además de ser un contaminante en recintos ocupados, también puede actuar como indicador indirecto de olores y contaminantes derivados de la actividad humana (bioefluentes). Así, al monitorizar la evolución del nivel de dióxido de carbono en un espacio, es posible conocer de forma sencilla, fiable y asequible si se produce una adecuada renovación de aire.

1.3. ¿Qué es el dióxido de carbono?

El dióxido de carbono (CO_2) es un compuesto químico que, en condiciones atmosféricas normales, existe en forma de gas incoloro. Su concentración se puede medir en partes por millón (ppm), haciendo referencia a la cantidad de unidades que hay de este elemento por cada millón de partes de aire contaminado.

La concentración de CO_2 en el exterior suele ser estable y situarse en torno a 420 ppm [5], con una leve fluctuación según la estación del año, pudiendo también ser más elevada en entornos urbanos o industriales [6]. Este compuesto también es producido y liberado como parte del proceso respiratorio de los organismos aerobios, entre los que se encuentra el ser humano, además de liberarse en procesos de combustión.

La tasa de emisión de CO_2 de las personas durante la respiración depende, entre otros factores, de edad, sexo biológico y peso del individuo, y de la actividad desarrollada (actividad metabólica).

1.3.1. Monitorización del nivel de CO_2

Dado que el CO_2 es exhalado durante la respiración, es posible utilizar, en espacios libres de procesos de combustión y con ocupación humana, su nivel relativo –esto es, la diferencia entre el valor medido en el interior y el existente en el exterior– como indicador indirecto para caracterizar el proceso de la ventilación, así como representación (o *proxy*) del nivel de humedad relativa, de contaminantes y de bioefluentes generados por dicha actividad, además del posible riesgo relativo existente de transmisión de enfermedades aéreas.

Por esto, diversas guías y normas, tanto españolas como de ámbito internacional, establecen que el dióxido de carbono puede actuar como indicador indirecto de esta degradación ambiental, a fin de establecer el caudal mínimo del aire exterior de ventilación.

La exposición prolongada a ambientes con valores medios y altos de dióxido de carbono puede tener una serie de efectos negativos en la salud, así

como en el rendimiento cognitivo. De ahí, la relevancia de la monitorización de este parámetro.

1.3.2. Porcentaje de aire previamente respirado

Otra forma de expresar cuál es la concentración de CO₂ es mediante el empleo del porcentaje de aire previamente respirado (*RFA, rebreathed fraction of air*). Así, es posible entender de forma intuitiva cuál es la fracción de aire del recinto que ya ha pasado por los pulmones de los ocupantes de dicho espacio. Esto puede tener utilidad para evaluar cuál es el riesgo de transmisión aérea de algunas enfermedades.

Considerando que el aire que exhala una persona adulta tiene una concentración de CO₂ de, aproximadamente, 40.000 ppm (C_r), y conocida la diferencia del nivel de CO₂ entre el interior y el exterior en un instante dado ($D[CO_2]$), el porcentaje de aire previamente respirado de un recinto (*RFA*) se puede expresar como (ecuación 1):

$$RFA = 0,0025 \cdot \Delta [CO_2] \text{ (ppm)} \quad \text{Ecuación 1}$$

1.4. Impacto directo del nivel de CO₂ en la salud

La inhalación de dióxido de carbono en ambientes con niveles moderados y elevados (superiores a los habituales en edificación, pero más frecuentes en espacios con muy baja renovación de aire, como submarinos o incluso estaciones espaciales) puede generar efectos respiratorios y cardiovasculares, así como cambios fisiológicos en la química de la sangre (presión sanguínea, tasa cardíaca, solubilidad, etc.). A niveles muy elevados, se han documentado incluso respuestas similares a ataques de pánico y experiencias de estrés fisiológico [7].

Para el caso de niveles de concentración de dióxido de carbono relevantes en edificios (por debajo de 5.000 ppm), se ha encontrado una correlación entre el valor absoluto de CO₂ y la aparición de síntomas tales como dolor de cabeza, fatiga o dolor de garganta [8], observándose también una serie de efectos cognitivos negativos con concentraciones menores.

1.4.1. Efectos adversos para la salud asociados a la exposición al CO₂

Los efectos adversos para la salud asociados a la exposición al CO₂, ya sea puntual o continuada, pueden ser respiratorios y de las membranas mucosas, cardiovasculares o manifestarse en la química sanguínea.

Efectos en la química de la sangre

El CO_2 reacciona con el agua en el torrente sanguíneo para formar ácido carbónico (H_2CO_3), que luego se disocia en bicarbonato (HCO_3^-) y protones (H^+), alterando el pH, cuya disminución (acidosis) activa los quimiorreceptores arteriales periféricos y medulares, estimulando la ventilación en los músculos respiratorios. Así, se ha podido observar dicha disminución en el pH de la sangre (acidosis) en sujetos expuestos de forma continuada a concentraciones elevadas de CO_2 (de 7.000 a 15.000 ppm durante al menos 20 días) [9]. Por ello, diversas normas de calidad del aire interior en entornos residenciales han fijado valores límite de 3.500 ppm, tras aplicar un factor de incertidumbre de 2 a partir de estos estudios.

Efectos respiratorios y de las membranas mucosas

Se han encontrado vínculos entre una elevada concentración de CO_2 y diversos síntomas respiratorios y de las membranas mucosas [8]. Efectos como irritación de ojos, dolor de garganta o garganta seca, nariz congestionada, estornudos y tos están más presentes en individuos expuestos a concentraciones de $\text{CO}_2 > 800$ ppm que en otros expuestos a niveles más bajos de dióxido de carbono [10]. Y se han asociado valores de dióxido de carbono superiores a 1.000 ppm con un mayor riesgo de experimentar rinitis (estornudos/secreción nasal/congestión nasal) [11].

Si la exposición aguda por inhalación de CO_2 se produce a niveles muy elevados (entre 50.000 y 80.000 ppm), se produce una disminución de la conductancia específica de las vías respiratorias, causando síntomas respiratorios [12]. Y si se produce a niveles aún más altos (> 350.000 ppm) se produce irritación nasal que puede incluso causar asfixia (700.000 ppm) debido al desplazamiento de oxígeno.

Por otra parte, los efectos más habituales son los oculares, respiratorios (como irritación de nariz o garganta, rinitis, tos) y generales (como fatiga y dolor de cabeza), que se pueden relacionar con el tiempo que se pasa habitualmente en un edificio, en particular en espacios como oficinas [13].

La concentración de dióxido de carbono generalmente se puede considerar como sustituto (*proxy*) de otras concentraciones de contaminantes (bioefluentes) derivados de la ocupación y como indicador de la tasa de ventilación. En este sentido, se han encontrado evidencias de que las personas con ciertas afecciones de salud (como alergias y asma) son más propensas a reportar sintomatología relacionada con el edificio específico en el que se encuentran (lo que se denomina «síndrome del edificio enfermo», *sick building syndrome*, SBS) que aquellos sin estas condiciones [14].

Efectos cardiovasculares

El dióxido de carbono es también un potente vasodilatador. Diversos estudios han analizado el efecto de concentraciones de CO₂ de hasta 5.000 ppm en la variabilidad de la frecuencia cardíaca y el aumento de la presión arterial y la circulación sanguínea. Existiendo una mayor dependencia de una mayor concentración de biofluentes que de un mayor nivel de CO₂, o incluso de la combinación de ambos [15]. Estos estudios concluyen que, para esas concentraciones de CO₂, la dependencia de estos efectos cardiovasculares es menor que la se produce con las concentraciones altas de biofluentes.

Si la exposición por inhalación a concentraciones más elevadas de CO₂ (7.000 o 12.000 ppm) es prolongada en el tiempo (estudios realizados con ensayos de 20 o más días), los efectos cardiovasculares de dicha exposición se manifiestan en una capacidad de difusión reducida para el monóxido de carbono (CO) y una caída en el gasto cardíaco, así como un aumento de la ventilación (aire intercambiado entre el ambiente y los alveolos pulmonares) y un aumento temporal del ritmo cardíaco y respiratorio [16].

1.4.2. Deterioro de funciones cognitivas

Existen múltiples estudios que señalan que estar en ambientes con valores moderados de CO₂ (por debajo de 5.000 ppm) pueden afectar al desarrollo cognitivo de alto nivel, es decir, disminuir la capacidad para realizar tareas relativamente complejas que requieran pensamiento o concentración. Esto incluye la toma de decisiones y la resolución de problemas [17].

El estar expuesto a estas concentraciones de CO₂ se asocia en gran medida con el desarrollo del SBS [18], además de con un mayor absentismo y descenso del rendimiento cognitivo en estudiantes de Primaria [19].

Un estudio [20] mostró en 2012 una reducción en el rendimiento de tareas de corrección cuando se comparaban valores de CO₂ de 3.000-4.000 frente a 600 ppm, visibles únicamente cuando la dificultad de estas tareas y la duración de la exposición se incrementaban. A partir de este trabajo, Satisch *et al.* [21] demostraron que existía una dependencia significativa entre la calidad de la toma de decisiones y el nivel absoluto de CO₂ al que se sometían los voluntarios (1.000 y 2.500 ppm, frente a un valor mínimo de 600 ppm), utilizando para ello una serie de baterías de test previamente validados. En la figura 1.3 se puede observar que, al incrementar de 600 a 1.000 ppm el valor de CO₂ de la sala donde se realiza el estudio, se obtiene una bajada de hasta 15 puntos en los percentiles obtenidos en algunas de las pruebas (en otras, las diferencias fueron menores o incluso nulas), pudiendo aumentar esta disminución hasta en 30-50 puntos en varios de los ensayos, cuando el nivel absoluto de CO₂ subió a 2.500 ppm.

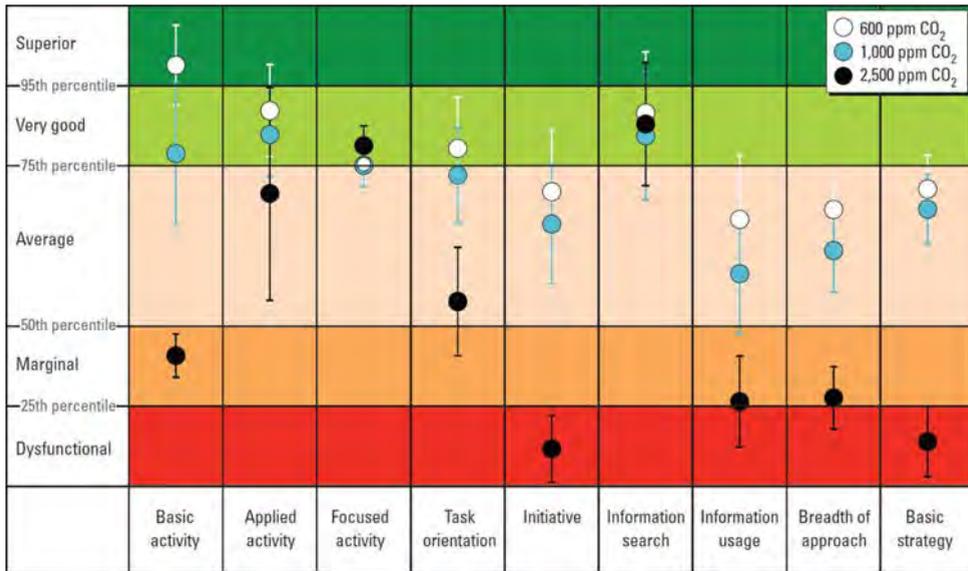


Figura 1.3. Resultados de ensayos de funciones cognitivas para tres niveles de CO₂ [21].

J. G. Allen *et al.* [22] realizaron un estudio en el que se analizaron nueve dominios de función cognitiva bajo diversas condiciones de CO₂ y VOC, todo ello a través de ensayos validados mediante la herramienta informática SMS (Strategic Management Simulation), realizados a lo largo de una semana en un horario convencional de oficina de ocho horas. Se pudo observar que las puntuaciones cognitivas promedio disminuyeron de forma significativa en siete de estos nueve dominios, conforme aumentaban los niveles de CO₂ absolutos; en concreto, fueron un 15 % más bajas con un nivel de 945 ppm, mientras que disminuyeron un 50 % con concentraciones de 1.400 ppm.

En promedio, el aumento de 400 ppm de CO₂ se pudo asociar con una disminución del 21 % en las puntuaciones cognitivas de los participantes en todos los dominios. Igualmente, los estudios de Bakó-Biró *et al.* [23] también demostraron que se producía una disminución significativa en el desempeño de tareas cognitivas en centros educativos de Primaria cuando se sometía a los estudiantes a una exposición a niveles ambientales elevados de CO₂.

1.5. Transmisión de enfermedades aéreas

La medición de CO₂ también permite estimar el riesgo potencial de transmisión de enfermedades aéreas en recintos con ocupación humana, en el caso de que haya uno o más ocupantes infecciosos en el espacio analizado.

Es posible emplear el valor relativo de CO₂ como indicador indirecto de dicho riesgo, dado que el CO₂ es exhalado junto con otros bioefluentes, entre los que destacan bioaerosoles potencialmente infectivos en sujetos infecciosos [24].

A partir de este planteamiento, restringir el valor límite admisible de CO₂ en recintos interiores con ocupación humana contribuye a reducir el riesgo de contagio, especialmente en periodos de alta incidencia epidémica. Esta vinculación entre CO₂ y riesgo se ampliará con más detalle en posteriores capítulos.

1.6. Normativas, directrices y guías para la regulación de los niveles de CO₂ en espacios interiores

El establecimiento de límites admisibles de CO₂ por parte de normativas, directrices y guías responde, por tanto, a la necesidad de controlar su efecto en la salud como contaminante o como indicador indirecto de enfermedades de transmisión aérea o de otros contaminantes derivados de la actividad humana.

Los niveles de ventilación en espacios interiores se encuentran regulados en España por un conjunto de normativas y directrices en las que se establece una serie de límites de CO₂ para espacios interiores según su uso (viviendas, lugares de trabajo, etc.):

- Residencial vivienda:
 - Documento DB-HS3 del Código Técnico de la Edificación, CTE [25].
- Otros usos diferentes a residencial vivienda:
 - Documento DB-HE2 del Código Técnico de la Edificación.
 - Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, RITE [26].
- Lugares de trabajo:
 - Real Decreto 486/1997: Disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo [27], [28].

También existen otros documentos que, aunque no obligan a cumplir los límites máximos de CO₂ que marcan, son de gran ayuda para saber cómo actuar, como, por ejemplo, la *Nota técnica de prevención 549 (NTP 549)* [29] o la *Guía para la ventilación en aulas* [30], entre otros.

Los diferentes niveles límite de CO₂ que plantean estos documentos, tanto relativos (diferencial entre interior y exterior) como absolutos, quedan recogidos en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Niveles límite de CO₂ según normativas y guías

Documento	Nivel de calidad del aire	Valor relativo límite de CO ₂ (ppm)	Valor absoluto límite de CO ₂ (ppm)
CTE DB-HS3	Media anual	-	900
	Límite para acumulación anual	-	1.600
RITE (método C por concentración de CO ₂)	IDA 1 (ocupantes sensibles)	350	770
	IDA 2 (ocupación permanente)	500	920
	IDA 3 (ocupación temporal)	800	1.220
RD 486/97	Uso sedentario y sin humo	≈ 800 (extrapolación)	≈ 1.220 [27]
		≈ 600 (extrapolación)	1.000 [28]
NTP 549	Exposición diaria (8 horas)	-	5.000
	Exposición corta (15 minutos)	-	15.000
	Indicador de contaminación	-	1.000

La figura 1.4 recoge los límites de CO₂ planteados por la guía de ventilación elaborada por Aireamos, que fue desarrollada como respuesta a la emergencia sanitaria del SARS-CoV-2 a partir de la evidencia científica existente sobre la transmisión de este virus por bioaerosoles [31-33], así como por otros documentos elaborados para la disminución del riesgo de contagio en aulas [4].



Figura 1.4. Límites de CO₂ como indicador indirecto de riesgo de infección de la *Guía de ventilación en aulas para prevención de COVID-19* [30].

Dicha guía plantea de forma simplificada que el umbral límite absoluto para el valor relativo de CO₂ no debería sobrepasar las 700 ppm, proponiendo 800 ppm como valor a partir del cual deberían tomarse medidas inmediatas para mejorar la ventilación del recinto.

Referencias

- [1] N. E. Klepeis, W. C. Nelson, W. R. Ott, J. P. Robinson, A. M. Tsang, P. Switzer, J. V Behar, S. C. Hern y W. H. Engelmann, «The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants», *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, vol. 11, pp. 231-252, 2001, doi: 10.1038/sj.jea.7500165.
- [2] W. R. Lane, *Education, Children and Comfort*. Ames, IA, EE.UU, University of Iowa, 1965.
- [3] C. Schweizer, R. D. Edwards, L. Bayer-Oglesby, W. J. Gauderman, V. Ilacqua, M. J. Jantunen, H. K. Lai, M. Nieuwenhuijsen y N. Künzli, «Indoor time-microenvironment-activity patterns in seven regions of Europe», *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, vol. 17, pp. 170-181, 2007, doi: 10.1038/sj.jes.7500490.
- [4] M. de la C. Minguillón, X. Querol, J. M. Felisi y T. Garrido, *Guía para ventilación en aulas*, 2020, doi: 10.20350/digitalCSIC/12677.
- [5] AEMET, *El observatorio de Izaña vuelve a registrar en mayo de 2021 un máximo histórico en la concentración de dióxido de carbono (CO₂)*, 2021. <https://aemetblog.es/2021/06/21/el-observatorio-de-izana-vuelve-a-registrar-en-mayo-de-2021-un-maximo-historico-en-la-concentracion-de-dioxido-de-carbono-co2/>
- [6] K. George, L. H. Ziska, J. A. Bunce y B. Quebedeaux, «Elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature across an urban-rural transect», *Atmos. Environ.*, vol. 41, n.º 35, pp. 7654-7665, 2007, doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.08.018.
- [7] J. Kaye, F. Buchanan, A. Kendrick, P. Johnson, C. Lowry, J. Bailey, D. Nutt y S. Lightman, «Acute carbon dioxide exposure in healthy adults: evaluation of a novel means of investigating the stress response», *J. Neuroendocrinol.*, vol. 16, n.º 3, pp. 256-264, 2004, doi: 10.1111/j.0953-8194.2004.01158.x.
- [8] P. Wargocki, D. P. Wyon, J. Sundell, G. Clausen y P. O. Fanger, «The Effects of Outdoor Air Supply Rate in an Office on Perceived Air Quality, Sick Building Syndrome (SBS) Symptoms and Productivity», *Indoor Air*, vol. 10, n.º 4, pp. 222-236, 2001, doi: 10.1034/j.1600-0668.2000.010004222.x.
- [9] K. E. Schaefer, «Effects of increased ambient CO₂ levels on human and animal health», *Experimentia*, vol. 38, n.º 10, pp. 1163-1168, 1982, doi: 10.1007/BF01959726.

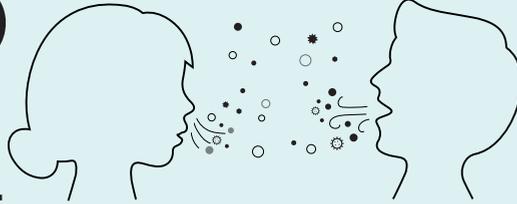
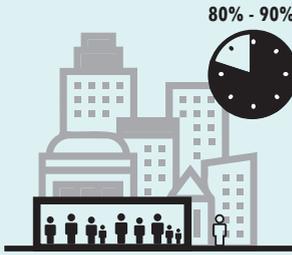
- [10] D. Norbäck, G. Wieslander, X. Zhang y Z. Zhai, «Respiratory symptoms, perceived air quality and physiological signs in elementary school pupils in relation to displacement and mixing ventilation system: an intervention study», *Indoor Air*, vol. 21, pp. 427-437, 2011, doi: 10.1111/j.1600-0668.2011.00717.x.
- [11] M. Simoni, I. Annesi-Maesano, T. Sigsgaard, D. Norback, G. Wieslander, W. Nystad, M. Cancianie, P. Sestini y G. Viegi, «School air quality related to dry cough, rhinitis and nasal patency in children», *Eur. Respir. J.*, vol. 35, n.º 4, pp. 742-749, 2010, doi: 10.1183/09031936.00016309.
- [12] C. M. Maresh, L. E. Armstrong, S. A. Kavouras, G. J. Allen, D. J. Casa, M. Whittlesey y K. E. LaGasse, «Physiological and Psychological Effects Associated with High Carbon Dioxide Levels in Healthy Men», *Aviat. Space. Environ. Med.*, vol. 68, n.º 1, pp. 41-45, 1997.
- [13] P. S. Burge, «Sick building syndrome», *Occup. Environ. Med.*, vol. 61, pp. 185-190, 2004, doi: 10.1136/oem.2003.008813.
- [14] C. A. Erdmann and M. G. Apte, «Mucous membrane and lower respiratory building related symptoms in relation to indoor carbon dioxide concentrations in the 100-building BASE dataset», *Indoor Air*, vol. 14, pp. 127-134, 2004, doi: 10.1111/j.1600-0668.2004.00298.x.
- [15] T. Vehviläinen, H. Lindholm, H. Rintamäki, R. Pääkkönen, A. Hirvonen, O. Niemi y J. Vinha, «High indoor CO₂ concentrations in an office environment increases the transcutaneous CO₂ level and sleepiness during cognitive work», *J. Occup. Environ. Hyg.*, vol. 13, n.º 1, pp. 19-29, 2016, doi: 10.1080/15459624.2015.1076160.
- [16] A. Gundel, J. Drescher y M. R. Weihs, «Joint NASA-ESA-DARA study. Part three: cardiorespiratory response to elevated CO₂ levels during sleep», *Aviat. Sp. Environ. Med.*, vol. 69, n.º 5, pp. 496-500, 1998, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9591621/>
- [17] K. Azuma, N. Kagi, U. Yanagi y H. Osawa, «Effects of low-level inhalation exposure to carbon dioxide in indoor environments: a short review on human health and psychomotor performance», *Environ. Int.*, vol. 121, pp. 51-56, 2018, doi: 10.1016/j.envint.2018.08.059.
- [18] O. Seppänen and W. J. Fisk, «Association of ventilation system type with SBS symptoms in office workers», *Indoor Air*, vol. 12, n.º 2, pp. 98-112, 2002, doi: 10.1034/j.1600-0668.2002.01111.x.
- [19] O. A. Seppänen, W. J. Fisk y M. J. Mendell, «Association of ventilation rates and CO₂ concentrations with health and other responses in commercial and institutional buildings», *Indoor Air*, vol. 9, n.º 4, pp. 226-252, 1999, doi: 10.1111/j.1600-0668.1999.00003.x.
- [20] L. Kajtár and L. Herczeg, «Influence of carbon-dioxide concentration on human well-being and intensity of mental work», *Idojaras*, vol. 116, n.º 2, pp. 145-169, 2012.

- [21] U. Satish, M. J. Mendell, K. Shekhar, T. Hotchi y D. Sullivan, «Is CO2 an Indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO2 concentrations on human decision-making performance», *Environ. Health Perspect.*, vol. 120, n.º 12, pp. 1671-1678, 2012.
- [22] J. G. Allen, P. MacNaughton, U. Satish, S. Santanam, J. Vallarino y J. D. Spengler, «Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation and volatile organic compound exposures in office workers: A controlled exposure study of green and conventional office environments», *Environ. Health Perspect.*, vol. 124, n.º 6, pp. 805-812, 2016, doi: 10.1289/ehp.1510037.
- [23] Z. Bakó-Biró, D. J. Clements-Croome, N. Kochhar, H. B. Awbi y M. J. Williams, «Ventilation rates in schools and pupils' performance», *Build. Environ.*, vol. 48, n.º 1, pp. 215-223, 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.08.018.
- [24] Z. Peng and J. L. Jimenez, «Exhaled CO2 as a COVID-19 infection risk proxy for different indoor environments and activities», *Environ. Sci. Technol. Lett.*, vol. 8, n.º 5, pp. 392-397, 2021, doi: 10.1021/acs.estlett.1c00183.
- [25] Ministerio de Fomento del Gobierno de España, «Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación», BOE-A-2006-5515, 2006.
- [26] Ministerio de la Presidencia del Gobierno de España, «Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios», BOE n.º 207, 2007, Madrid, Ministerio de la Presidencia del Gobierno de España, 2021, p. 97. <https://www.boe.es/buscar/pdf/2007/BOE-A-2007-15820-consolidado.pdf>
- [27] Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales del Gobierno de España, «Real Decreto 486/1997, de 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo», BOE n.º 97, 1997, Madrid, Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales del Gobierno de España, 1997, p. 14.
- [28] Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo, *Guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relativos a la utilización de los lugares de trabajo*. Madrid, Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo, 2015.
- [29] M. J. Berenguer y F. Bernal, *NTP 549: el dióxido de carbono en la evaluación de la calidad del aire interior*. Madrid, 2000. https://www.insst.es/documents/94886/327064/ntp_549.pdf/e9364a82-6f1b-4590-90e0-1d08b22e1074
- [30] Plataforma Aireamos, *Ventilación en aulas para prevención de COVID-19: límites de CO2 recomendados en periodo de emergencia*. Plataforma Aireamos, 2021. https://drive.google.com/file/d/1jFavucO98vMz5_LpKtnDXBfDZvWlMLcl/view

- [31] H. Qian, T. Miao, L. Liu, X. Zheng, D. Luo y Y. Li, «Indoor transmission of SARS-CoV-2», *Indoor Air*, vol. 31, n.º 3, pp. 639-645, 2021, doi: 10.1111/ina.12766.
- [32] 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.
- [33] T. Greenhalgh, J. L. Jiménez, K. A. Prather, Z. Tufekci, D. Fisman y R. Schooley, «Ten scientific reasons in support of airborne transmission of SARS-CoV-2», *Lancet*, vol. 397, n.º 10285, pp. 1603-1605, 2021, doi: 10.1016/S0140-6736(21)00869-2.

CAPÍTULO 1

¿POR QUÉ VENTILAR?

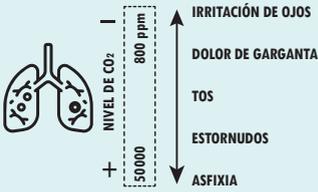


VENTILAR MANTIENE A RAYA:

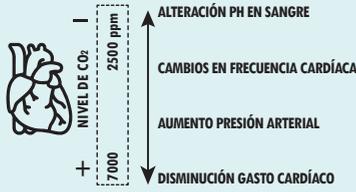
- CONTAMINANTES INTERIORES
- * AEROALÉRGENOS INTERIORES
- PATÓGENOS INTERIORES
 - VIRUS
 - BACTERIAS
 - HONGOS
- DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂)
- MATERIAL PARTICULADO INTERIOR (PM)
- VAPOR DE AGUA
- OXÍGENO (O₂)

EFFECTOS SOBRE LA SALUD

SISTEMA RESPIRATORIO



SISTEMA CARDIOVASCULAR



RENDIMIENTO COGNITIVO

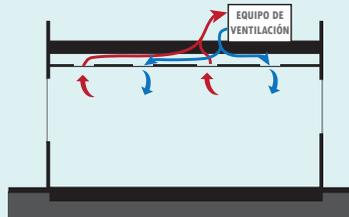


¿CÓMO SE VENTILA?

VENTILACIÓN NATURAL CDDM



VENTILACIÓN MECÁNICA CONTROLADA



¿POR QUÉ HAY QUE MEDIR?



"Lo que no se define no se puede medir. Lo que no se mide no se puede mejorar. Lo que no se mejora se degrada siempre."
Lord Kelvin

¿QUÉ DICE LA NORMATIVA?

CTE DB-HE3

CO₂MED ≤ 900 ppm

CO₂MÁX* ≤ 1.600 ppm

* ≤ 500.000 ppm · h/año

RITE

IDA 1: 770 ppm

IDA 2: 920 ppm

IDA 3: 1.220 ppm

R.D. 486/97

CO₂ ≤ 1.220 ppm

30 m³/h · ocupante

NTP 549

CO₂ ≤ 1.000 ppm

CO₂ ≤ 5.000 ppm

BUENAS PRÁCTICAS

P.AIREAMOS

CO₂ ≤ 700 ppm

BUENAS PRÁCTICAS

Estimación del riesgo relativo de transmisión de enfermedades aéreas mediante el modelo de Wells–Riley

MIGUEL ÁNGEL CAMPANO
JESSICA FERNÁNDEZ-AGÜERA
PEDRO BUSTAMANTE

Escuela Técnica Superior de Arquitectura,
Universidad de Sevilla (US), Sevilla, España

JOSÉ LUIS JIMÉNEZ

Dept. of Chemistry and CIRES, University of Colorado, Boulder, Colorado, Estados Unidos.

Lista de acrónimos

- ACH renovaciones por hora (acrónimo del inglés *air changes per hour*).
- AR tasa de ataque (acrónimo del inglés *attack rate*).
- B tasa de flujo volumétrico respiratorio de las personas susceptibles.
- B_0 frecuencia respiratoria volumétrica promedio de una persona susceptible con actividad sedentaria, de acuerdo con su edad y tamaño.
- C número de casos de infección secundarios por una enfermedad en un evento dado.
- COVID-19 acrónimo de enfermedad por coronavirus (del inglés *CO*rona*V*irus *D*isease-2019).
- CO_2 dióxido de carbono.
- D periodo de exposición en un evento dado.
- E_F factor de mejora de una variante de la enfermedad dada, con transmisión aérea.
- E_p tasa de exhalación de *quanta* que emite una persona infecciosa con una actividad metabólica y de vocalización dada.
- E_{p0} tasa de exhalación de *quanta* de una enfermedad dada, con transmisión por el aire, que tiene una persona infecciosa que está respirando oralmente, en silencio y con actividad sedentaria.
- E_{p,CO_2} es la tasa de exhalación de CO_2 por persona, dependiente de la actividad metabólica, la edad, el sexo biológico y el tamaño.

EPI equipo de protección individual.

f_e eficiencia de penetración de las partículas infectivas a través de las mascarillas/respiradores en la exhalación.

f_{fil} eficiencia de retirada de partículas de 1 a 3 μm de un filtro.

f_i eficiencia de penetración de las partículas infectivas a través de las mascarillas/respiradores en la inhalación, que considera el efecto de la fracción de ocupantes que llevan mascarillas/respiradores.

HEPA filtros de partículas de alta eficiencia (de sus siglas en inglés *high efficiency particulate air*).

H_r indicador del aumento del riesgo relativo individual de contagio global de enfermedades de transmisión aérea en un evento dado.

MERS-CoV síndrome respiratorio de oriente medio (acrónimo del inglés *Middle East respiratory syndrome coronavirus*).

MERV valor mínimo de eficiencia de filtrado de un filtro (acrónimo del inglés *minimum efficiency reporting values*).

n dosis infecciosa inhalada por un ocupante susceptible a una enfermedad en un evento dado.

N número de ocupantes en el evento.

N_i número de ocupantes infecciosos en el evento.

$N_{m,i}$ es el porcentaje de ocupantes infectivos en el evento con pantallas faciales, mascarillas y respiradores.

$N_{m,s}$ es el porcentaje de ocupantes susceptibles en el evento con pantallas faciales, mascarillas y respiradores.

Q_{cle} caudal de aire proporcionado por el equipo de limpieza de aire.

R riesgo individual de infección frente a una enfermedad en un evento dado

r_B variación del flujo de aire inhalado según la actividad desarrollada.

r_E incremento relativo de emisión vírica debido a la actividad y la vocalización.

r_{ss} factor multiplicativo aplicado para eventos demasiado cortos para alcanzar aproximadamente el estado estacionario.

RH humedad relativa del aire (acrónimo del inglés *relative humidity*).

S número de individuos susceptibles y sanos expuestos a una enfermedad en un evento dado.

SARS-CoV-1 síndrome respiratorio agudo severo (acrónimo del inglés *severe acute respiratory syndrome coronavirus 1*).

SARS-CoV-2 síndrome respiratorio agudo severo (acrónimo del inglés *severe acute respiratory syndrome coronavirus 2*).

T_a temperatura media del aire en un recinto.

UV ultravioleta.

UVB índice de exposición a luz ultravioleta proveniente del sol.

V volumen del recinto donde se produce el evento.

v_a velocidad del aire.

$\Delta[CO_2]$ exceso de CO_2 en un espacio interior respecto del valor exterior.

λ tasa de retirada de carga vírica.

λ_0 tasa de retirada de *quanta* de primer orden, derivada del efecto de la ventilación con aire exterior.

λ_{cle} es la tasa de retirada de *quanta* por acción de dispositivos de limpieza de aire.
 λ_{dec} es la tasa de decaimiento de la infectividad del virus en el aire.
 λ_{dep} es la tasa de la deposición promedio en superficies de los bioaerosoles con carga vírica.

2.1. Introducción

La promoción de una adecuada calidad del aire en espacios interiores es una cuestión de salud pública, ya que, de esta manera, se permite mantener a niveles adecuados diferentes parámetros y contaminantes ambientales derivados de la actividad humana. En este contexto, el hecho de que la población habite espacios más saludables puede repercutir en una disminución de las bajas laborales, pudiéndose traducir a una reducción de hasta el 35 % del absentismo laboral por enfermedad [1].

Su evaluación puede ser sencilla, tal como se ha discutido en el capítulo previo sobre «Ventilación y CO₂, contaminante e indicador indirecto de la degradación ambiental» [2]. En ausencia de otras fuentes significativas de emisión de dióxido de carbono (CO₂), el incremento de la concentración de este gas en un espacio interior dado, en relación con el nivel exterior de fondo (denominado «exceso de CO₂», $\Delta[CO_2]$), se debe principalmente a la exhalación de los ocupantes. Monitorizar el exceso de CO₂ en interiores, por lo tanto, puede ser un buen indicador indirecto para caracterizar el proceso de la ventilación, especialmente en entornos con una alta densidad de ocupantes como las aulas.

La transmisión de enfermedades respiratorias, como la del SARS-CoV-2, ha sido ampliamente probada por la comunidad científica [3, 4], incluyendo el caso de instituciones educativas [5]. La monitorización del nivel de CO₂ en espacios interiores se puede utilizar para estimar el riesgo de transmisión de estas enfermedades, ya que los aerosoles cargados de viriones,¹ emitidos por los ocupantes con infección activa durante la respiración de forma similar a la exhalación de CO₂, pueden acumularse fácilmente en estos espacios cerrados. Dada esta relación, es posible evaluar indirectamente el riesgo de infección de enfermedades por aerosoles (media y larga distancia) en cada espacio interior, utilizando el exceso de CO₂ como representación (*proxy*).

1. Viriones: partículas víricas infecciosas.

2.2. Modelo de Wells-Riley para propagación aérea de enfermedades

El procedimiento matemático desarrollado por Wells-Riley para el estudio estadístico de la propagación de enfermedades mediante aerosoles (media y larga distancia), refinado y adaptado por Buonanno *et al.* [6] y Peng *et al.* [7, 8], permite estimar el riesgo de infección a través del cálculo de los *quanta* que podría inhalar cada ocupante durante un evento dado en un espacio interior, considerando que hay uno o más ocupantes infecciosos en el recinto. Para ello, es necesario tener en cuenta diferentes aspectos.

2.2.1. ¿Qué es un *quantum*?

Un *quantum* (plural, *quanta*) es la dosis mínima de aerosoles con carga vírica suficiente para causar la infección en el 63% de ocupantes susceptibles de contraer la enfermedad. Así, exponerse a un *quantum* de una enfermedad dada implica que es probable que se contraiga dicha enfermedad en caso de ser susceptible a esta.

2.2.2. ¿Pueden contagiarse todos los ocupantes durante un evento?

No todo ocupante presente en el evento es necesariamente susceptible de contagiarse, dado que previamente puede haber desarrollado inmunidad frente a la infección que sea efectiva en ese momento. Esta puede deberse, entre otros, tanto al hecho de haber pasado recientemente la enfermedad como por la vacunación, así como a la inmunidad natural y la sensibilidad de cada individuo.

2.2.3. ¿Qué es la tasa de emisión de *quanta*?

La tasa de emisión de *quanta* de un sujeto infectivo (E_p , en quanta^{-1}) es la carga vírica viable emitida por dicho sujeto a lo largo de una hora. Este valor se obtiene a partir de la tasa básica de exhalación de la enfermedad dada (E_{p0} , para una actividad sedentaria con respiración nasal), y se basa en la hipótesis de que los aerosoles emitidos por un sujeto infectado [9] contienen la misma carga viral (en copias por mL) que la existente en un esputo [10]. Para adecuarla a las actividades desarrolladas durante el evento, esta tasa básica es aumentada mediante la tasa de incremento relativo de emisión vírica debido a la actividad y la vocalización (r_E) según [9]:

- Las características físicas (edad, peso, etc.) del sujeto infeccioso.

- La actividad metabólica (en reposo, sentado con trabajo ligero, caminando, en pie con trabajo medio o pesado, etc.) del sujeto infeccioso [8, 11, 12].
- La actividad de vocalización del sujeto infeccioso: en silencio (respiración nasal), hablando, gritando/cantando, etc.

Como se puede ver en la tabla 2.1, donde se muestran diversos valores predictivos de E_p para algunas enfermedades de transmisión aérea, esta emisión vírica depende en gran medida de la actividad de vocalización, siendo un factor determinante a la hora de evaluar el riesgo de contagio.

Tabla 2.1. Valores predictivos de E_p ($quant\alpha^{-1}$), según actividad metabólica y de vocalización para SARS-CoV-2, rinovirus humano y gripe estacional, para los percentiles 50 y 85 [13, 14]

Patógeno	Actividad metabólica y de vocalización (percentiles 50/85)		
	Sedentaria, respiración oral	En pie, hablando	Actividad ligera, hablando alto
Gripe estacional	0,035 / 0,257	0,168 / 1,250	2,972 / 22,063
Rinovirus humano	0,209 / 1,514	0,995 / 7,211	17,908 / 129,805
SARS-CoV-2	3,336 / 18,600	19,018 / 106,020	283,596 / 1581,000
$r_{E,SARS-CoV-2}$	x1,0	x5,7	x85,0

La tabla A1 contiene más valores predictivos de E_p para otras de las enfermedades aéreas más comunes.

2.2.4. ¿Cómo afectan las variantes al riesgo de contagio?

Cuando se analiza una variante de una enfermedad, con una capacidad de propagación diferente a la de la variante de referencia, es posible tomar el valor de E_p de dicha variante de partida y modificarlo mediante un factor de mejora (E_F). Este se define como el cociente entre el número de reproducción efectivo (r_e) de la variante en estudio y la variante de referencia. Por ejemplo, el E_F de la variante Alpha del SARS-CoV-2 puede considerarse como 1,5 respecto de la variante original, mientras que el valor de Ómicron BA.1 puede tomarse como 2,5 [15]. La tabla A2 recoge valores de E_F para algunas de las principales variantes del SARS-CoV-2.

2.2.5. ¿Qué variables influyen en la transmisión aérea?

Una vez estimada la emisión de partículas infectivas debido a la respiración y vocalización del sujeto infeccioso, el método asume que se produce una distribución por el recinto interior (considerando la simplificación que este proceso es homogéneo en el volumen del recinto, al tomarse la atmósfera como completamente mezclada). La emisión se acumula paulatinamente a lo largo de la duración del evento. Sin embargo, tanto la cantidad de bioaerosoles en suspensión como la infectividad de estos también es afectada por el paso del tiempo, según diversas variables, como:

- la duración del evento,
- las condiciones ambientales interiores (temperatura del aire, \bar{T}_a ; humedad relativa, RH ; velocidad del aire, v_a ; etc.), así como la densidad y distribución del mobiliario en el recinto. Esto afecta a:
 - El tiempo promedio de suspensión de los bioaerosoles infectivos (tasa de deposición promedio en superficies de los bio-aerosoles con carga vírica, λ_{dep} en las cuales termina inactivándose [16, 17]). Este también varía según el diámetro promedio de los aerosoles. La tabla A3 contiene diversos valores para λ_{dep} (h^{-1}) según distribución del mobiliario y velocidad del aire.
 - La tasa de decaimiento del virus en el aire (tiempo de inactivación promedio de su capacidad infectiva, λ_{dec} [18]). En esta tasa influye la exposición prolongada del ambiente interior a la luz solar, como se muestra en la ecuación A1.
- El nivel de renovación de aire exterior ya sea por ventilación natural (voluntaria o infiltraciones) o por ventilación mecánica controlada.
- Volumen de aire contenido en el recinto, que puede actuar como «reservorio de aire» a la hora de diluir con mayor efectividad la carga vírica emitida.
- Retirada de carga vírica mediante:
 - Equipos de protección individual (EPI) de los sujetos infecciosos (mascarillas y respiradores) [19-22]. La tabla A4 muestra la eficiencia en la reducción de la exhalación vírica de estos EPI (mex).
 - Elementos de filtrado en sala (filtros de alta eficiencia, filtros HEPA). La tabla A5 recoge diferentes valores de eficiencia de filtrado de estos elementos [23, 24], utilizadas para calcular la tasa de retirada de *quanta* por acción de dispositivos de limpieza de aire (λ_{cle} , h^{-1}) mediante la ecuación A2.
- Sistemas de inactivación del virus (equipos de radiación ultravioleta). El método asume la eficacia especificada por el fabricante en sus fichas de características (sin entrar a discutir su eficiencia volumétrica).

A partir de este número de *quanta* (dosis víricas viables) suspendidos en el ambiente del recinto a lo largo del evento, contando ya con las diversas variables de inactivación/retirada de aerosoles infecciosos, es posible prever el total estadístico de *quanta* que puede inhalar una persona susceptible presente (n). Para ello, se requiere:

- La tasa de inhalación para exposiciones de corta duración a lo largo del evento, siendo posible estimarla a partir del sexo, edad y la actividad metabólica desarrollada de los ocupantes susceptibles [11]. Dicha tasa (tabla A6), puede ser equivalente a la tasa de flujo volumétrico respiratorio de las personas susceptibles (B , m^3/h).
- El uso y ajuste de los EPI de los sujetos vulnerables (mascarillas y respiradores). La tabla A4 muestra la eficiencia en la reducción de la inhalación vírica de estos EPI (m_{in}).

Una vez conocido el total de *quanta* inhalados por un ocupante susceptible mediante este procedimiento probabilístico (figura 2.1), es posible establecer el riesgo individual de infección y, a partir de él, el número de casos secundarios de contagio potenciales.

Como se indicó previamente, el hecho de inhalar una dosis vírica suficiente para infectar al 63 % de las personas susceptibles (*quantum*) no implica que un ocupante necesariamente se contagie. Por un lado, este procedimiento es un cálculo probabilístico que simplifica la complejidad de la realidad existente, y por otro, los ocupantes pueden no ser susceptibles al contagio en el momento del evento, debido a presentar en ese momento un nivel suficiente de inmunidad a la infección.

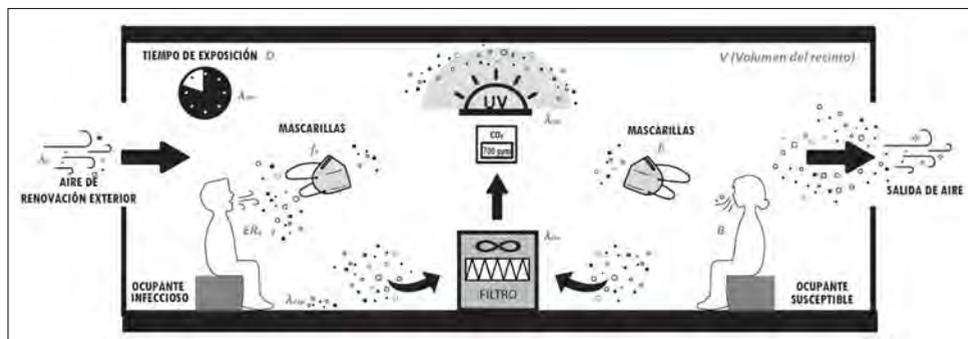


Figura 2.1. Proceso de emisión e inhalación de bioaerosoles potencialmente infecciosos, con implementación de las medidas de mitigación disponibles para la retirada/inactivación de carga vírica.

2.3. Aplicación del modelo a enfermedades de transmisión aérea

Este modelo expuesto puede aplicarse a cualquier enfermedad de transmisión aérea, entre las que se encuentran, entre otras, las derivadas de los siguientes patógenos:

- SARS-CoV-1.
- SARS-CoV-2.
- MERS-CoV (coronavirus del síndrome respiratorio de Oriente Medio).
- Adenovirus (agente causante de enfermedades respiratorias, intestinales, etc.)
- Gripe estacional.
- Rinovirus humano (agente causante del resfriado común en humanos).
- Sarampión.
- Tuberculosis, ya sea tanto en tratamiento como sin tratar.

Para ello, es necesario determinar la tasa básica de exhalación de la enfermedad que se desea analizar (E_{p0}) [13], para posteriormente poder aplicar la metodología descrita.

2.3.1. Indicadores de riesgo de infección a partir del modelo

De entre los distintos indicadores de riesgo de infección de enfermedades aéreas vinculados al modelo de Wells-Riley, cabe destacar tanto la tasa de ataque (AR) como el riesgo relativo de infección (H_r). Ambos indicadores son de gran utilidad para evaluar y comparar diversos eventos entre sí. Estos parámetros están referidos al riesgo de inhalación de la dosis vírica necesaria para generar una infección (*quantum*) que tienen los ocupantes susceptibles durante el evento. De esta manera, pueden utilizarse independientemente del número de personas vacunadas o de la efectividad de dichas vacunas.

AR (%) se define epidemiológicamente como la relación entre el número de casos de infección secundarios (C) y el número de individuos susceptibles y sanos expuestos (S) que estuvieron expuestos a una concentración 'quanta' distinta de cero [59]. Además, AR también representa el riesgo individual de infección (R) en un escenario hipotético (ecuación 1).

$$AR = C / S = R \equiv 100 \cdot (1 - e^{-n}) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde n es la dosis infecciosa inhalada por un ocupante susceptible presente en el recinto durante el evento (*quanta*), que se obtiene según las Ecuaciones 2 a 7, bajo la suposición de que no hay ocupantes ni viriones en suspensión en el ambiente del recinto al inicio del evento [8].

$$n = r_{ss} \cdot N_i \cdot E_p \cdot f_e \cdot f_i \cdot B \cdot D / (V \cdot \lambda) \quad \text{Ecuación 2}$$

$$E_p = E_{p0} \cdot r_E \cdot E_F \quad \text{Ecuación 3}$$

$$f_e = (1 - m_{ex} / 100) \cdot (N_{m,i} / 100) \quad \text{Ecuación 4}$$

$$f_i = (1 - m_{in} / 100) \cdot (N_{m,s} / 100) \quad \text{Ecuación 5}$$

$$B = B_0 \cdot r_B \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_{cle} + \lambda_{dec} + \lambda_{dep} \quad \text{Ecuación 7}$$

donde:

r_{ss} es el factor multiplicativo aplicado para eventos demasiado cortos para alcanzar aproximadamente el estado estacionario (adimensional). Habitualmente se puede considerar como 1.
 N_i es el número de ocupantes infecciosos durante el evento (personas).

E_p es la tasa de exhalación de *quanta* que emite una persona infecciosa con una actividad metabólica y de vocalización dada (*quanta/h*). Puede consultarse valores para la misma en la tabla A1.

f_e es la eficiencia de penetración de las partículas infectivas a través de las mascarillas/respiradores en la exhalación (adimensional).

f_i la eficiencia de penetración de las partículas infectivas a través de las mascarillas/respiradores en la inhalación, que considera el efecto de la fracción de ocupantes que llevan mascarillas/respiradores (adimensional).

B es la tasa de flujo volumétrico respiratorio de las personas susceptibles (m^3/h), según la tabla A6.

D es el periodo de exposición (h).

V es el volumen del recinto donde se produce el evento (m^3).

λ es la tasa de retirada de carga vírica (h^{-1}).

E_{p0} es la tasa de exhalación de *quanta* de una enfermedad dada, con transmisión por el aire, que tiene una persona infecciosa que está respirando oralmente, en silencio y con actividad sedentaria (*quanta/h*).

E_F es el factor de mejora de una variante de la enfermedad dada, con transmisión aérea (adimensional). Puede consultarse en la tabla A2.

r_E es el incremento relativo de emisión vírica debido a la actividad y la vocalización (adimensional).

m_{ex} es la eficiencia en la reducción de la exhalación vírica de pantallas faciales, mascarillas y respiradores (%). La tabla A4 recoge valores para diversas mascarillas/filtros, según su ajuste.

$N_{m,i}$ es el porcentaje de ocupantes infectivos en el evento con pantallas faciales, mascarillas y respiradores (%).

m_{in} es la eficiencia en la reducción de la inhalación vírica de pantallas faciales, mascarillas y respiradores (%). La tabla A4 muestra valores para diversas mascarillas/filtros (según ajuste).

$N_{m,s}$ es el porcentaje de ocupantes susceptibles en el evento con pantallas faciales, mascarillas y respiradores (%).

B_0 es la frecuencia respiratoria volumétrica promedio de una persona susceptible con actividad sedentaria, de acuerdo con su edad y tamaño (m^3/h).

r_B es la variación del flujo de aire inhalado según la actividad desarrollada (adimensional).

λ_0 es la tasa de retirada de *quanta* de primer orden, derivada del efecto de la ventilación con aire exterior (h^{-1}).

λ_{cle} es la tasa de retirada de *quanta* por acción de dispositivos de limpieza de aire (h^{-1}), calculada según la ecuación A2.

λ_{dec} es la tasa de decaimiento de la infectividad del virus en el aire (h^{-1}), obtenida mediante la ecuación A1.

λ_{dep} es la tasa de la deposición promedio en superficies de los bio-aerosoles con carga vírica (h^{-1}). La tabla A3 recoge diferentes valores para este índice.

Mediante este planteamiento es posible comprobar que la dosis infecciosa inhalada por un ocupante susceptible para una enfermedad dada (n) depende proporcionalmente de:

- La actividad metabólica y de vocalización de los ocupantes infecciosos (E_p).
- El número de ocupantes (N_i).
- El adecuado uso de mascarillas, tanto por parte de los ocupantes infecciosos (f_e) como de los susceptibles (f_i).
- La actividad metabólica desarrollada por los ocupantes susceptibles (B).
- La duración del evento (D).

Asimismo, esta es inversamente proporcional al volumen del recinto (V) y a la acción de las medidas de retirada de carga vírica del ambiente (λ).

H_r (h^2/m^3), por otra parte, es un indicador del aumento del riesgo relativo individual de contagio global de enfermedades de transmisión aérea en un evento dado [8], como se muestra en la ecuación 8.

$$H_r = r_{ss} \cdot r_E \cdot r_B \cdot f_e \cdot f_{irss} \cdot D / (V \cdot \lambda) \quad \text{Ecuación 8}$$

En consecuencia, se puede deducir que H_r no depende de ninguna enfermedad/variante específica, dado que se obtiene a partir del incremento de la emisión *quanta* derivado de la actividad/vocalización (r_E) y de la variación del flujo de aire inhalado por la actividad (r_B), pero no de la tasa básica de exhalación de una enfermedad concreta (E_{p0}).

Se proponen tres categorías de riesgo (bajo, medio y alto) para estos indicadores. Estos niveles se basan en los estudios previos realizados en espacios interiores en los que se dieron brotes documentados, como se puede observar en la tabla 2.2 [7, 8]. Para el SARS-CoV-2 original, se puede considerar que no se han encontrado brotes documentados cuando AR fue inferior a 0,5 % [8].

Tabla 2.2. Valores de las categorías de riesgo de los indicadores AR y H_r

	Bajo	Medio	Alto
AR (%)	< 0,5	< 5,0	$\geq 5,0$
H_r (h^2/m^3) para el SARS-CoV-2 original	< 0,001	< 0,010	$\geq 0,010$

2.3.2. Limitaciones del modelo de Wells-Riley

Esta metodología probabilística presenta un conjunto de asunciones y condiciones de aplicación para su utilización, al acotar determinados aspectos de la realidad existente con una serie de suposiciones:

- Considera que la atmósfera del espacio interior analizado es homogénea (ambiente completamente mezclado), con lo que la carga vírica pasaría a distribuirse uniformemente. Así, los resultados obtenidos pueden llegar a diferir ligeramente de los casos reales, pese a que el modelo ha sido previamente validado por comparación con brotes existentes en espacios de dimensiones medianas/grandes [8] y ser una suposición razonable en la mayoría de los ambientes interiores habituales.
- Este procedimiento excluye la transmisión por gotitas y contacto/fómites.
- La metodología asume que se respeta un distanciamiento social de 2 m (6 pies), ya que se centra en el método de transmisión mediante aerosoles de medio/largo alcance.

Por todo esto, en algunos casos, las tasas de infección calculadas con este modelo pueden ser levemente más bajas que las reales, especialmente para los ocupantes cercanos a los sujetos infecciosos.

2.4. Nivel de CO₂ como *proxy* de riesgo en el modelo de Wells-Riley

Dado que tanto el CO₂ como los aerosoles potencialmente infectivos se exhalan durante el proceso respiratorio, siendo ambos dependientes de la actividad metabólica, es posible tomar el nivel promedio de incremento de CO₂ respecto a la atmósfera exterior ($\Delta[CO_2]$) a lo largo del evento y utilizarlo como indicador indirecto del riesgo de contagio. De esta forma, se utiliza este exceso promedio de CO₂ como indicador del proceso de ventilación en un recinto ocupado, asumiendo algunas limitaciones, dado que ésta actúa como una de las principales medidas de mitigación en el modelo adaptado de Wells-Riley.

Según lo expuesto, la relación entre la tasa de retirada de *quanta* de primer orden derivada del efecto de la ventilación con aire exterior (λ_0) y el valor promedio homogéneo del diferencial de CO₂ entre interior y exterior durante un evento ($\Delta[CO_2]_{avg}$ en ppm) puede definirse como en la ecuación 9 [7].

$$\Delta[\text{CO}_2]_{\text{avg}} = \frac{N \cdot E_{p,\text{CO}_2}}{V} \cdot \left(\frac{1}{\lambda_0} - \frac{1 - e^{(-\lambda_0 \cdot D)}}{\lambda_0^2 \cdot D} \right)$$

Ecuación 9

donde:

N es el número de ocupantes (personas).

E_{p,CO_2} es la tasa de exhalación de CO_2 por persona, dependiente de la actividad metabólica, la edad, el sexo biológico y el tamaño (m^3/h). Pueden consultarse en las tablas A6 y A7.

D es el periodo de exposición (h).

V es el volumen del recinto donde se produce el evento (m^3).

λ_0 es la tasa de retirada de *quanta* de primer orden, derivada del efecto de la ventilación con aire exterior (h^{-1}).

La tasa de exhalación de CO_2 por persona (E_{p,CO_2}) puede obtenerse a partir de los valores mostrados en las tablas A6 y A7 [12], deducidos en función de la actividad metabólica, el sexo biológico y la edad. Asimismo, la tabla A9 muestra, a modo de ejemplo, algunas correspondencias entre diversas actividades cotidianas y el valor asociado del nivel de actividad física, expresado en *met* [25, 26].

Así, al conocer el valor de $\Delta[\text{CO}_2]_{\text{avg}}$ durante un evento realizado en un espacio interior, puede realizarse una estimación de los *quanta* ya emitidos que son retirados del aire gracias a la ventilación, reduciendo por tanto el total de *quanta* inhalados por los ocupantes susceptibles (al que también afectan el resto de las tasas de retirada de *quanta*). De esta forma, y a partir de esta posible dosis inhalada, es factible estimar los diferentes indicadores relativos de infección (entre los que destacan AR y H_r , anteriormente explicados).

2.4.1. Limitaciones del uso del CO_2 como *proxy* de riesgo de transmisión de enfermedades

Es necesario destacar que esta aproximación para estimar el riesgo tiene algunas limitaciones, derivadas de las presentes del método de Wells-Riley [27]:

- La cantidad de viriones en el aire a lo largo del evento no escala necesariamente con los valores de $\Delta[\text{CO}_2]$. A diferencia de las moléculas de este gas, los viriones –transportados en los bioaerosoles– sí terminan tanto depositándose en el mobiliario y superficies interiores, como inactivándose desde el punto de vista de la infectividad. Estos fenómenos suceden con mayor o menor velocidad en función de las condiciones ambientales, así como de la distribución del mobiliario y elementos del recinto. Este aspecto puede ser incorporado de forma probabilística en la adaptación planteada del modelo (introduciendo lógicamente cierto margen de in-

certidumbre), a través tanto del parámetro de tiempo promedio de suspensión como de la tasa de decaimiento del virus.

- La presencia de ocupantes implica necesariamente la emisión de CO₂ como parte de la respiración, estando vinculada esta al metabolismo (actividad, edad, peso, etc.). Sin embargo, solo se podrá dar la posibilidad de que haya aerosoles con carga vírica cuando uno o más de los ocupantes del recinto estén infectados. Por lo tanto, el riesgo evaluado solo se produce realmente si existe algún ocupante infectado.
- El nivel de CO₂ de un recinto no es afectado por la acción de otras de las medidas de mitigación, como el uso de mascarillas y respiradores, así como empleo de técnicas de filtrado o esterilización mediante radiación ultravioleta. Para ello, el método que se propone incorpora estos aspectos como modificadores del riesgo.
- Por el contrario, la retirada o conversión de CO₂ del aire mediante procesos de reacción química (como la purificación de aire mediante sorción u otros métodos de captura de CO₂) no modifica la carga vírica suspendida en el aire del recinto ni disminuye los riesgos de contagio.
- Finalmente, esta aproximación requiere asumir que el aire contenido en el recinto tiene un comportamiento completamente homogéneo, suposición que no es realista en espacios de volumen de aire contenido medio o grande, así como en aquellos con altura libre elevada, donde se pueda producir tanto una estratificación acusada como que el CO₂ se concentre en determinadas áreas del espacio, debido a un menor movimiento del aire o baja mezcla de la atmósfera interior.

No obstante, cabe destacar que este método adaptado de estimación del riesgo relativo ha sido validado por Peng *et al.* (2022) mediante comparación con diversos eventos de superpropagación documentados durante la crisis sanitaria COVID-19 [8].

Referencias

- [1] D. K. Milton, P. M. Glencross y M. D. Walters, «Risk of sick leave associated with outdoor air supply rate, humidification, and occupant complaints», *Indoor Air*, vol. 10, n.º 4, pp. 212-221, 2000, doi: 10.1034/j.1600-0668.2000.010004212.x.
- [2] M. Á. Campano, J. Fernández-Agüera, M. Sánchez-Muñoz y J. J. Sendra, «Ventilación y CO₂, contaminante e indicador indirecto de la degradación ambiental», en J. Fernández-Agüera, M. Á. Campano y J. J. Sendra (eds.), *Calidad del aire interior en los edificios para el bienestar: estrategias de aplicación práctica*. Barcelona, Octaedro, 2023, p. 178.

- [3] T. Greenhalgh, J. L. Jiménez, K. A. Prather, Z. Tufekci, D. Fisman y R. Schooley, «Ten scientific reasons in support of airborne transmission of SARS-CoV-2», *Lancet*, vol. 397, n.º 10285, pp. 1603-1605, 2021, doi: 10.1016/S0140-6736(21)00869-2.
- [4] C. C. Wang *et al.*, «Airborne transmission of respiratory viruses», *Science*, vol. 373, n.º 6558, 2021, doi: 10.1126/science.abd9149.
- [5] E. Lorthe *et al.*, «A SARS-CoV-2 omicron (B.1.1.529) variant outbreak in a primary school in Geneva, Switzerland», *Lancet Infect. Dis.*, vol. 0, n.º 0, 2022, doi: 10.1016/S1473-3099(22)00267-5.
- [6] G. Buonanno, L. Morawska y L. Stabile, «Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection: prospective and retrospective applications», *Environ. Int.*, vol. 145, p. 106112, 2020, doi: 10.1016/j.envint.2020.106112.
- [7] Z. Peng y J. L. Jiménez, «Exhaled CO₂ as a COVID-19 infection risk proxy for different indoor environments and activities», *Environ. Sci. Technol. Lett.*, vol. 8, n.º 5, pp. 392-397, 2021, doi: 10.1021/acs.estlett.1c00183.
- [8] Z. Peng *et al.*, «Practical indicators for risk of airborne transmission in shared indoor environments and their application to COVID-19 outbreaks», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 56, n.º 2, pp. 1125-1137, 2022, doi: 10.1021/acs.est.1c06531.
- [9] L. Morawska *et al.*, «Size distribution and sites of origin of droplets expelled from the human respiratory tract during expiratory activities», *J. Aerosol Sci.*, vol. 40, n.º 3, pp. 256-269, 2009, doi: 10.1016/j.jaerosci.2008.11.002.
- [10] G. Buonanno, L. Stabile y L. Morawska, «Estimation of airborne viral emission: quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment», *Environ. Int.*, vol. 141, p. 105794, 2020, doi: 10.1016/j.envint.2020.105794.
- [11] B. Wang, Z. Wang, Y. Wei, F. Wang y X. Duan, «Exposure Factors Handbook», en *Highlights of the Chinese exposure factors handbook*. U.S. Environmental Protection Agency, 2011, pp. 1-96.
- [12] A. Persily y L. de Jonge, «Carbon dioxide generation rates for building occupants», *Indoor Air*, vol. 27, n.º 5, pp. 868-879, 2017, doi: 10.1111/ina.12383.
- [13] A. Mikszewski, L. Stabile, G. Buonanno y L. Morawska, «The airborne contagiousness of respiratory viruses: a comparative analysis and implications for mitigation», *Geosci. Front.*, vol. 13, n.º 6, p. 101285, 2021, doi: 10.1016/j.gsf.2021.101285.
- [14] M. Á. Campano-Laborda *et al.*, *COVID risk airborne*. Sevilla, Universidad de Sevilla, 2021. www.covidairbornerisk.com
- [15] D. Rodríguez, I. R. Urbieto, Á. Velasco, M. Á. Campano-Laborda y E. Jiménez, «Assessment of indoor air quality and risk of COVID-19 infec-

- tion in Spanish secondary school and university classrooms», *Build. Environ.*, vol. 226, p. 109717, 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109717.
- [16] M. Schuit *et al.*, «Airborne SARS-CoV-2 is rapidly inactivated by simulated sunlight», *J. Infect. Dis.*, vol. 222, n.º 4, pp. 564-571, 2020, doi: 10.1093/infdis/jiaa334.
- [17] S. J. Smither, L. S. Eastaugh, J. S. Findlay y M. S. Lever, «Experimental aerosol survival of SARS-CoV-2 in artificial saliva and tissue culture media at medium and high humidity», *Emerg. Microbes Infect.*, vol. 9, n.º 1, pp. 1415-1417, 2020, doi: 10.1080/22221751.2020.1777906.
- [18] N. van Doremalen *et al.*, «Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1», *N. Engl. J. Med.*, vol. 382, n.º 16, pp. 1-4, 2020, doi: 10.1056/nejmc2004973.
- [19] A. Davies, K.-A. Thompson, K. Giri, G. Kafatos, J. Walker y A. Bennett, «Testing the efficacy of homemade masks: would they protect in an influenza pandemic?», *Disaster Med. Public Health Prep.*, vol. 7, n.º 4, pp. 413-418, 2013, doi: 10.1017/dmp.2013.43.
- [20] D. K. Milton, M. P. Fabian, B. J. Cowling, M. L. Grantham y J. J. McDevitt, «Influenza virus aerosols in human exhaled breath: particle size, culturability, and effect of surgical masks», *PLoS Pathog.*, vol. 9, n.º 3, pp. 1-7, 2013, doi: 10.1371/journal.ppat.1003205.
- [21] A. K. Melikov, «Human body micro-environment: the benefits of controlling airflow interaction», *Build. Environ.*, vol. 91, pp. 70-77, 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.04.010.
- [22] W. G. Lindsley, J. D. Noti, F. M. Blachere, J. V. Szalajda y D. H. Beezhold, «Efficacy of face shields against cough aerosol droplets from a cough simulator», *J. Occup. Environ. Hyg.*, vol. 11, n.º 8, pp. 509-518, 2014, doi: 10.1080/15459624.2013.877591.
- [23] W. J. Kowalski, W. P. Bahnfleth y T. S. Whittam, «Filtration of airborne microorganisms: modeling and prediction», *ASHRAE Trans.*, vol. 105, n.º 2, pp. 4-17, 1999.
- [24] ANSI/ASHRAE, *ANSI/ASHRAE Standard 52.2-2017, method of testing general ventilation air-cleaning devices for removal efficiency by particle size*, 2017. https://www.ashrae.org/FileLibrary/TechnicalResources/COVID-19/52_2_2017_COVID-19_20200401.pdf.
- [25] B. Ainsworth *et al.*, *The compendium of physical activities tracking guide*. Healthy Lifestyles Research Center, College of Nursing & Health Innovation, Arizona State University, 2011. <https://sites.google.com/site/compendiumofphysicalactivities/>
- [26] B. Ainsworth *et al.*, «2011 compendium of physical activities: a second update of codes and MET values», *Med. Sci. Sports Exerc.*, vol. 43, n.º 8, pp. 1575-1581, 2011, doi: <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31821ece12>.

- [27] ASHRAE Board of Directors, *ASHRAE position document on indoor carbon dioxide*, 2022. https://www.ashrae.org/filelibrary/about/positiondocuments/pd_indoorcarbondioxide_2022.pdf.
- [28] Ministerio de la Presidencia del Gobierno de España, «Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios», BOE n.º 207, 2007, Madrid, Ministerio de la Presidencia del Gobierno de España, 2021, p. 97.
- [29] AENOR, UNE-EN 1822-1:2020. *Filtros absolutos (EPA, HEPA y ULPA). Parte 1: Clasificación, principios generales del ensayo y marcado*. Madrid, AENOR/Asociación Española de Normalización y Certificación, 2020.

Anexos

Tabla A1. Valores predictivos de E_p ($quanta^{-1}$), según actividad metabólica y de vocalización, para diversas enfermedades de transmisión aérea, para los percentiles 50º y 85º de emisión vírica [13, 14]

Patógeno	Actividad metabólica y de vocalización (percentiles 50º/85º)		
	Sedentaria, respiración oral	En pie, hablando	Actividad ligera, hablando alto
Adenovirus	0,780 / 7,511	4,446 / 42,810	66,300 / 638,394
Coxsackievirus	0,062 / 0,856	0,353 / 4,879	5,270 / 72,759
Gripe estacional	0,035 / 0,257	0,168 / 1,250	2,972 / 22,063
MERS-CoV	0,011 / 0,501	0,063 / 0,501	0,935 / 42,570
Rinovirus humano	0,209 / 1,514	0,995 / 7,211	17,908 / 129,805
Sarampión	3,0903 / 140,700	14,953 / 680,805	259,186 / 11800,827
SARS-CoV-1	0,008 / 0,187	0,048 / 1,065	0,714 / 15,888
SARS-CoV-2 (original)	3,336 / 18,600	19,018 / 106,020	283,596 / 1581,000
Tuberculosis (sin tratar)	0,617 / 13,720	3,083 / 68,601	0,0978 / 1172,864
Tuberculosis (en tratamiento)	3,083 / 0,564	52,709 / 2,762	1,696 / 47,910

Tabla A2. Valores predictivos de E_f (adimensional) para variantes del SARS-CoV-2 [15]

Variante	Original	Alfa	Beta	Gamma	Delta	Omicron BA.1	Omicron BA.2
E_f	1.0	1.5	1.2	1.5	2.0	2.5	3.3

Tabla A3. Valores para la tasa de deposición promedio en superficies de los bioaerosoles con carga vírica, λ_{dep} (h^{-1}), en función del diámetro medio del bioaerosol (μm) [16, 17]

Distribución interior del mobiliario / Diámetro aerosol	Tasa de deposición promedio en superficies de los bio-aerosoles, λ_{dep} (h^{-1})							
	Aire en reposo		Movimiento de aire muy leve		Movimiento de aire algo leve		Movimiento de aire leve	
	Poco amueblado	Muy amueblado	Poco amueblado	Muy amueblado	Poco amueblado	Muy amueblado	Poco amueblado	Muy amueblado
0.55 μm	0.10	0.20	0.10	0.23	0.09	0.23	0.14	0.27
0.65 μm	0.10	0.20	0.10	0.23	0.10	0.24	0.14	0.28
0.81 μm	0.10	0.19	0.10	0.24	0.11	0.27	0.15	0.30
1.00 μm	0.13	0.21	0.12	0.28	0.15	0.33	0.20	0.38
1.24 μm	0.20	0.29	0.18	0.38	0.25	0.47	0.33	0.53
1.54 μm	0.32	0.42	0.27	0.54	0.39	0.67	0.51	0.77
1.91 μm	0.49	0.61	0.42	0.75	0.61	0.93	0.80	1.11
2.37 μm	0.78	0.93	0.64	1.07	0.92	1.32	1.27	1.60
2.94 μm	1.24	1.30	0.92	1.46	1.45	1.93	2.12	2.89
3.65 μm	1.81	1.93	1.28	1.93	2.54	3.39	3.28	3.88
4.53 μm	2.83	2.64	1.95	2.95	3.79	4.71	4.55	5.46
5.62 μm	4.41	3.43	3.01	3.51	4.88	5.73	6.65	6.59

Ecuación A1 para λ_{dec} (h^{-1}) en función de la temperatura interior promedio del aire interior (\overline{Ta} , en $^{\circ}C$), la humedad relativa del aire interior (RH , en %) y el índice de exposición a luz ultravioleta proveniente del sol (UVB , de 0 a 10) [18]:

$$\lambda_{dep} = 7,56923 + 1,41126 \cdot \left(\frac{\overline{Ta} - 20,54}{10,66} \right) + 0,02176 \cdot \left(\frac{RH - 45,235}{28,665} \right) + 7,55272 \cdot \left(\frac{0,185 \cdot UVB - 50}{50} \right) + \left(\frac{\overline{Ta} - 20,54}{10,66} \right) \cdot \left(\left(\frac{0,185 \cdot UVB - 50}{50} \right) \cdot 1,39734 \right)$$

Ecuación A1

donde:

λ_{dec} es la tasa de decaimiento de la infectividad del virus en el aire (h^{-1}).

\overline{Ta} es la temperatura promedio del aire en el interior ($^{\circ}C$).

RH es la humedad relativa del aire en el interior (%).

UVB es el índice de exposición a luz ultravioleta proveniente del sol (de 0, interior sin exposición directa, a 10, luz directa en un mediodía despejado).

Tabla A4. Eficiencia en la reducción de la exhalación (m_{ex}) e inhalación vírica (m_{in}) de pantallas faciales, mascarillas y respiradores [19-22]

Eficiencia en la reducción vírica (%)	Pantalla facial (sin mascarilla)	Mascarilla quirúrgica		FFP2/KN95/N95 con válvula de exhalación		FFP2/KN95/N95 sin válvula de exhalación	
		Sin ajustar	Ajustada	Sin ajustar	Ajustada	Sin ajustar	Ajustada
Exhalación (m_{ex})	23	32,5	65	45	90	0	0
Inhalación (m_{in})	23	25	50	45	90	45	90

Tabla A5. Valores de eficiencia de filtrado de filtros eficaces (M-F/MERV) y filtros de alta eficiencia (HEPA) [23, 24, 28, 29]

Tipo de filtro	ASHRAE 52.2	RITE / EN 1822	Eficiencia de filtrado (1,0-3,0 μ m)
<i>MERV</i>	MERV 08	G4	20
	MERV 09	M5	35
	MERV 10	M5	50
	MERV 11	M6	65
	MERV 12	M6	80
	MERV 13	F7	85
	MERV 14	F8	90
	MERV 15	F8	90
	MERV 16	F9	95
<i>HEPA</i>	MERV 19	H13	100
	MERV 20	H14	100

Ecuación A2 para λ_{cle} (h^{-1}) proveniente de equipos de limpieza del aire mediante filtrado, en función de la eficiencia del filtro (f_{fil} en %, obtenido de la tabla A5) y el caudal de aire proporcionado por el equipo (Q_{cle} en m^3/h) [18]:

$$\lambda_{cle} = \frac{V}{Q_{cle} \cdot \frac{f_{fil}}{100}}$$

Ecuación A2

donde:

λ_{cle} es la tasa de retirada de *quanta* por acción de dispositivos de limpieza de aire (h^{-1}).

V es el volumen del recinto donde se produce el evento (m^3).

Q_{cle} es el caudal de aire proporcionado por el equipo de limpieza de aire (m^3/h).

f_{fil} es la eficiencia de retirada de partículas de 1 a 3 μ m del filtro (%).

Tabla A6. Valores de inhalación recomendados para exposición a corto plazo, según actividad metabólica (hombres y mujeres combinados), en m³/min, equivalente a B [11]

Edad (años)	Inhalación según actividad metabólica (m ³ /min)				
	Dormido	Sedentario	Intensidad ligera	Intensidad moderada	Intensidad alta
0 a <1	0.0030	0.0031	0.0076	0.0140	0.0260
1 a <2	0.0045	0.0047	0.0120	0.0210	0.0380
2 a <3	0.0046	0.0048	0.0120	0.0210	0.0390
3 a <6	0.0043	0.0045	0.0110	0.0210	0.0370
6 a <11	0.0045	0.0048	0.0110	0.0220	0.0420
11 a <16	0.0050	0.0054	0.0130	0.0250	0.0490
16 a <21	0.0049	0.0053	0.0120	0.0260	0.0500
21 a <31	0.0043	0.0042	0.0120	0.0260	0.0490
31 a <41	0.0046	0.0043	0.0120	0.0270	0.0520
41 a <51	0.0050	0.0048	0.0130	0.0280	0.0530
51 a <61	0.0052	0.0050	0.0120	0.0290	0.0530
61 a <71	0.0052	0.0049	0.0120	0.0260	0.0470
71 a <81	0.0053	0.0050	0.0120	0.0250	0.0470
≥81	0.0052	0.0049	0.0120	0.0250	0.0480

Tabla A7. Tasa de exhalación de CO₂ (l/s) para hombres [12]

Edad	Nivel de actividad física (met)						
	1.0 met	1.2 met	1.4 met	1.6 met	2.0 met	3.0 met	4.0 met
< 1 año	0.0009 l/s	0.0011 l/s	0.0013 l/s	0.0014 l/s	0.0018 l/s	0.0027 l/s	0.0036 l/s
1 a 3 años	0.0015 l/s	0.0018 l/s	0.0021 l/s	0.0024 l/s	0.0030 l/s	0.0044 l/s	0.0059 l/s
3 a 6 años	0.0019 l/s	0.0023 l/s	0.0026 l/s	0.0030 l/s	0.0038 l/s	0.0057 l/s	0.0075 l/s
6 a 11 años	0.0025 l/s	0.0030 l/s	0.0035 l/s	0.0040 l/s	0.0050 l/s	0.0075 l/s	0.0099 l/s
11 a 16 años	0.0034 l/s	0.0041 l/s	0.0048 l/s	0.0054 l/s	0.0068 l/s	0.0102 l/s	0.0136 l/s
16 a 21 años	0.0038 l/s	0.0045 l/s	0.0053 l/s	0.0060 l/s	0.0075 l/s	0.0113 l/s	0.0150 l/s
21 a 30 años	0.0040 l/s	0.0048 l/s	0.0056 l/s	0.0064 l/s	0.0080 l/s	0.0120 l/s	0.0160 l/s
31 a 40 años	0.0038 l/s	0.0045 l/s	0.0053 l/s	0.0061 l/s	0.0076 l/s	0.0114 l/s	0.0151 l/s
41 a 50 años	0.0039 l/s	0.0046 l/s	0.0054 l/s	0.0062 l/s	0.0077 l/s	0.0116 l/s	0.0155 l/s
51 a 60 años	0.0038 l/s	0.0046 l/s	0.0054 l/s	0.0062 l/s	0.0077 l/s	0.0115 l/s	0.0154 l/s

61 a 70 años	0.0033 l/s	0.0040 l/s	0.0046 l/s	0.0053 l/s	0.0066 l/s	0.0099 l/s	0.0132 l/s
70 a 80 años	0.0032 l/s	0.0038 l/s	0.0044 l/s	0.0051 l/s	0.0064 l/s	0.0095 l/s	0.0127 l/s
> 80 años	0.0030 l/s	0.0036 l/s	0.0042 l/s	0.0048 l/s	0.0060 l/s	0.0090 l/s	0.0120 l/s

Tabla A8. Tasa de exhalación de CO₂ (l/s) para mujeres [12]

Edad	Nivel de actividad física (met)						
	1.0 met	1.2 met	1.4 met	1.6 met	2.0 met	3.0 met	4.0 met
< 1 año	0.0008 l/s	0.0010 l/s	0.0012 l/s	0.0014 l/s	0.0017 l/s	0.0025 l/s	0.0034 l/s
1 a 3 años	0.0014 l/s	0.0017 l/s	0.0020 l/s	0.0022 l/s	0.0028 l/s	0.0042 l/s	0.0056 l/s
3 a 6 años	0.0014 l/s	0.0017 l/s	0.0020 l/s	0.0022 l/s	0.0028 l/s	0.0042 l/s	0.0056 l/s
6 a 11 años	0.0017 l/s	0.0021 l/s	0.0024 l/s	0.0028 l/s	0.0035 l/s	0.0052 l/s	0.0069 l/s
11 a 16 años	0.0023 l/s	0.0027 l/s	0.0032 l/s	0.0037 l/s	0.0046 l/s	0.0069 l/s	0.0092 l/s
16 a 21 años	0.0029 l/s	0.0035 l/s	0.0041 l/s	0.0047 l/s	0.0058 l/s	0.0087 l/s	0.0117 l/s
21 a 30 años	0.0030 l/s	0.0036 l/s	0.0041 l/s	0.0047 l/s	0.0059 l/s	0.0089 l/s	0.0118 l/s
31 a 40 años	0.0031 l/s	0.0038 l/s	0.0044 l/s	0.0050 l/s	0.0063 l/s	0.0094 l/s	0.0126 l/s
41 a 50 años	0.0029 l/s	0.0035 l/s	0.0041 l/s	0.0047 l/s	0.0059 l/s	0.0088 l/s	0.0118 l/s
51 a 60 años	0.0030 l/s	0.0036 l/s	0.0042 l/s	0.0048 l/s	0.0060 l/s	0.0089 l/s	0.0119 l/s
61 a 70 años	0.0030 l/s	0.0036 l/s	0.0042 l/s	0.0048 l/s	0.0060 l/s	0.0090 l/s	0.0119 l/s
70 a 80 años	0.0027 l/s	0.0033 l/s	0.0038 l/s	0.0044 l/s	0.0055 l/s	0.0082 l/s	0.0110 l/s
> 80 años	0.0026 l/s	0.0032 l/s	0.0037 l/s	0.0042 l/s	0.0053 l/s	0.0079 l/s	0.0105 l/s
< 1 año	0.0025 l/s	0.0030 l/s	0.0035 l/s	0.0040 l/s	0.0050 l/s	0.0075 l/s	0.0100 l/s

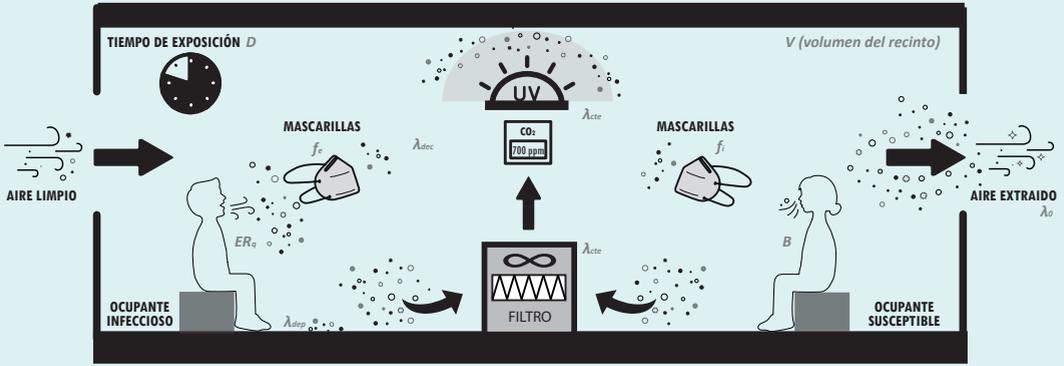
Tabla A9. Correspondencia entre actividad física y nivel de actividad física (en met) [25, 26]

Nivel de actividad física (met)	Actividad física
0,95	Durmiendo
1,00	Tumbado en silencio
1,30	Sentado en silencio, leyendo/estudiando/escribiendo
1,30	En pie, sin desplazarse, en silencio
1,50	Sentado, espectador de espectáculos deportivos
1,50	Sentado, tareas de oficina (esfuerzo ligero)
1,80	En pie, hablando, con esfuerzo ligero
2,00 a 2,50	Caminar, terreno llano y firme, a menos de 2 km/h (lento)

2,30	Trabajo de vigilancia (actividad ligera)
2,50	Limpieza (general, esfuerzo ligero)
2,80	Calistenia (esfuerzo ligero)
3,00	En pie, tareas ligeras (empleado de tienda, archivo)
3,00	Pilates
3,30	Cocina (esfuerzo moderado)
3,50 a 4,30	Caminar, terreno llano y firme, a 5 km/h
3,80	Calistenia (esfuerzo moderado)
4,50	Limpieza (general, esfuerzo moderado)
5,00	Aerobic, bajo impacto
7,80	Baile (general)
8,00	Calistenia (esfuerzo elevado)

CAPÍTULO 2

MÉTODO DE WELLS-RILEY



PARÁMETROS A VALORAR



Enfermedad y variante.



Dimensiones del recinto.



Condiciones ambientales.



Reducción de la infectividad vírica.



Retirada de aerosoles del aire (filtrado).



Ocupantes presentes.



Ocupantes infecciosos.



Inmunidad adquirida.



Actividad realizada.



Actividad de vocalización.



Duración del evento.



Caudal de ventilación.



Uso de mascarillas.

LA ACTIVIDAD DE VOCALIZACIÓN



SENTADO EN SILENCIO
x 1,0



SENTADO HABLANDO FUERTE
x 4,7



SENTADO HABLANDO FUERTE
x 30,3

¿QUÉ HACER?



1. VENTILACIÓN CRUZADA, DISTRIBUIDA, CONTINUA.
2. USO DE MASCARILLA AJUSTADA.
3. FILTRADO HEPA.
4. MEDICIÓN/MONITORIZACIÓN DE CO₂.

CONSIDERACIONES DEL MODELO

LA ATMÓSFERA INTERIOR SE ASUME COMO HOMOGÉNEA.



EXCLUYE TRANSMISIÓN POR FÓMITES.



NO CONSIDERA LA TRANSMISIÓN A CORTA DISTANCIA.



CO₂ y transmisión aérea de enfermedades

MIGUEL ÁNGEL CAMPANO
 SAMUEL DOMÍNGUEZ-AMARILLO
 IGNACIO ACOSTA
 Escuela Técnica Superior de Arquitectura,
 Universidad de Sevilla (US), Sevilla, España.

JOSÉ LUIS JIMÉNEZ
 Dept. of Chemistry and CIRES, University of Colorado, Boulder, Colorado, United States.

Lista de acrónimos

- AR tasa de ataque (acrónimo del inglés *attack rate*).
- COVID-19 acrónimo de enfermedad por coronavirus (del inglés *CO*rona*V*irus *D*isea-*s*e-2019).
- CO₂ dióxido de carbono.
- EPI equipo de protección individual.
- FFP2 mascarilla filtrante (EPI) de tipo 2 (acrónimo del inglés *filtering face pieces*).
- HEPA filtros de partículas de alta eficiencia (de sus siglas en inglés *high efficiency particulate air*).
- H indicador del aumento del riesgo relativo de contagio global de enfermedades de transmisión aérea en un evento dado.
- H_r indicador del aumento del riesgo relativo individual de contagio global de enfermedades de transmisión aérea en un evento dado.
- MERV valor mínimo de eficiencia de filtrado de un filtro (acrónimo del inglés *minimum efficiency reporting values*).
- RFA fracción de aire previamente respirado (acrónimo del inglés *rebreathed fraction of air*).
- RITE Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios.
- RH humedad relativa del aire (acrónimo del inglés *relative humidity*).
- SARS-CoV-2 síndrome respiratorio agudo severo (acrónimo del inglés *severe acute respiratory syndrome coronavirus 2*).
- UV ultravioleta.
- VMC ventilación mecánica controlada.
- $\Delta[\text{CO}_2]$ exceso de CO₂ en un espacio interior respecto del valor exterior.

3.1. Introducción

En el capítulo anterior [1] se explicaron los fundamentos básicos que rigen la adaptación del método de Wells-Riley [2, 3], con la que se puede determinar probabilísticamente cuál es el riesgo relativo de infección de enfermedades mediante aerosoles de media y larga distancia en un evento dado. Así, con este método es posible evaluar el impacto que tienen las diferentes medidas de mitigación en el riesgo relativo de contraer la enfermedad.

Entre estas medidas de mitigación, destaca la ventilación, dado que es una de las principales acciones disponibles para limitar el riesgo de brotes epidémicos mediante aerosoles, al permitir renovar el aire de los espacios interiores mediante dilución y desplazamiento del aire viciado.

Para evaluar la eficiencia de dicha ventilación, se puede recurrir a la monitorización del nivel diferencial de dióxido de carbono (CO_2) existente entre el espacio interior y el exterior (denominado «exceso de CO_2 », $\Delta[\text{CO}_2]$), en ausencia de otras fuentes significativas de emisión de CO_2 [4]. Con este indicador, cuya medición es sencilla, fiable y de coste asumible, es posible evaluar indirectamente el riesgo de infección de enfermedades por aerosoles (media y larga distancia) en espacios interiores, utilizando por tanto dicho exceso de CO_2 como *proxy* [2].

3.2. Aplicación al SARS-CoV-2: COVID Risk^{airborne}

La transferencia del conocimiento científico a la sociedad es una necesidad de primera magnitud, como se ha visto en repetidas ocasiones a lo largo de la emergencia sanitaria, en la que se ha recibido multitud de mensajes contradictorios. En el caso de la pandemia por SARS-CoV-2, el ciudadano ha de tener información precisa y sencilla para poder conocer y gestionar el riesgo de transmisión de enfermedades aéreas al que se expone (empoderamiento del usuario).

Asimismo, los gestores de edificios, los diseñadores y los legisladores requieren herramientas que les permitan analizar diversos escenarios operativos para la toma de decisiones y la implementación de estrategias de mejora contra la transmisión aérea de enfermedades. Además, estas herramientas pueden llegar a suministrar datos dinámicos a las lógicas de control de los sistemas de ventilación/climatización.

Por todo esto, en 2021, un equipo de investigadores del grupo TEP130 de la Universidad de Sevilla, junto con las plataformas Aireamos [5] y VentilANDO [6], así como con el profesor José Luis Jiménez de la Universidad de Colorado Boulder (EEUU), desarrolló una herramienta en línea para la estimación del riesgo de transmisión aérea del SARS-CoV-2 [7].

Su objetivo era dotar, tanto a la ciudadanía como a los técnicos, gestores y legisladores, de una herramienta de estimación del riesgo de infección de COVID-19 en espacios interiores según el exceso de CO₂ existente en dicho recinto, así como de sus condiciones dimensionales, ambientales y de uso.

La herramienta dispone de una versión *online*, COVID Risk^{airborne} (www.covidairbornerisk.com), accesible a todo el público, de uso gratuito y en constante actualización, tanto a las nuevas variantes del SARS-CoV-2, como de otras enfermedades de transmisión aérea (figura 3.1).

Su elaboración se basa en el modelo de propagación de enfermedades de transmisión aérea de Wells-Riley anteriormente descrito, habiendo sido adaptado al SARS-CoV-2 por Z. Peng y J. L. Jiménez a partir de los eventos de superpropagación documentados durante la crisis sanitaria COVID-19 [2, 3, 8]. Con esta herramienta, es posible estimar el nivel de riesgo esperado que puede producirse en una situación determinada (aulas, oficinas, restaurantes, reuniones familiares o transporte público) a través de la medición del nivel de CO₂ promedio en dicho espacio [9, 10].

Mediante el uso de esta aplicación es posible evaluar, para un espacio interior dado, el impacto de:

- El tiempo de duración (exhalación de viriones) y de permanencia (exposición) en el evento.
- El aforo (ocupación), la actividad metabólica y respiratoria, así como su modificación dinámica a lo largo del tiempo.
- Tasa de renovación de aire aconsejada (ventilación).
- Los tipos de mascarillas usadas, incluyendo el nivel de ajuste.



Figura 3.1. Pantalla de inicio de la herramienta *online* COVID Risk^{airborne} [7].

- El impacto de la purificación de aire ya sea mediante filtrado de alta eficiencia (MERV13/F7 o superior) o de muy alta eficiencia (filtros HEPA), o a través del empleo de sistemas de luz ultravioleta (UV).
- La acción de captura de las superficies interiores del espacio.

Para conocer dichos datos es necesario definir una serie de parámetros o variantes en la herramienta. Con el fin de que la aplicación sea accesible a toda la población, se han desarrollado dos versiones. Una versión más detallada («cálculo detallado»), enfocada al uso de profesionales e investigadores con capacidad de ser más precisa y con un mayor número de parámetros a definir, y una versión más simplificada («cálculo simplificado»), más sencilla e intuitiva en la que existe una disminución de los parámetros a introducir (figura 3.2), tomando la herramienta una serie de valores predeterminados característicos.

Además, con esta herramienta es posible evaluar parámetros como:

- Caudal de ventilación por ocupante.
- Tasa de pérdida de primer orden (velocidad en la que se reduce la carga vírica infectiva del aire, combinando ventilación, paso del tiempo, deposición en superficies y otras medidas de control).
- Probabilidad de infección por individuo o tasa de ataque (AR).
- Número de personas susceptibles de enfermar (incluyendo el efecto de las vacunas tras descontar el número de ocupantes infectivos).
- Casos de COVID-19 resultantes.
- Riesgo de infección (H).
- Riesgo de infección relativo (H_r).



Figura 3.2. Selección de modalidad de cálculo en herramienta *online* COVID Risk^{airborne} [7].

- Valor promedio de CO₂ en el recinto.
- Valor promedio de CO₂ a inhalar en 1 hora para alcanzar una probabilidad del 1 % de infección.
- Fracción de aire reinhalado (*RFA*).
- Evolución gráfica del valor medio de CO₂ en el interior del recinto.

El proceso de introducción de datos se realiza según se indica en la figura 3.3.

3.3. Ejemplo de estimación del riesgo de infección: aula de educación infantil

Como ejemplo de la aplicación de esta herramienta, se ha tomado un aula de educación infantil en Andalucía, a fin de estimar el riesgo de transmisión aérea del SARS-CoV-2 frente a diferentes niveles de exceso de CO₂ interior. La elección responde a la especial vulnerabilidad de los niños de dicha edad, sumado a la pobre tasa de ventilación que suelen tener estos recintos en el ámbito de estudio. Con los resultados de este breve estudio teórico, es posible optimizar las estrategias de ventilación y autoprotección de los ocupantes.

3.3.1. Muestra de estudio

La forma y dimensiones del aula, así como su sistema de calefacción, el mobiliario y la ocupación teórica responden a los estándares de diseño establecidos para edificios de uso docente no universitario [11], aunque son altamente representativas de las aulas de este tipo en gran parte del país. El recinto tiene 50 m² y 3 m de altura, estando diseñado para una capacidad máxima de 24 niños [12]. Dispone de baño propio, con entrada directa desde el interior del aula, así como de un patio escolar asociado, accesible desde una puerta en la fachada del espacio (figura 3.4).

El aula no tiene falso techo ni perforaciones en los tabiques interiores con el aula contigua ni con el pasillo; por tanto, presenta una elevada estanqueidad al paso del aire de la envolvente. El cerramiento vertical exterior está compuesto por una fábrica cerámica con cámara y aislante, con ventanas y puertas exteriores de doble vidrio con cámara de aire y carpintería metálica sin rotura de puente térmico, con estanqueidad al aire según UNE-EN 12207 [13]. Los tabiques interiores están compuestos por una doble placa de cartón yeso con lana mineral entre ambas.

La calefacción se solventa mediante una instalación de radiadores de agua caliente, sin existir previsión de sistemas de refrigeración por aire [14, 15] ni, inicialmente, sistema de ventilación controlada.

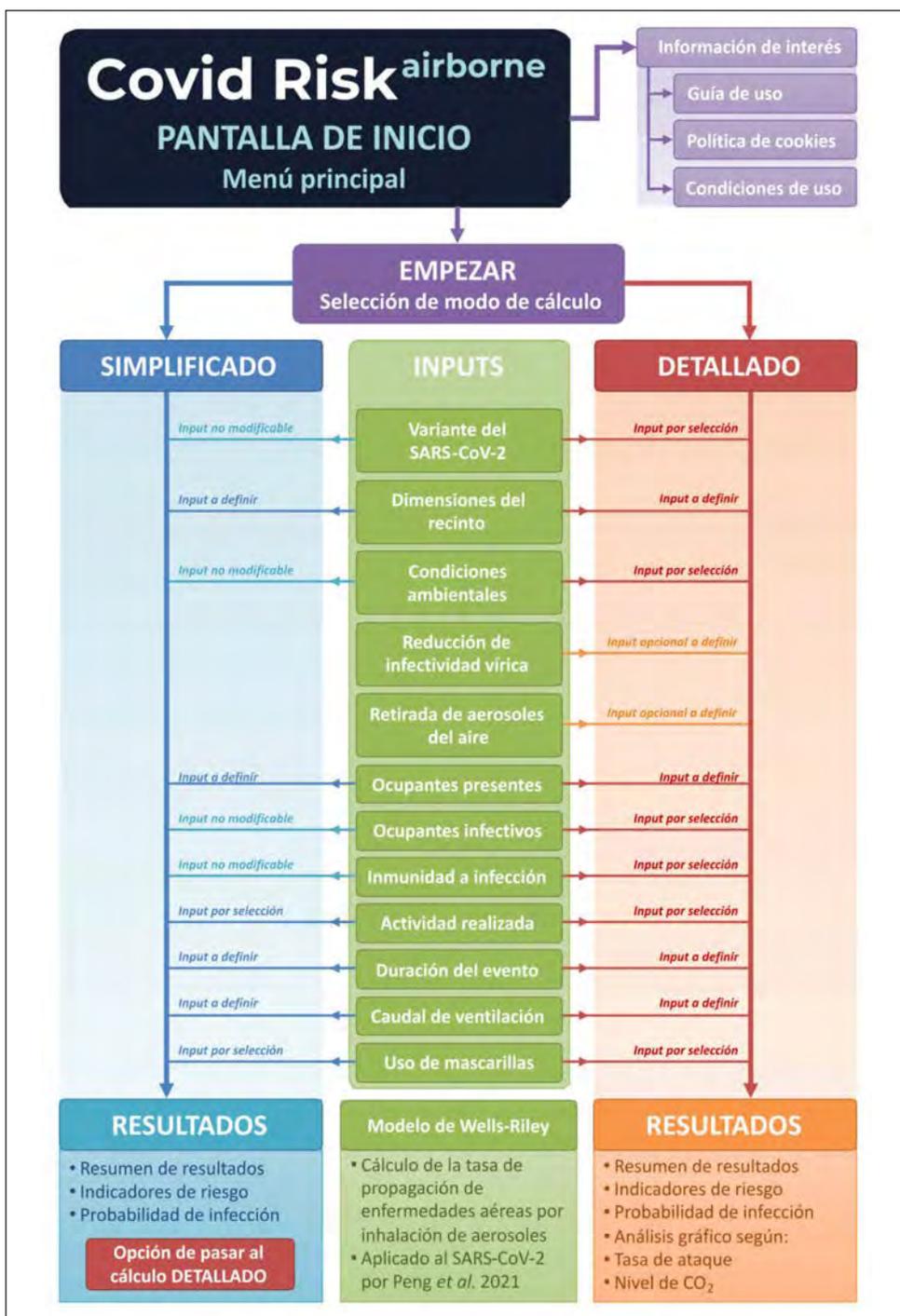


Figura 3.3. Proceso de introducción de datos en la herramienta *online* COVID Risk^{airborne}.

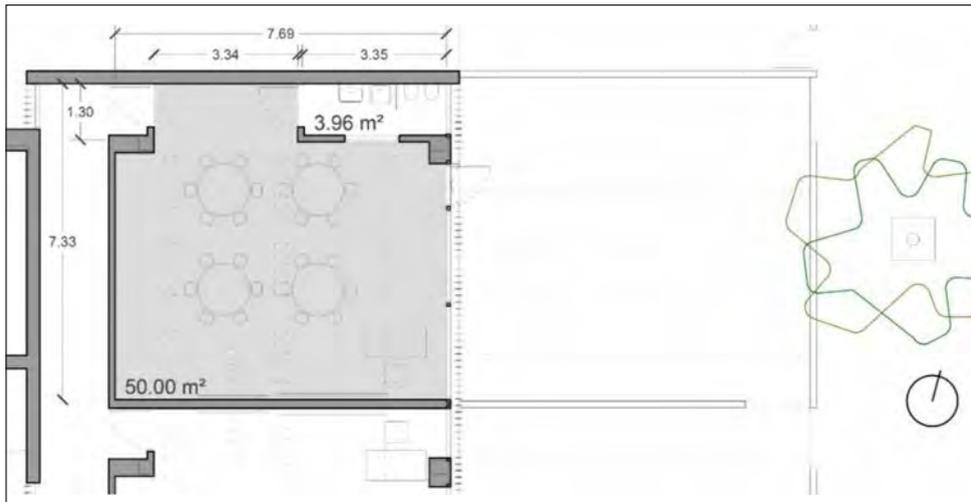


Figura 3.4. Planta del aula de educación infantil en estudio, según estándares de diseño establecidos para edificios de uso docente no universitario [11].

Habitualmente, la ventilación se confía a la apertura de puertas y ventanas, así como a las infiltraciones no controladas, a pesar de que el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) [16] establece que la ventilación mecánica controlada (VMC) es la única opción viable para los edificios no residenciales. En condiciones invernales, el límite inferior de temperatura operativa fijado por el RITE es de 21 °C.

La jornada escolar en los colegios públicos de Educación Infantil y Primaria de Andalucía es de 5 horas, normalmente de 9:00 a 14:00 horas, con media hora de descanso entre ellas. Cada centro puede establecer el punto de inicio de dicho descanso, aunque suele ser en la franja intermedia de la jornada (de 11:15 a 11:45).

3.3.2. Condiciones de contorno

Las condiciones de cálculo requeridas para estimar el riesgo de infección existente por aerosoles de media y larga distancia en el aula de educación infantil estudiada se muestran en la tabla 3.1 [17].

El tiempo de exposición (duración del evento) se ha establecido, para este caso, en 135 minutos, dado que es el tiempo medio entre la hora del almuerzo y el inicio/final de la jornada escolar –aunque en otros entornos escolares podría variar–. También se considera que el aula de Infantil analizada se encuentra en condiciones ambientales típicas del periodo invernal, estando activo el sistema de calefacción por radiadores existente para lograr el

cumplimiento de las condiciones higrotérmicas fijadas por el RITE (temperatura operativa de 21 °C y $RH \geq 40\%$).

Tabla 3.1. Condiciones ambientales y operacionales consideradas para el análisis

Dimensiones			
Área (m ²)	50,0	Altura (m)	3,0
Condiciones ambientales interiores (invierno)			
Temperatura operativa (°C)	21,0	Humedad relativa del aire (RH, %)	40
Presión atmosférica (atm)	1,0	Atmósfera interior	Aire en calma ($v < 0.25$ m/s), ambiente mezclado
Variante de SARS-CoV-2			
Variante de SARS-CoV-2	Ómicron BA.2	Percentil de tasa de exhalación viral (%)	85
Parámetros de ocupación y tipo de actividad			
N.º ocupantes infecciosos	1	N.º ocupantes presentes	25
Edad media (años)	5	Duración del evento (minutos)	135
Actividad de los niños	Sentados – Respiración oral	Actividad del docente	En pie – hablando

Para realizar el estudio, se ha considerado que en el aula hay un ocupante infectado con carga viral alta (percentil 85 % de tasa de exhalación viral), como hipótesis conservadora para las simulaciones de riesgo de transmisión aérea.

3.3.3. Hipótesis estudiadas

Se han considerado cuatro escenarios para este estudio en función del ocupante con infección activa y las condiciones de actividad.

Las hipótesis se agrupan en dos categorías, según el ocupante que se infectó inicialmente (niño o docente).

- Caso 1: un niño infectado por SARS-CoV-2 (sentado, respiración oral), nadie con mascarilla en el aula.
- Caso 2a: docente infectado (de pie, hablando), nadie con mascarilla en el aula.
- Caso 2b: docente infectado (de pie, hablando) con mascarilla quirúrgica (no ajustada) y resto de ocupantes (niños) sin mascarilla.

- Caso 2c: docente infectado (de pie, hablando) con mascarilla FFP2 bien ajustada y el resto de los ocupantes (niños) sin mascarilla.

Para calcular el número de *quanta* que pudo inhalar estadísticamente cada ocupante se ha utilizado el valor promedio en el ambiente interior del incremento de concentración de CO₂ exhalado respecto del exterior, $\Delta[CO_2]$. Este parámetro se analiza a lo largo de los citados 135 minutos de una jornada escolar normal (periodo de exposición) como indicador.

Los cálculos para la estimación del riesgo definidos anteriormente se han realizado considerando incrementos de 100 ppm en el valor promedio de $\Delta[CO_2]$, con un rango de exceso de 100 a 1.600 ppm, rango que se ha considerado adecuado para este tipo de espacios en estudios previos [18]. Con ello, se obtuvieron un total de 68 combinaciones de análisis, agrupadas en los citados cuatro escenarios.

Este procedimiento también permite considerar diferentes umbrales recomendados, como se recoge en la tabla 3.2:

Tabla 3.2. Umbrales de CO₂ recomendados según estándares normativos y guías de aplicación

Valor recomendado	Aplicación
1000 ppm. (aprox.)	El RD 486/1997 [19] establece un caudal mínimo de ventilación en espacios laborales de 30 m ³ /h por ocupante, que puede asemejarse a un valor de 1.000 ppm absolutos.
Δ 500 ppm.	El RITE fija un valor límite de $\Delta[CO_2]$ para aulas (calidad del aire interior de IDA 2) de 500 ppm, en caso de usar el método de medición directa [16].
Δ 300 ppm.	Las recomendaciones desarrolladas para las escuelas durante la emergencia del COVID-19 establecen un umbral de CO ₂ de 300 ppm por encima del nivel exterior [20, 21]. Este límite de $\Delta[CO_2]$ está próximo al que establece el RITE para IDA 1 (350 ppm), aplicable a espacios con ocupantes sensibles (hospitales, guarderías y residencias de mayores).
Δ 150 ppm.	La recomendación aplicable a espacios educativos, tanto para aulas con ocupantes vulnerables o sin mascarilla, como para pasillos (espacios «aliviadero»), que establece un umbral de $\Delta[CO_2]$ de 150 ppm [21].

3.3.4. Resultados

La figura 3.5 muestra la evolución gráfica de H_r con respecto a AR. Y la evolución gráfica de $\Delta[CO_2]$ respecto de AR se puede ver en la figura 3.6.

Como puede verse tanto en la figura 3.5 como en la figura 3.6, el riesgo relativo de infección (H_r) de casi todas las hipótesis estudiadas de niveles de CO₂ para las cuatro hipótesis es alto. Es importante resaltar que, para este conjunto de condiciones, no se han encontrado situaciones de bajo riesgo. Bajo estas circunstancias, se pueden establecer dos categorías de AR:

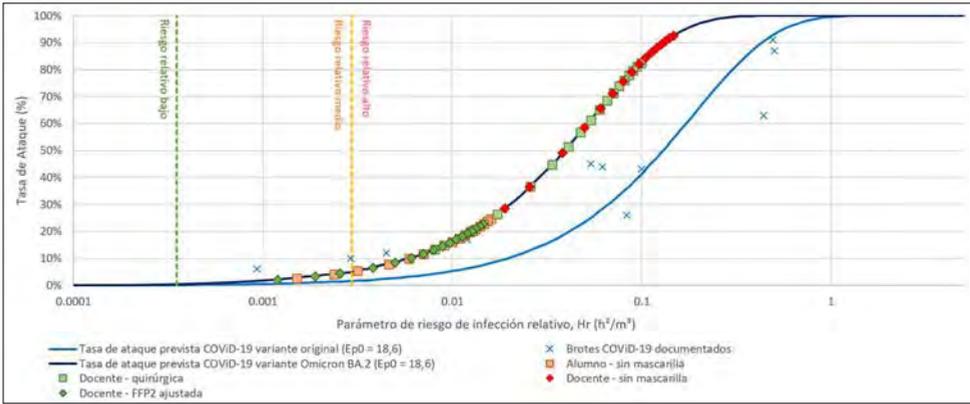


Figura 3.5. Análisis gráfico de AR respecto de H_r para las 68 hipótesis del aula de educación infantil. Tiempo de exposición de 135 minutos.

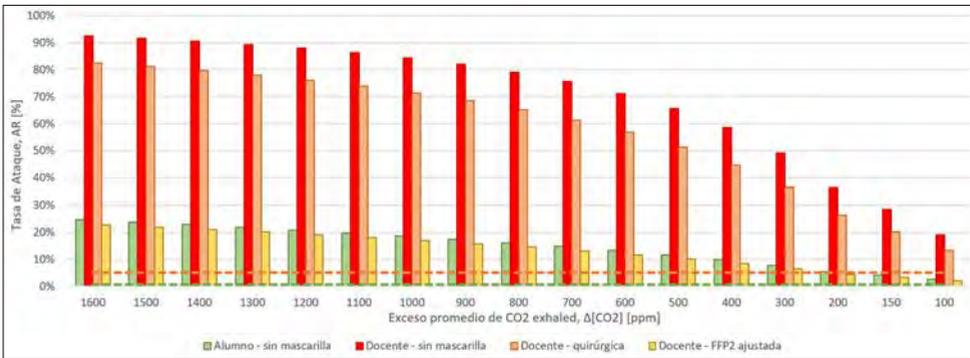


Figura 3.6. Análisis gráfico de AR respecto de $\Delta[CO_2]$ para las 68 hipótesis del aula de educación infantil. Tiempo de exposición de 135 minutos.

- Riesgo alto (AR 5-25 %): se produce cuando el sujeto infeccioso es un niño, o cuando es el docente y este esté usando una mascarilla FFP2 bien ajustada.
- Riesgo muy alto (AR >25%): se da cuando el sujeto infeccioso es el docente, ya sea cuando no lleva mascarilla o cuando usa una mascarilla quirúrgica (no ajustada).

Al observar la relación entre AR y el nivel de $\Delta[CO_2]$, aquellas combinaciones estudiadas que tienen valores de AR por debajo del 5% (umbral de alto riesgo de brotes) se producen cuando:

- Uno de los niños es el sujeto infeccioso –que está sentado, en relativo silencio y respira oralmente–, que presenta la atmósfera interior un incre-

mento de la concentración de CO₂ bajo ($\Delta[CO_2] \leq 150$ ppm) respecto al aire exterior.

- El docente es el sujeto infeccioso –que está de pie y hablando, siendo el único que lleva una mascarilla FFP2 bien ajustada– y existe un incremento de CO₂ interior bajo ($\Delta[CO_2] \leq 200$ ppm).

Este valor de $\Delta[CO_2]$ de 150 ppm concuerda con las recomendaciones desarrolladas por Aireamos para espacios interiores con ocupantes vulnerables o sin mascarillas.

Como se puede apreciar, el valor de AR se presenta más elevado cuando el sujeto infeccioso es el profesor. Esto se debe a que el docente exhala una mayor cantidad de bioaerosoles potencialmente infectivos, tanto por su mayor actividad de vocalización como por su mayor tasa metabólica –debido a la actividad y a su edad y peso–. De esta forma, cuando el profesor es el principal ocupante infectado y no lleva una mascarilla FFP2 bien ajustada, solo se puede obtener un AR inferior al 20% cuando $\Delta[CO_2]$ es menor a 100 ppm, lo cual es altamente improbable en espacios mal ventilados.

Finalmente, al analizar la posibilidad de que el centro cuente con un sistema de ventilación mecánica controlada (VMC) según establece el RITE (asociado a un umbral de $\Delta[CO_2]$ de 500 ppm), se puede derivar de la evaluación del AR que:

- Si el sujeto infeccioso es uno de los niños o el docente (cuando este usa una mascarilla FFP2 bien ajustada): AR de 10-11%, lo que duplica el umbral admisible.
- El docente es el sujeto infeccioso, que o bien no lleva mascarilla, o bien lleva mascarilla quirúrgica sin ajustar: AR superior a 50-65%, lo que supone 10-12 veces el umbral admisible.

Los resultados para este caso indican que, para tener condiciones aceptables de riesgo de transmisión de enfermedades por vía aérea –debidas al SARS-CoV-2 (con un ocupante infectado)– en aulas de educación infantil, es necesario mantener condiciones de ventilación suficientes para alcanzar al menos un nivel promedio de exceso de CO₂ exhalado ($\Delta[CO_2]$) en el entorno de 150 ppm.

Para poder garantizar una adecuada ventilación en estas condiciones, es necesario que estos espacios cumplan con la normativa vigente (RITE [16] y RD 486/1997 [19]) y estén dotados de un sistema de ventilación mecánica controlada (VMC), en este caso, gestionado mediante control de la concentración de CO₂ en el aire interior.

Asimismo, sería altamente recomendable que los docentes, que desarrollan su actividad de pie y hablando, usen mascarillas FFP2 bien ajustadas

durante situaciones de emergencia debido al alto riesgo de transmisión de enfermedades por vía aérea. Según los cálculos realizados, el riesgo de contagio es mucho mayor (5-6 veces mayor) cuando el sujeto infeccioso es el profesor y no lleva mascarilla ni es quirúrgica.

3.3.5. Conclusiones

El empleo de este tipo de herramientas de estimación del riesgo permite disponer de la capacidad de analizar situaciones diferentes y dinámicas, introduciendo en la evaluación el factor temporal, tanto para conocer la evolución de la presencia de aerosoles infecciosos como para conocer la exposición de los usuarios en el interior de los locales. En concreto aporta capacidades para:

- Analizar escenarios operativos para la toma de decisiones y la implementación de estrategias de mejora.
- Suministrar umbrales a las lógicas de control de los sistemas de ventilación/climatización.
- Informar a los usuarios y gestores de estos espacios del riesgo esperado, concienciándoles y permitiéndoles tomar decisiones individuales (empoderamiento del usuario). Esto es especialmente deseable en entornos educativos, con ocupantes especialmente sensibles (niños). De esta forma, se implica también en la didáctica a docentes y progenitores.
- Diseñar los tiempos máximos recomendables para el desarrollo de actividades.

Respecto al caso de estudio, el análisis pone de manifiesto la dificultad de mantener atmósferas de bajo riesgo en entornos de alta densidad de ocupación, en especial cuando el periodo de desarrollo de la actividad es significativo.

Las altas tasas de ventilación necesarias para mantener el riesgo en niveles bajos obliga al concurso de sistemas mecánicos controlados (VMC), con objeto de asegurar una dilución de los posibles aerosoles infectivos. Igualmente, en muchas de las ocasiones, se hace necesario el complemento de medidas complementarias como el uso de mascarillas, en especial para el caso de los profesores.

Referencias

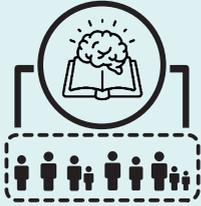
- [1] M. Á. Campano-Laborda, J.-L. Jiménez, J. Fernández-Agüera y P. Bustamante, «Estimación del riesgo relativo de transmisión de enfermedades aéreas

- mediante el modelo de Wells-Riley», en J. Fernández-Agüera, M. Á. Campano y J. J. Sendra (eds.), *Calidad del aire interior en los edificios para el bienestar: estrategias de aplicación práctica*. Barcelona, Octaedro, 2023, p. 178.
- [2] Z. Peng and J. L. Jiménez, «Exhaled CO₂ as a COVID-19 infection risk proxy for different indoor environments and activities», *Environ. Sci. Technol. Lett.*, vol. 8, n.º 5, pp. 392-397, 2021, doi: 10.1021/acs.estlett.1c00183.
 - [3] Z. Peng *et al.*, «Practical indicators for risk of airborne transmission in shared indoor environments and their application to COVID-19 outbreaks», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 56, n.º 2, pp. 1125-1137, 2022, doi: 10.1021/acs.est.1c06531.
 - [4] ASHRAE Board of Directors, *ASHRAE position document on indoor carbon dioxide*, 2022. https://www.ashrae.org/filelibrary/about/positiondocuments/pd_indoorcarbondioxide_2022.pdf
 - [5] Aireamos, *Aireamos 2021*, 2022. <https://www.aireamos.org/>
 - [6] VentilANDo, *VentilANDo 2021*, 2022. <http://www.ventilando.org/>
 - [7] M. Á. Campano-Laborda, S. Domínguez-Amarillo, I. Acosta García, J. J. Fernández-Agüera, P. Bustamante Rojas, J. J. Sendra Salas, J. L. Jiménez Palacios, J. D. Velarde Rodríguez, I. Acosta García, P. Bustamante Rojas, J. J. Sendra Salas, J. L. Jiménez Palacios y J. D. Velarde Rodríguez, *COVID Risk airborne*. Sevilla, Universidad de Sevilla, 2021. www.covidairbornerisk.com.
 - [8] J. L. Jiménez Palacios y Z. Peng, *COViD-19 aerosol transmission estimator (v3.5.7)*, 2021. <https://docs.google.com/spreadsheets/d/16K1OQkLD4BjgBdO8ePj6ytf-RpPMLJ6aXFg3PrIQBbQ/edit#gid=519189277>
 - [9] M. Baselga, J. J. Alba A. J. Schuhmacher, S. Koderá y E. A. Rashed, *Citation: the control of metabolic CO₂ in public transport as a strategy to reduce the transmission of respiratory infectious diseases*, 2022, doi: 10.3390/ijer-ph19116605.
 - [10] D. Rodríguez, I. R. Urbieta, Á. Velasco, M. Á. Campano-Laborda y E. Jiménez, «Assessment of indoor air quality and risk of COVID-19 infection in Spanish secondary school and university classrooms», *Build. Environ.*, vol. 226, p. 109717, 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109717.
 - [11] Junta de Andalucía, «Orden de 24 de enero de 2003 de la Consejería de Educación y Ciencia de la Junta de Andalucía por la que se aprueban las normas de diseño y constructivas para los edificios de uso docente», *Boletín Of. de la Junta Andalucía*, vol. 43, p. 4669, 2003.
 - [12] M. A. Campano, *Confort térmico y eficiencia energética en espacios con alta carga interna climatizados: aplicación a espacios docentes no universitarios en Andalucía* (tesis doctoral). Sevilla, Universidad de Sevilla, 2015. <https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/30632>
 - [13] AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación, *UNE-EN 12207:2017. Ventanas y puertas. Permeabilidad al aire. Clasificación*.

- Madrid, AENOR, 2017. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0058081>
- [14] M. A. Campano, J. J. Sendra y S. Domínguez-Amarillo, «Analysis of thermal emissions from radiators in classrooms in Mediterranean climates», *Procedia Engineering*, vol. 21, pp. 106-113, 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.11.1993.
- [15] M. Á. Campano, S. Domínguez-Amarillo, J. Fernández-Agüera y J. J. Sendra, «Thermal perception in mild climate: adaptive thermal models for schools», *Sustainability*, vol. 11, n.º 14, p. 3948, 2019, doi: 10.3390/su11143948.
- [16] Ministerio de la Presidencia del Gobierno de España, «Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios», BOE n.º 207, 2007, Madrid, Ministerio de la Presidencia del Gobierno de España, 2021, p. 97. <https://www.boe.es/buscar/pdf/2007/BOE-A-2007-15820-consolidado.pdf>
- [17] M. Á. Campano-Laborda, S. Domínguez-Amarillo, J. Fernández-Agüera y I. Acosta, «Indoor comfort and symptomatology in non-university educational buildings: Occupants' perception», *Atmosphere (Basel)*, vol. 11, n.º 4, 2020, doi: 10.3390/atmos11040357.
- [18] J. Fernández-Agüera, M. Á. Campano, S. Domínguez-Amarillo, I. Acosta y J. J. Sendra, «CO2 concentration and occupants' symptoms in naturally ventilated schools in Mediterranean climate», *Buildings*, vol. 9, n.º 9, p. 197, 2019, doi: 10.3390/buildings9090197.
- [19] Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales del Gobierno de España, «Real Decreto 486/1997, de 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo», BOE n.º 97, 1997, Madrid, Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales del Gobierno de España, 1997, p. 14. <https://www.boe.es/buscar/pdf/1997/BOE-A-1997-8669-consolidado.pdf>
- [20] M. de la C. Minguillón, X. Querol, J. M. Felisi y T. Garrido, *Guía para ventilación en aulas*, 2020. doi: 10.20350/digitalCSIC/12677.
- [21] Plataforma Aireamos, *Ventilación en aulas para prevención de COVID-19: límites de CO2 recomendados en periodo de emergencia*. Plataforma Aireamos, 2021. https://drive.google.com/file/d/1jFavucO98vMz5_LpKtnDXBfDZvWlMLcL/view

CAPÍTULO 3

LA APLICACIÓN Y SU FINALIDAD



- ✓ EMPODERAMIENTO
- ✓ CONOCIMIENTO COLECTIVO

COVID Risk^{airbone}



RIESGO ASUMIBLE
SEGÚN:



OPCIONES DE CÁLCULO

CÁLCULO
DETALLADO

- _____
- _____
- _____
- _____
- _____
- _____

CÁLCULO
SIMPLIFICADO

- _____
- _____
- _____

EJEMPLO DE APLICACIÓN: AULA 5 AÑOS

CONDICIONES DE CÁLCULO

RECINTO



RECINTO MEDIO



VENTILACIÓN
NATURAL



RADIADORES
AGUA CALIENTE

AMBIENTALES INTERIORES
PERIODO INVERNAL



21 °C



40 %

OCUPANTES



24
1
25 OCUPANTES EN TOTAL REALIZANDO
ACTIVIDADES VOCALES DISTINTAS.



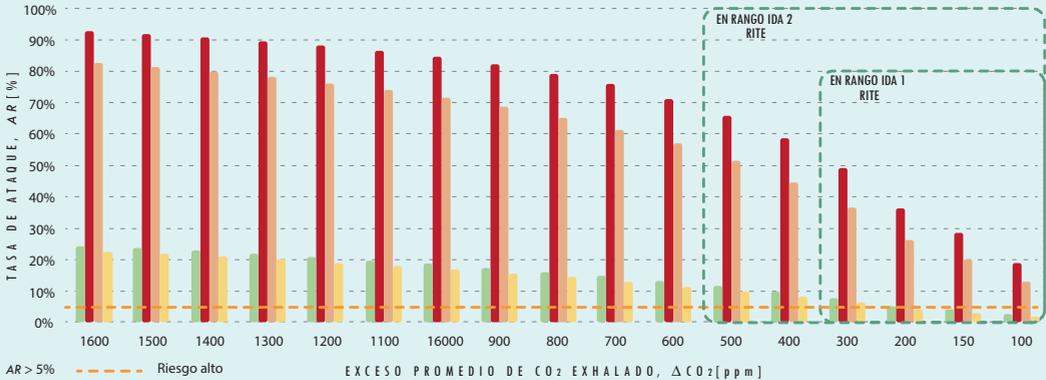
DOCENTE 5 años

TIEMPO DE EXPOSICIÓN



135 MINUTOS
(Jornada escolar)

RESULTADOS



HIPÓTESIS 1

ALUMINO INFECTADO

SENTADOS EN SILENCIO
SIN MASCARILLA

HIPÓTESIS 2.a.

DOCENTE INFECTADO

DE PIE HABLANDO FUERTE
SIN MASCARILLA

HIPÓTESIS 2.b.

DOCENTE INFECTADO

DE PIE HABLANDO FUERTE
MASCARILLA QUIRÚRGICA

HIPÓTESIS 2.c.

DOCENTE INFECTADO

DE PIE HABLANDO FUERTE
MASCARILLA FFP2

CONCLUSIONES

NIVELES ADECUADOS DE
 $\Delta CO_2 \leq 300$ ppm

> 500 ppm ≤ 500 ppm ≤ 300 ppm

ÓPTIMO ≤ 150 ppm

PROFESORES TESTEADOS
O CON MASCARILLA FFP2



Material particulado y ozono en espacios interiores

DIANA RODRÍGUEZ

Departamento de Química Física, Facultad de Ciencias Ambientales y Bioquímica,
Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM), Toledo, España

ELENA JIMÉNEZ

Departamento de Química Física, Facultad de Ciencias
y Tecnologías Químicas, UCLM, Ciudad Real, España.
Instituto de Investigación en Combustión
y Contaminación Atmosférica (ICCA), UCLM, Ciudad Real, España.

Lista de acrónimos

CO monóxido de carbono.

COVID-19 acrónimo de enfermedad por coronavirus (del inglés *CO*rona*V*irus *D*isea-*s*e-2019).

Cl átomos de cloro.

EPA Agencia de Protección del Medioambiente Americana (del inglés *E*nvironmen-*t*al *P*rotection *A*gency).

HEPA filtros de partículas de alta eficiencia (de sus siglas en inglés *h*igh *e*fficiency *p*ar-*t*iculate *a*ir).

NH₃ amoníaco.

N₂ molécula de nitrógeno.

NO_x óxidos de nitrógeno.

NO₂ dióxido de nitrógeno.

NO₃⁻ ion nitrato.

NH₄⁺ ion amonio.

O átomo de oxígeno.

O₂ molécula de oxígeno.

O₃ ozono.

OH radical hidroxilo.

OMS Organización Mundial de la Salud.

PM materia particulada (acrónimo del inglés *p*articulate *m*atter).

SARS-CoV-2 síndrome respiratorio agudo severo (acrónimo del inglés *severe acute respiratory syndrome coronavirus 2*).

SOA aerosol orgánico secundario (acrónimo del inglés *secondary organic aerosol*).

SO₄²⁻ ion sulfato.

SO₂ dióxido de azufre.

UCI unidad de cuidados intensivos.

UFP partícula ultrafina (acrónimo del inglés *ultrafine particle*).

UV ultravioleta.

VOC compuestos orgánicos volátiles (acrónimo del inglés *volatile organic compounds*).

4.1. Introducción

Pasamos gran parte de nuestro tiempo en espacios interiores (lugares de trabajo, aulas, casa, transporte, etc.). Es importante aclarar que cuando hablamos de aire interior nos referimos a todos los espacios interiores no industriales, es decir, edificios de pública concurrencia (hospitales, oficinas, colegios, restaurantes, museos, cines, etc.) o residenciales (hogares, residencias de ancianos, etc.). Es importante dejarlo claro, ya que la fuente y concentración de los contaminantes en espacios interiores está relacionada con la actividad llevada a cabo en este. Si estas concentraciones son muy elevadas, se necesitará un sistema de ventilación apropiado que renueve el aire interior y reduzca el nivel de contaminación interior. Factores como la (mala) ventilación, las condiciones y los productos de limpieza, las características del edificio, los hábitos culturales, el clima y el entorno exterior influyen en la calidad del aire interior. Además, es importante conocer cómo reaccionan los contaminantes del aire para evaluar su impacto en la formación de contaminantes secundarios y si estos pueden contribuir a aumentar los niveles que perjudican a la salud.

Se ha creído siempre, hasta la llegada de la pandemia de la COVID-19, que el aire interior es más saludable que el exterior, puesto que parece que los edificios nos dan refugio y nos protegen, evitando la exposición a los contaminantes presentes en el aire exterior. Sin embargo, nada más lejos de la realidad. De hecho, se estima que el aire interior está hasta cinco veces más contaminado que el aire exterior [1]. Los contaminantes en el interior pueden entrar del exterior y, además, se pueden generar dentro del propio edificio. Del exterior pueden entrar por infiltración, ventilación natural e incluso ventilación mecánica si no hay una filtración correcta. En el proceso conocido como infiltración, el aire del exterior entra al interior a través de aberturas, juntas o grietas en paredes. En la ventilación natural, el aire entra a través de las ventanas y puertas abiertas. El movimiento de aire asociado

con la infiltración y la ventilación natural está causado por las diferencias en la temperatura del aire entre el interior y el exterior, y por el viento. La ventilación mecánica fuerza la extracción del aire para renovarlo y lo introduce del exterior con ayuda de un ventilador. Normalmente, este aire exterior se filtra para garantizar así la calidad del aire interior al retener PM, como los aerosoles –nótese que un aerosol es una colección de partículas suspendidas y los gases circundante– y VOC. (Esto se explicó con más detalles en el capítulo 1). En cuanto a las fuentes interiores, las actividades que se realizan, los materiales de construcción, el mobiliario y el uso de productos de limpieza generan también contaminantes. Por tanto, existe un gran número de fuentes de contaminantes en el interior. En este capítulo, trataremos dos tipos de contaminantes: la materia particulada (PM) y el ozono.

4.2. ¿Qué es la materia particulada?

La materia particulada se define como el conjunto de partículas sólidas o líquidas (a excepción del agua pura) presentes en suspensión en el aire [2]. Es uno de los contaminantes más estudiados por su amenaza sobre la salud [3, 4]. La PM tiene una composición química diferente en función de la fuente emisora y del tamaño de la partícula emitida. Puede estar formada por metales, compuestos orgánicos o iones SO_4^{2-} , NO_3^- y NH_4^+ , entre otros [5]. Las fuentes de PM son muy variadas, ya que dependen del interior que se trate; por ejemplo, en hogares se pueden generar en los procesos de combustión en cocinas, uso de estufas de leña, de pellets e incluso de gas; en aulas [6], [7], en piscinas cubiertas [8], etc. También por el tabaco y cigarrillos electrónicos, velas, incienso e incluso resuspensión del polvo depositado en suelo y mobiliario [9-11].

Atendiendo a su origen, la PM puede clasificarse en:

- Primario: cuando las partículas son emitidas directamente de manera natural (polvo, esporas, alérgenos, etc.) o como consecuencia de la actividad humana (cocina, calefacción, etc.) [12].
- Secundario: si las partículas se producen como resultado de reacciones químicas a partir de gases precursores como SO_2 , NO_x , NH_3 y VOC [13].

La normativa y los métodos de muestreo de PM se basan en el tamaño de las partículas, más que en su origen. Atendiendo a esta característica, la PM se clasifica en:

- *Partículas gruesas*, cuyo diámetro aerodinámico es menor a $10 \mu\text{m}$ (PM_{10}) (figura 4.1). Nótese que 1 micrómetro o micra (mm) es una millonésima parte de 1 metro.

- *Partículas finas* ($PM_{1,0}$, $PM_{2,5}$ o PM_{10}) que comprenden a las partículas con diámetro aerodinámico menor a, de diámetros aerodinámicos de menos de 1, 2, 5 y 10 μm , respectivamente. Dentro de las partículas finas se denominan *partículas ultrafinas* (UFP) a las que poseen diámetros menores de 0,1 μm . Estas partículas poseen un diámetro mucho más pequeño que el de un cabello humano o un grano de arena fina (figura 4.1).

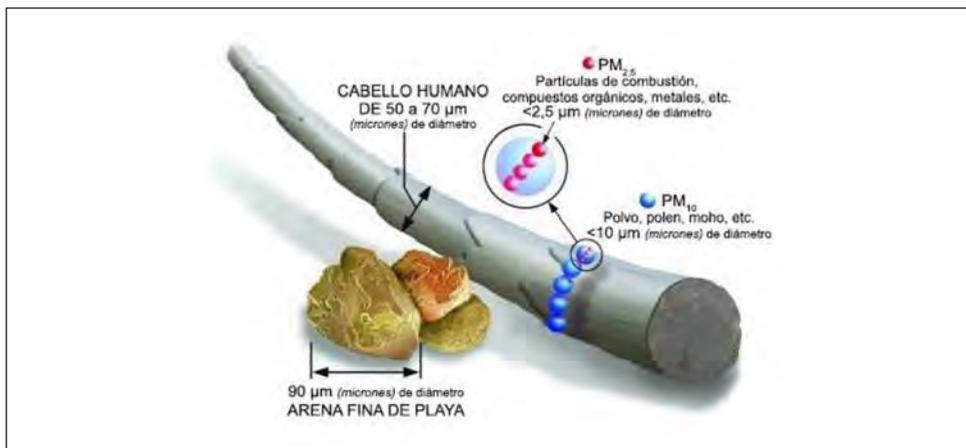


Figura 4.1. Comparación de tamaños de material particulado [14].

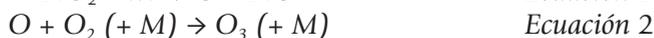
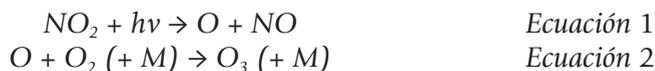
Los tamaños de partícula legislados son las $PM_{2,5}$ y las PM_{10} . Las PM_{10} corresponden a todo el intervalo de diámetros de partículas finas y ultrafinas, denominadas «partículas inhalables». Cuanto más pequeñas son las partículas, más tiempo permanecen suspendidas en el aire y, por tanto, mayor es la probabilidad de ser respiradas. Entre las UFP se encuentran los SOA, que se forman *in situ* en el aire como consecuencia de reacciones fotoquímicas de los VOC con oxidantes atmosféricos, como OH, Cl u ozono [15]. En el Departamento de Química Física de la Universidad de Castilla-La Mancha, se estudian los procesos de degradación de familias de VOC iniciada por OH, Cl y O_3 y los mecanismos de formación de otros productos, como SOA [16-22].

4.3. ¿Qué es el ozono?

El ozono es una molécula compuesta por tres átomos de oxígeno (O_3) que se encuentra de forma natural entre 8 y 15 km sobre el suelo (estratosfera); recibe el sobrenombre de ozono «bueno», porque *desempeña un papel fundamental en la absorción de los rayos ultravioleta* que son dañinos para los seres vivos. Sin embargo, el O_3 en el nivel del suelo (troposfera) ha sido de-

nominado ozono «malo», porque es una sustancia altamente oxidante que ocasiona daños a las personas y ecosistemas. Además, es capaz de reaccionar con VOC y dar lugar a la formación de partículas ultrafinas como los SOA [15].

El ozono es un contaminante preocupante en el aire exterior, que se forma por reacciones químicas muy complejas en presencia de radiación solar (representada como $h\nu$), NO_x y VOC, provenientes principalmente del tráfico rodado, aunque los VOC también se emiten por las industrias y la vegetación [23]. La fotólisis del NO_2 produce átomos de O altamente reactivos que reaccionan con el O_2 del aire ($M = \text{O}_2 + \text{N}_2$) capaz de absorber el calor desprendido en la reacción (ecuaciones 1 y 2).



El ozono también se genera en interiores por el uso de aparatos eléctricos como fotocopiadoras, impresoras láser, limpiadores de aire con ionización o dispositivos desinfectantes [24-26].

4.4. Efectos de partículas inhalables y ozono sobre la salud

Los efectos sobre nuestra salud de la contaminación del aire son adversos y diferentes dependiendo del tipo de contaminante, de su concentración, del tiempo de exposición y de las características individuales de la persona expuesta. Según la disponibilidad de datos de toxicología y biomarcadores humanos, podemos clasificar los contaminantes en tres categorías:

- **Categoría A:** NO_2 , SO_2 , O_3 y CO.
- **Categoría B:** hidrocarburos aromáticos policíclicos y VOC, como formaldehído o acetaldehído, y compuestos orgánicos no metánicos, como benceno o tolueno.
- **Categoría C:** biológicos (moho, polen, etc.) y partículas finas y ultrafinas en suspensión.

Todos estos contaminantes pueden provocar enfermedades respiratorias y cardiovasculares, y son potencialmente cancerígenos. En este apartado nos centraremos en los efectos que produce la inhalación de ozono (categoría A) y partículas (categoría C). Contaminantes de la categoría B, como son los VOC, se tratarán con más detalle en el capítulo 5 [27].

4.4.1. Efectos adversos de las partículas inhalables

La materia particulada es un indicador común de la contaminación del aire. Esta conlleva efectos sobre la salud incluso en concentraciones muy bajas; de hecho, no se ha podido identificar ningún umbral por debajo del cual no se hayan observado daños para la salud [28, 29]. Afecta a más personas que ningún otro contaminante y tiene repercusiones sobre la salud, tanto en zonas urbanas como rurales y tanto en países desarrollados como en países en desarrollo [29]. No obstante, la exposición a PM acostumbra a ser mucho más alta en las ciudades que registran actualmente un rápido desarrollo que en las ciudades desarrolladas de tamaño comparable. Existe una estrecha correlación cuantitativa entre la exposición a altas concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ y el aumento de la mortalidad o morbilidad diaria y a largo plazo [12, 30-32]. La peligrosidad de la PM es inversamente proporcional a su tamaño. Cuanto más pequeñas son las partículas, más peligrosas son debido a que pueden penetrar más en profundidad en nuestras vías respiratorias, llegando hasta los bronquios, los alvéolos y el torrente sanguíneo y causando:

- asma, bronquitis crónica y, posiblemente, cáncer de pulmón;
- daño en el sistema cardiovascular;
- disfunciones en los sistemas reproductivos y nervioso central.

Durante la pandemia de la COVID-19 se ha demostrado que el SARS-CoV-2 se transmite por aerosoles de diámetro de unas pocas μm [33], por lo que los aerosoles generados por una persona infectada podrían depositarse en la PM suspendidos, actuando como vector de transmisión de la enfermedad, especialmente en espacios cerrados [34]. Según diferentes estudios, los aerosoles que contenían el SARS-CoV-2 podrían ser emitidos por personas infectadas al hablar, gritar o cantar, y quedarían suspendidos por su pequeño tamaño y potencialmente inhalados por otras personas presentes en la misma zona, incluso a una distancia de varios metros. Cuando se inhala, la PM de pequeño diámetro introduciría los agentes biológicos que contiene en el cuerpo, lo que facilitaría el desarrollo del virus dentro del tracto respiratorio y causaría la infección [35].

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la exposición a partículas $PM_{2.5}$ y otros contaminantes provoca la muerte de alrededor de 1,4 millones de personas en Europa.

4.4.2. Efectos adversos del ozono

El ozono es un gas altamente oxidante y también un indicador de la calidad general del aire. Por tanto, existe una regulación de sus niveles como se indi-

ca en la tabla 4.1 del siguiente apartado. Debido a su poder oxidante, O_3 es un gran desinfectante, capaz de descomponer las proteínas de virus, como el SARS-CoV-2, y desactivarlo [36]. Durante la pandemia, se ha empleado ozono para desinfectar espacios interiores de automóviles, salas, etc., sin ocupantes, ya que genera espacios poco seguros. La exposición prolongada a este gas o a elevadas concentraciones puede producir, entre otros síntomas:

- tos e irritación de garganta;
- inflamación de las vías respiratorias;
- dolor, ardor o malestar en el pecho al respirar profundamente;
- opresión en el pecho, sibilancias o dificultad para respirar;
- aumento o empeoramiento de los ataques de asma;
- disminuciones en la función pulmonar y el revestimiento pulmonar;
- enfermedades cardiovasculares.

Se estima que en todo el mundo de 9 a 23 millones de las visitas a urgencias están relacionadas con el asma, y se atribuyeron a la exposición a ozono [37].

4.5. Valores límite legislados de la concentración de partículas y ozono

Como la exposición a contaminantes en ambientes interiores puede causar daños en nuestra salud, la regulación de los niveles de exposición a estos ha sido objeto de diversas directrices tanto en el ámbito mundial por parte de la OMS como en el europeo y en los nacionales. La normativa expresa la concentración de PM y ozono en $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. En la tabla 4.1 se muestran los valores guía o límite de la concentración atmosférica de O_3 y PM que no deben de superarse en interiores [38] y en exteriores [39, 40] para evitar y reducir los impactos adversos de estos contaminantes en la salud. Las directrices sobre la calidad del aire de la OMS [38], en particular para ozono y partículas $PM_{2,5}$ y PM_{10} , son algo más restrictivas que la directiva europea [40] y la legislación española [39] relativas a la mejora de la calidad del aire (que, además, solo se refieren a la calidad del aire exterior). Los valores guía de la OMS –que sí contemplan la calidad del aire interior, aunque no son de obligado cumplimiento– se orientan a lograr las concentraciones de partículas más bajas posibles, basándose en la actualización de los estudios sobre contaminación y efectos en la salud humana y el medioambiente. Por ejemplo, el valor límite promedio anual de $PM_{2,5}$ y PM_{10} en $5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ y $15 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, respectivamente. Mientras que, para las UPF, la OMS considera –para un promedio de 24 ho-

ras– como concentración baja un valor de < 1.000 partículas/cm³ y de > 10.000 partículas/cm³ como concentración alta.

Tabla 4.1. Límites de concentración atmosférica de ozono y partículas, según la normativa vigente internacional y nacional

Contaminante	Periodo promedio	OMS ⁽¹⁾	Directiva europea ⁽²⁾	Legislación española ⁽³⁾
		Concentración límite en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$		
PM _{2,5}	24 h	15		
	1 año	5	20	20
PM ₁₀	24 h	45		
	1 año	15	40	40
O ₃	8 h	100	120	120

⁽¹⁾Directrices sobre la calidad del aire de 2020. ⁽²⁾Directiva 2015/1480/CE. ⁽³⁾Ley 34/2007 de Calidad del Aire y Protección de la Atmósfera y Real Decreto 102/2011.

La reducción de las emisiones de estos y otros contaminantes mejorará la calidad del aire. Además, hay que esforzarse por alcanzar estos niveles de referencia para garantizar la salud pública.

4.6. Monitorización de PM y ozono en espacios interiores

Para la monitorización de contaminantes de interior, como PM y ozono, la OMS [38] recomienda una serie de métodos analíticos que se emplean en laboratorios especializados y en empresas y auditorías que se dedican a medir y solucionar problemas relacionados con la calidad del aire interior [41, 42]. Aunque estos métodos analíticos están validados, los avances recientes en sensores de PM y ozono en portátiles de relativamente bajo coste hacen que el monitoreo personal en interiores sea más asequible y factible. Sin embargo, hay que tener en cuenta que este tipo de dispositivos no están validados y no deben usarse para verificar si se alcanzan los valores límites [43].

El método estandarizado para analizar partícula es un método discontinuo, la *gravimetría*, donde se pesa el PM recogido en un filtro. Las PM pueden medirse por otros métodos, como el de atenuación β , el método óptico, etc. Sin embargo, la técnica óptica, cuyo funcionamiento se basa en el principio de la dispersión de la luz que provocan las partículas (*contadores de partículas por dispersión láser*), es el método más habitual para el monitoreo en continuo de PM, debido a su bajo costo y a su rápido tiempo de respuesta.

Para la monitorización de O_3 , un gas en condiciones atmosféricas típicas (temperatura y presión), se pueden emplear monitores donde se mide la concentración de O_3 ambiental por *espectroscopia de absorción UV*, es decir, miden la cantidad de luz UV, procedente de una fuente de radiación interna, que no ha sido absorbida por el O_3 presente en el aire a una longitud de onda específica (254 nm). También se pueden emplear *sensores semiconductores*, generalmente un óxido metálico, sensible a este gas. El principio de funcionamiento de estos sensores se basa en que la conductividad eléctrica en el semiconductor varía como consecuencia de la reacción con el ozono en el aire.

Los equipos de medida de los niveles de PM y O_3 se suelen colocar a una altura que coincidía con las zonas de respiración de los ocupantes, manteniendo una distancia de al menos 1,5 m de las paredes y a 1 m de las personas, evitando así cualquier perturbación directa por la persona que está midiendo [38].

En un estudio reciente realizado en España, se ha medido la calidad del aire interior en aulas de Preescolar y Educación Primaria [6] y en centros de enseñanza secundaria y universitaria [7] durante la reapertura tras el confinamiento de 2020 por la pandemia de la COVID-19. El estudio de Villanueva *et al.* [6], llevado a cabo en diecinueve aulas con ventilación natural durante un mes, mostró que, en general, las aulas de Preescolar presentaban mejores condiciones de ventilación que las aulas de Educación Primaria, pero, por el contrario, se alcanzaron concentraciones más altas de PM, excediendo los límites recomendados por la OMS (tabla 4.1). En cuanto al estudio de Rodríguez *et al.* [7], llevado a cabo en tres aulas con ventilación natural y una con ventilación mecánica durante ocho meses, se observó que, en las aulas del instituto de enseñanza secundaria (IES), la mayor ocupación en estos espacios y las fuentes de partículas interiores como la sala de caldera o cafetería con cocina de gas, aumentó notablemente los niveles de PM, tanto finas como gruesas, con un gran impacto en las $PM_{2,5}$, superando varios días el valor guía diario establecido por la OMS, $15 \mu g \cdot m^{-3}$ (línea discontinua roja en la figura 4.2). Los niveles de O_3 en todas las aulas fueron más bajos que los correspondientes niveles al aire libre, ya que no había fuentes de ozono en el interior (como fotocopiadoras, etc.), y, como se muestran en la figura 4.2, siempre fueron inferiores al límite octohorario que recomienda la OMS, $100 \mu g \cdot m^{-3}$. Las concentraciones medidas en las aulas con ventilación natural fueron mayores que en las de ventilación mecánica y en los meses de verano, cuando la insolación es mayor. Es decir, las aulas con ventilación natural se vieron más afectadas por la contaminación exterior que el aula con ventilación mecánica donde se filtra el aire exterior que se introduce en el interior. En consecuencia, los sistemas de ventilación mecánica son imprescindibles en espacios interiores para asegurar una buena calidad del aire.

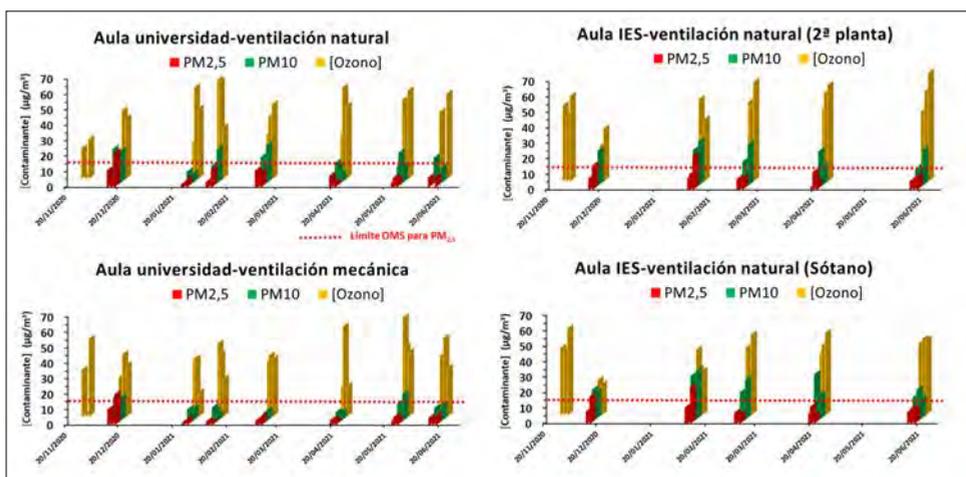


Figura 4.2. Comparación de los niveles de PM y ozono en cuatro aulas de Toledo [7].

4.7. Cómo reducir la concentración de partículas y ozono en el aire interior

Los métodos más eficaces para retener en un espacio interior la PM y reducir su concentración en el aire interior es la *filtración*, mientras que para el ozono es la *adsorción sobre carbón activado* [44].

Los filtros HEPA están formados por una superficie filtrante de fibras muy finas, generalmente de cuarzo, colocadas al azar para crear un entramado en forma de malla capaz de retener hasta el 99,97 % de las partículas de diámetro 0,3 μm que lo atraviesan [45]. Estos filtros, aunque parece que aparecieron con la pandemia de la COVID-19, se utilizan desde hace tiempo para limpiar el aire del interior de los aviones [46] o UCI hospitalarias [47], e incluso en hogares para minimizar el impacto de alérgenos y del humo del tabaco [48, 49].

Los filtros de carbón activado (o carbón activo) instalados, normalmente, en los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado están formados por un material con una estructura muy porosa que le confiere unas importantes propiedades de fijación y retención por adsorción. Cuando un filtro es recubierto por carbono activo y se hace pasar por ozono, este se descompone liberando oxígeno [50]. La eficacia de eliminación de ozono en estos filtros de carbón activado se ha demostrado tanto en aire interior [51] –donde la eficiencia fue inicialmente del 96 % y se mantuvo en el 50 % o más durante dos meses y medio– y en aire exterior de una zona suburbana, tras filtrar durante cinco meses [52].

Referencias

- [1] G. McGill, L. O. Oyedele, K. McAllister y M. Qin, «Effective indoor air quality for energy-efficient homes: a comparison of UK rating systems», *Archit. Sci. Rev.*, vol. 59, n.º 2, pp. 159-173, 2016, doi: 10.1080/00038628.2015.1078222.
- [2] E. Meszaros, *Fundamentals of atmospheric aerosol chemistry*. Akadémiai Kiado, 1999.
- [3] M. H. Forouzanfar, L. Alexander, V. F. Bachman, S. Biryukov, *et al.*, «Global, regional, and national comparative risk assessment of 79 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks in 188 countries, 1990-2013: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2013», *Lancet*, vol. 386, n.º 10010, pp. 2287-2323, 2015, doi: 10.1016/S0140-6736(15)00128-2.
- [4] WHO, *Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide*. Bonn, 2003. https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/112199/E79097.pdf
- [5] K. Adams, D. S. Greenbaum, R. Shaikh, A. M. van Erp y A. G. Russell, «Particulate matter components, sources, and health: Systematic approaches to testing effects», *J. Air Waste Manag. Assoc.*, vol. 65, n.º 5, pp. 544-558, 2015, doi: 10.1080/10962247.2014.1001884.
- [6] F. Villanueva, A. Notario, B. Cabañas, P. Martín, S. Salgado y M. F. Gabriel, «Assessment of CO₂ and aerosol (PM_{2.5}, PM₁₀, UFP) concentrations during the reopening of schools in the COVID-19 pandemic: the case of a metropolitan area in Central-Southern Spain», *Environ. Res.*, vol. 197, 2021, doi: 10.1016/j.envres.2021.111092.
- [7] D. Rodríguez, I. R. Urbietta, Á. Velasco, M. Á. Campano-Laborda y E. Jiménez, «Assessment of indoor air quality and risk of COVID-19 infection in Spanish secondary school and university classrooms», *Build. Environ.*, vol. 226, p. 109717, 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109717.
- [8] A. Rodríguez, M. Tajuelo, D. Rodríguez, S. Seseña, P. Ruiz y M. L. Palop, «Assessment of chemical and microbiological parameters of indoor swimming pool atmosphere using multiple comparisons», *Indoor Air*, vol. 28, n.º 5, pp. 676-688, 2018, doi: 10.1111/ina.12477.
- [9] Z. Li, Q. Wen y R. Zhang, «Sources, health effects and control strategies of indoor fine particulate matter (PM_{2.5}): a review», *Sci. Total Environ.*, vol. 586, pp. 610-622, 2017, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.029.
- [10] T. Chang, J. Wang, J. Lu, Z. Shen, Y. Huang, J. Sun, H. Xu, X. Wang, D. Ren y J. Cao, «Evaluation of indoor air pollution during the decorating process and inhalation health risks in Xi'an, China: a case study», *Aerosol Air Qual. Res.*, vol. 19, n.º 4, pp. 854-864, 2019, doi: 10.4209/aaqr.2018.07.0261.

- [11] A. Nadali, H. Arfaeinia, Z. Asadgol y M. Fahiminia, « Indoor and outdoor concentration of PM 10, PM 2.5 and PM 1 in residential building and evaluation of negative air ions (NAIs) in indoor PM removal », *Environ. Pollut. Bioavailab.*, vol. 32, n.º 1, pp. 47-55, 2020, doi: 10.1080/26395940.2020.1728198.
- [12] I. Manisalidis, E. Stavropoulou, A. Stavropoulos y E. Bezirtzoglou, «Environmental and health impacts of air pollution: a review», *Front. Public Heal.*, vol. 8, pp. 1-13, 2020, doi: 10.3389/fpubh.2020.00014.
- [13] M. Park, H. S. Joo, K. Lee, M. Jang, S. D. Kim, I. Kim, L. J. S. Borlaza, H. Lim, H. Shin, K. H. Chung, Y. H. Choi, S. G. Park, M. S. Bae, J. Lee, H. Song y K. Park, «Differential toxicities of fine particulate matters from various sources», *Sci. Rep.*, vol. 8, n.º 1, pp. 1-11, 2018, doi: 10.1038/s41598-018-35398-0.
- [14] M. Antiñolo, M. Asensio, J. Albaladejo y E. Jiménez, «Gas-phase reaction of trans-2-Methyl-2-butenal with Cl: kinetics, gaseous products, and SOA formation», *Atmosphere (Basel)*, vol. 11, n.º 7, 2020, doi: 10.3390/atmos11070715.
- [15] M. Asensio, M. Antiñolo, S. Blázquez, J. Albaladejo y E. Jiménez, «Evaluation of the daytime tropospheric loss of 2-methylbutanal», *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 22, n.º 4, pp. 2689-2701, 2022, doi: 10.5194/acp-22-2689-2022.
- [16] E. Jiménez, S. González, M. Cazaunau, H. Chen, B. Ballesteros, V. Daële, J. Albaladejo y A. Mellouki, «Atmospheric degradation initiated by OH radicals of the potential foam expansion agent, CF₃(CF₂)₂CH=CH₂ (HFC-1447fz): kinetics and formation of gaseous products and secondary organic aerosols», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 50, n.º 3, pp. 1234-1242, 2016, doi: 10.1021/acs.est.5b04379.
- [17] M. Tajuelo, D. Rodríguez, M. T. Baeza-Romero, Y. Díaz-de-Mera, A. Aranda y A. Rodríguez, «Secondary organic aerosol formation from styrene photolysis and photooxidation with hydroxyl radicals», *Chemosphere*, vol. 231, pp. 276-286, 2019, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.05.136.
- [18] M. Tajuelo, D. Rodríguez, A. Rodríguez, A. Escalona, G. Viteri, A. Aranda e Y. Díaz-de-Mera, «Secondary organic aerosol formation from the ozonolysis and oh-photooxidation of 2,5-dimethylfuran», *Atmos. Environ.*, vol. 245, pp. 118041, 2021, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.118041.
- [19] M. Tajuelo, A. Rodríguez, A. Aranda, Y. Díaz-de-Mera, M. E. Tucceri y D. Rodríguez, «Secondary organic aerosol formation from photooxidation of γ -butyro and γ -valero-lactone: a combined experimental and theoretical study», *Atmos. Environ.*, vol. 276, p. 119051, 2022, doi: 10.1016/j.atmosenv.2022.119051.

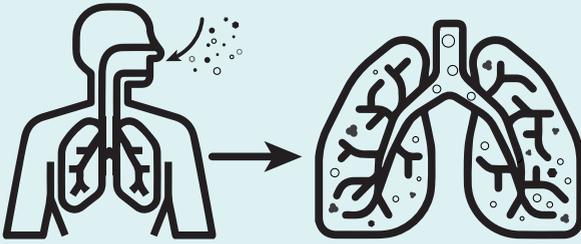
- [20] Y. Díaz-de-Mera, A. Aranda, E. Martínez, A. A. Rodríguez, D. Rodríguez y A. Rodríguez, «Formation of secondary aerosols from the ozonolysis of styrene: Effect of SO₂ and H₂O», *Atmos. Environ.*, vol. 171, pp. 25-31, 2017, doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.10.011.
- [21] L. L. B. Bracco, M. E. Tucceri, A. Escalona, Y. Díaz-De-Mera, A. Aranda, A. M. Rodríguez y D. Rodríguez, «New particle formation from the reactions of ozone with indene and styrene», *Phys. Chem. Chem. Phys.*, vol. 21, n.º 21, pp. 11214-11225, 2019, doi: 10.1039/c9cp00912d.
- [22] EPA, *Conceptos básicos sobre el material particulado (PM, por sus siglas en inglés)*, 2022. <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles>
- [23] K. Pytel, R. Marcinkowska, M. Rutkowska y B. Zabiegała, «Recent advances on SOA formation in indoor air, fate and strategies for SOA characterization in indoor air. A review», *Sci. Total Environ.*, vol. 843, 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.156948.
- [24] B. Finlayson-Pitts y J. J. Pitts, *Chemistry of the upper and lower atmosphere*. San Diego, California (USA), Academic, doi: 10.1016/B978-0-12-257060-5.X5000-X.
- [25] N. Britigan, A. Alshawa y S. A. Nizkorodov, «Quantification of ozone levels in indoor environments generated by ionization and ozonolysis air purifiers», *J. Air Waste Manag. Assoc.*, vol. 56, n.º 5, pp. 601-610, 2006, doi: 10.1080/10473289.2006.10464467.
- [26] S. K. Brown, «Assessment of pollutant emissions from dry-process photocopiers», *Indoor Air*, vol. 9, n.º 4, pp. 259-267, 1999, doi: 10.1111/j.1600-0668.1999.00005.x.
- [27] Q. Zhang y P. L. Jenkins, «Evaluation of ozone emissions and exposures from consumer products and home appliances», *Indoor Air*, vol. 27, n.º 2, pp. 386-397, 2017, doi: 10.1111/ina.12307.
- [28] S. Henschel y G. Chan, *Health risks of air pollution in Europe. HRAPIE project*, 2003. https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0017/234026/e96933.pdf.
- [29] World Health Organization, *Ambient air pollution: a global assessment of exposure and burden of disease*. World Health Organization, 2016. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/250141>
- [30] C. A. Pope, «Air pollution and health. Good news and bad», *N. Engl. J. Med.*, vol. 351, n.º 11, pp. 1132-1134, 2004, doi: 10.1056/nejme048182.
- [31] A. D. Maynard and E. D. Kuempel, «Airborne nanostructured particles and occupational health», *J. Nanoparticle Res.*, vol. 7, n.º 6, pp. 587-614, 2005, doi: 10.1007/s11051-005-6770-9.
- [32] D. Rodríguez, A. I. Cobo-Cuenca y R. Quiles, «Effects of air pollution on daily hospital admissions for cardiovascular diseases in Castilla-La Man-

- cha, Spain: a region with moderate air quality», *Air Qual. Atmos. Heal.*, vol. 15, n.º 4, pp. 591-604, 2022, doi: 10.1007/s11869-021-01144-1.
- [33] C. C. Wang, K. A. Prather, J. Sznitman, J. L. Jimenez, S. S. Lakdawala, Z. Tufekci y L. C. Marr, «Airborne transmission of respiratory viruses», *Science*, vol. 373, n.º 6558, 2021, doi: 10.1126/science.abd9149.
- [34] P. Piscitelli, A. Miani, L. Setti, G. De Gennaro, *et al.*, «The role of outdoor and indoor air quality in the spread of SARS-CoV-2: overview and recommendations by the research group on COVID-19 and particulate matter (RESCOP Commission)», *Environ. Res.*, vol. 211, 2022, doi: 10.1016/j.envres.2022.113038.
- [35] N. A. Ramli, N. F. F. Md Yusof, S. Shith y A. Suroto, «Chemical and biological compositions associated with ambient respirable particulate matter: a review», *Water. Air. Soil Pollut.*, vol. 231, n.º 3, 2020, doi: 10.1007/s11270-020-04490-5.
- [36] A. Ataei-Pirkooh, A. Alavi, M. Kianirad, K. Bagherzadeh, A. Ghasempour, O. Pourdakan, R. Adl, S. J. Kiani, M. Mirzaei y B. Mehravi, «Destruction mechanisms of ozone over SARS-CoV-2», *Sci. Rep.*, vol. 11, n.º 1, pp. 1-10, 2021, doi: 10.1038/s41598-021-97860-w.
- [37] S. C. Anenberg, D. K. Henze, V. Tinney, P. L. Kinney, W. Raich, N. Fann, C. S. Malley, H. Roman, L. Lamsal, B. Duncan, R. V. Martin, A. van Donkelaar, M. Brauer, R. Doherty, J. E. Jonson, Y. Davila, K. Sudo y J. C. I. Kuylenstierna, «Estimates of the global burden of ambient PM_{2.5}, ozone y NO₂ on asthma incidence and emergency room visits», *Environ. Health Perspect.*, vol. 126, n.º 10, pp. 1-14, 2018, doi: 10.1289/EHP3766.
- [38] World Health Organization. Regional Office for Europe, *Methods for sampling and analysis of chemical pollutants in indoor air: supplementary publication to the screening tool for assessment of health risks from combined exposure to multiple chemicals in indoor air in public settings for children*. World Health Organization. Regional Office for Europe, 2020. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/334389>
- [39] M. Ruiz de Adana, X. Querol, E. Jiménez, J. L. Jiménez, M. C. Minguilón, J. Ballester y Grupo de Trabajo Multidisciplinar, *Informe del GTM: Equipos autónomos para la limpieza del aire y sensores para el control de la transmisión de SARS-CoV-2 por aerosoles*. Madrid, 2021. https://www.ciencia.gob.es/dam/jcr:18dfae91-8677-4613-ac62-fa84d69e0230/Informe_sobre_purificacion_de_aire.pdf
- [40] EPA, *What is a HEPA filter?*, 2022. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/what-hepa-filter>
- [41] T. M. Korves, D. Johnson, B. W. Jones, J. Watson, D. M. Wolk y G. M. Hwang, «Detection of respiratory viruses on air filters from aircraft», *Lett. Appl. Microbiol.*, vol. 53, n.º 3, pp. 306-312, 2011, doi: 10.1111/j.1472-765X.2011.03107.x.

- [42] B. Ross, D. Hansen, T. Lieske, J. Krude, F. Saner, G. Marggraf, A. Paul, H. G. Jakob y W. Popp, «Refurbishment works in a hospital during normal operation», *GMS Krankenhhyg. Interdiszip.*, vol. 6, n.º 1, p. doc11, 2011. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22242092%5Cn> <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=3252655&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>
- [43] R. E. Reisman, P. M. Mauriello, G. B. Davis, J. W. Georgitis y J. M. De-Masi, «A double-blind study of the effectiveness of a high-efficiency particulate air (HEPA) filter in the treatment of patients with perennial allergic rhinitis and asthma», *J. Allergy Clin. Immunol.*, vol. 85, n.º 6, pp. 1050-1057, 1990, doi: 10.1016/0091-6749(90)90050-E.
- [44] R. Bascom, T. K. Fitzgerald, J. Kesavanathan y D. L. Swift, «A portable air cleaner partially reduces the upper respiratory response to sidestream tobacco smoke», *Appl. Occup. Environ. Hyg.*, vol. 11, n.º 6, pp. 553-559, 1996, doi: 10.1080/1047322X.1996.10389373.
- [45] M. Ondarts, J. Outin, L. Reinert, E. Gonze y L. Duclaux, «Removal of ozone by activated carbons modified by oxidation treatments», *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, vol. 224, n.º 9, pp. 1995-1999, 2015, doi: 10.1140/epjst/e2015-02516-6.
- [46] L. A. Gundel, D. P. Sullivan, G. Y. Katsapov y W. J. Fisk, *A pilot study of energy efficient air cleaning for ozone*. California (EE.UU), 2002. <https://indoor.lbl.gov/publications/pilot-study-energy-efficient-air>
- [47] G. Bekö, G. Clausen y C. J. Weschler, «Sensory pollution from bag filters, carbon filters and combinations», *Indoor Air*, vol. 18, n.º 1, pp. 27-36, 2008, doi: 10.1111/j.1600-0668.2007.00501.x.

CAPÍTULOS 4 y 5

UN ZOOM A LO QUE RESPIRAMOS



ENTRE OTRAS COSAS RESPIRAMOS:

- MATERIAL PARTICULADO (PM)
 - GRUESO (PM₁₀)
 - FINO (PM_{2.5})
- OZONO (O₃)
- COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES (COVs)

VALORES LÍMITE
SEGÚN OMS

PM _{2.5}	15 µg/m ³ Media 24h
PM ₁₀	45 µg/m ³ Media 24h
O ₃	100 µg/m ³ Media 8h
COVs	120-1200 ppb Media 8h

MATERIAL PARTICULADO

EJEMPLO DE FUENTES



VENTILACIÓN NATURAL



POLVO DE TIZA



ASMA / BRONQUITIS CRÓNICA



DISFUNCIÓN DEL SISTEMA NERVIOSO CENTRAL

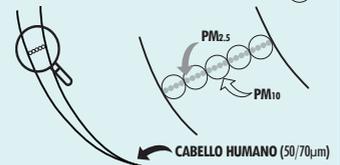


DAÑOS EN SISTEMA CARDIOVASCULAR



DISFUNCIÓN DEL SISTEMA REPRODUCTOR

MATERIAL PARTICULADO FINO PM_{2.5} (<2.5µm) ○
MATERIAL PARTICULADO GRUESO PM₁₀ (2.5µm -10µm) ○



OZONO

EJEMPLO DE FUENTES



FOTOCOPIADORAS



OZONIZADORES / IONIZADORES



IRRITACIÓN DE OJOS



TOS



DOLOR DE CABEZA



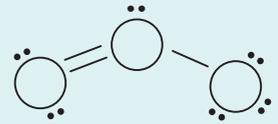
DISMINUCIÓN FUNCIÓN PULMONAR



ENFERMEDAD CARDIOVASCULAR



TUMORES



O₃

COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES

EJEMPLO DE FUENTES



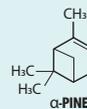
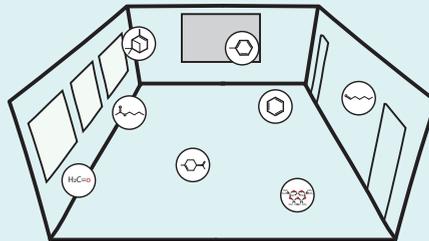
PRODUCTOS DE LIMPIEZA



MASCARILLAS PARA EL PELO



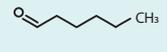
HUMO DE TABACO



α-PINENO



TOLUENO



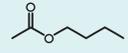
HEXANAL



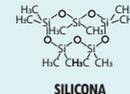
FORMALDEHÍDO



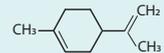
BENCENO



ACETATO DE BUTILO



SILICONA



LIMONENO

Compuestos orgánicos volátiles en ambientes interiores

SONIA LARA

Universidad de Castilla-La Mancha. Instituto de Investigación en
Combustión y Contaminación Atmosférica, Ciudad Real, España

FLORENTINA VILLANUEVA

Universidad de Castilla-La Mancha. Instituto de Investigación en
Combustión y Contaminación Atmosférica, Ciudad Real, España
Parque Científico y Tecnológico de Castilla La Mancha, Albacete, España

Lista de acrónimos

BTEX acrónimo de benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos.

CAI calidad del aire interior.

IAQ calidad del aire interior (acrónimo del inglés *indoor air quality*).

IARC Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (acrónimo del inglés
International Agency for Research on Cancer).

I/O ratio interior/exterior (del inglés *indoor/outdoor*).

NO₂ dióxido de nitrógeno.

OMS Organización Mundial de la Salud.

PAH hidrocarburos aromáticos policíclicos (acrónimo del inglés *polycyclic aromatic hydrocarbon*).

PCA análisis de componentes principales (acrónimo del inglés *principal component analysis*).

VOC compuestos orgánicos volátiles (acrónimo del inglés *volatile organic compounds*).

5.1. Introducción: calidad del aire interior y VOC

El término *calidad del aire interior* (CAI o IAQ) hace referencia a ambientes no industriales (oficinas, colegios, viviendas particulares, lugares de ocio, restaurantes, etc.), como se ha comentado en el capítulo anterior [1]. Parece

evidente que la exposición a contaminantes del aire interior podría tener más impacto sobre la salud humana que el aire ambiente por varias razones:

- Las actividades de la vida diaria provocan que la población pase más tiempo respirando aire interior que exterior, por lo que la calidad del aire que en ellos se respira puede afectar directamente a la salud [2].
- Los edificios son cada vez más herméticos para reducir el coste energético, lo que reduce la entrada incontrolada de aire procedente del exterior.
- Podemos estar expuestos a una mayor cantidad de contaminantes del aire, especialmente compuestos orgánicos volátiles (VOC) en los ambientes interiores que en el exterior.
- La concentración de muchos contaminantes es mayor en el interior que en el exterior [3].

Dada la preocupación acerca de los efectos que sobre la salud tienen los diferentes contaminantes en los ambientes interiores, organismos nacionales e internacionales, como la Organización Mundial de la Salud (OMS), han establecido valores guía para limitar la exposición de los seres humanos a estos. Uno de los principales problemas de contaminación en el interior de los edificios se centra en los VOC. Estos son compuestos químicos orgánicos que se encuentran en estado gaseoso a temperatura ambiente o son muy volátiles a dicha temperatura. Entre sus propiedades destacan por ser sustancias con distinto grado de volatilidad, liposolubilidad y algunos de ellos tóxicos y cancerígenos. Estas propiedades son las responsables de los efectos adversos sobre la salud humana, pudiendo ser absorbidos por el organismo fácilmente por inhalación. Se encuentran en pequeñas concentraciones en el aire exterior, pero en ambientes interiores, donde la ventilación y, por tanto, la regeneración del aire es escasa, pueden encontrarse, en muchas ocasiones, en concentraciones de dos y cinco veces superiores a las del exterior. En la tabla 5.1 se incluyen algunos de los VOC considerados prioritarios por la OMS [4].

5.1.1. Fuentes de emisión de VOC

La calidad del aire interior está influenciada por la calidad del aire exterior, las actividades realizadas en el interior, las emisiones internas de compuestos contaminantes y el diseño del sistema de ventilación; el cual se encarga de introducir aire limpio del exterior. Los contaminantes presentes en el aire exterior penetran en los edificios a través de la apertura de ventanas y puertas, de grietas en los edificios, especialmente para los antiguos, así como de sistemas de ventilación mecánica que no dispongan de filtros específicos para gases [5]. Además, el entorno del edificio es muy importante, ya que

Tabla 5.1. Algunos de los compuestos orgánicos volátiles prioritarios

Familia química	Compuesto
Aldehídos	Formaldehído
	Acetaldehído
Hidrocarburos aromáticos	Benceno
	Etilbenceno
	Xileno (o-,m-,p-)
	Estireno
	Tolueno
	1,2,3-trimetilbenceno
	1.4-diclorobenceno
Ésteres	Butilacetato
Terpenos	Limoneno
	á-pineno
Hidrocarburos clorados	Tetracloroetileno
	Tricloroetileno
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs)	Naftaleno

puede mejorar o empeorar la calidad del aire, siendo fuentes principales de contaminantes zonas de tráfico, garajes y áreas industriales con refinerías. Por otro lado, la contaminación en el ambiente interior tiene diferentes orígenes. Las condiciones de vida y las actividades de los ocupantes son fuentes de VOC, como, por ejemplo, limpiar, fumar, cocinar, el uso de productos de cuidado personal (desodorantes, perfumes, productos para el cabello...) o el uso de otros productos para el hogar, como ambientadores, velas o la quema de incienso [6-8]. Con la llegada de la mejora del nivel de vida, se empezaron a utilizar más materiales sintéticos y productos químicos en los edificios para la construcción y la decoración de interiores (productos de madera con resinas de urea-formaldehído, adhesivos, pinturas, barnices, muebles), que también emiten este tipo de compuestos. Todas estas fuentes de VOC en interiores, junto con la inadecuada ventilación, hacen que los VOC terminen acumulándose y aumentando su concentración.

Entre las familias químicas más importantes de VOC en los ambientes interiores están los hidrocarburos aromáticos, como los BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos) y los aldehídos. El benceno se emite, fundamentalmente, a partir del tráfico, pero en el interior también a partir de los

materiales de construcción y el mobiliario, pinturas o humo del tabaco [3]. Los aldehídos (particularmente, formaldehído, acetaldehído y acroleína) se usan ampliamente en productos de construcción y mobiliario, y se emiten lentamente al aire interior. El formaldehído es, probablemente, el VOC más importante debido a su prevalencia en los ambientes interiores. Sus principales fuentes son las resinas, como la de fenol-formaldehído o la de urea-formaldehído, utilizadas en materiales aislantes y productos de madera, como los contrachapados y aglomerados [9]. Por otro lado, el formaldehído también puede producirse en procesos de combustión durante el funcionamiento de estufas y chimeneas, al fumar, quemar incienso o encender velas [10]. La acroleína se genera al calentar el aceite por encima de 180 °C durante el cocinado, a partir del humo del tabaco, o por la proximidad a las emisiones vehiculares [11]. Sin embargo, se considera un compuesto de baja prioridad en entornos residenciales [9]. Los terpenos (α -pineno y limoneno) se usan en los productos de limpieza, perfumes y desodorantes como aromatizantes y pueden evaporarse durante su uso. Son importantes porque pueden reaccionar con oxidantes atmosféricos como el ozono y dar lugar a otros contaminantes más perjudiciales, incluyendo aerosoles orgánicos secundarios [12].

Para más detalles sobre las fuentes de emisión de los distintos VOC puede consultarse la revisión bibliográfica realizada recientemente por Vera *et al.* [13], donde se describen las fuentes, las concentraciones típicas en distintos ambientes interiores y los valores guía de unos 100 VOC identificados en aire interior.

5.1.2. Efectos sobre la salud y valores guía

Según la OMS, respirar aire limpio se considera un requisito fundamental para la salud humana y el bienestar [14]. Los efectos sobre la salud están a menudo relacionados con múltiples exposiciones y contaminantes, y pueden tener lugar puntualmente en el tiempo o a lo largo de la vida, por lo que es muy importante su prevención en las etapas críticas del desarrollo de los seres humanos. Se trata de un tema complejo en términos de toxicología y evaluación del riesgo para la salud, debido a la gran cantidad de tipos de contaminantes y sus posibles efectos combinados.

En general, los efectos de los VOC comprenden desde un alto grado de toxicidad hasta efectos leves o desapercibidos, dependiendo de la naturaleza de cada compuesto y del grado y período de exposición. Los efectos atribuibles a corto plazo pueden causar la irritación de los ojos y las vías respiratorias, dolor de cabeza, mareo, fatiga, reacciones alérgicas y náuseas. Sin embargo, exposiciones a largo plazo pueden causar lesiones del hígado, daño renal y el sistema nervioso central [15, 16]. Según la Agencia Internacional

para la Investigación del Cáncer (IARC), algunos VOC son cancerígenos, o sospechosos de serlo, para el ser humano. El benceno, el tricloroetileno y el formaldehído están clasificados como agentes cancerígenos; el tetracloroetileno, como probable carcinógeno, y el estireno, etilbenceno y tetracloruro de carbono, como posibles carcinógenos. Sin embargo, la IARC no considera carcinógenos para el ser humano el tolueno y los xilenos [17].

Como muestra de la creciente preocupación acerca de los efectos que sobre la salud tienen los contaminantes del aire interior, la OMS tiene informes específicos sobre la materia. En 2010 publicó la primera guía de calidad del aire interior [3] para determinados contaminantes (benceno, monóxido de carbono, formaldehído, naftaleno, dióxido de nitrógeno, benzo(a)pireno, radón, tricloroetileno y tetracloroetileno). En el caso del benceno, no hay un valor seguro de exposición que pueda ser recomendado según la OMS, por lo que es conveniente reducir los niveles de exposición interior lo máximo posible. Una exposición a $1 \mu\text{g m}^{-3}$ produce un incremento del riesgo cancerígeno para el caso de leucemia de $6 \cdot 10^{-6}$, es decir, de seis casos adicionales de leucemia por cada millón de habitantes (WHO, 2010). Lo mismo sucede para el tricloroetileno, para el cual no puede determinarse ningún nivel umbral, ya que todas las exposiciones en el interior se consideran perjudiciales para la salud. Así, la concentración asociada con un exceso de riesgo de cáncer de 10^{-6} es de $2,3 \mu\text{g m}^{-3}$. En el caso del tetracloroetileno, en la evaluación global de los riesgos de la salud, se estableció un valor guía de $0,25 \text{ mg m}^{-3}$ para una exposición de un año. Respecto al formaldehído, para evitar efectos irritantes en la población general, la OMS recomienda un valor guía de $100 \mu\text{g m}^{-3}$ medido como promedio de 30 minutos, sin distinguir entre el aire interior y exterior. Este valor guía, establecido a corto plazo, también previene los efectos adversos sobre la función pulmonar, así como los efectos a largo plazo, incluyendo cáncer nasofaríngeo y leucemia mieloiide [3]. Otros organismos internacionales han establecido sus propios valores guía para formaldehído, como Health Canada, que establece un valor de $123 \mu\text{g m}^{-3}$ como promedio de 1 h o $50 \mu\text{g m}^{-3}$ como promedio de 8 h [18], mientras que la Agencia Francesa de Seguridad Alimentaria, Medioambiental y Laboral establece un valor de $50 \mu\text{g m}^{-3}$ como promedio de 2 h y $10 \mu\text{g m}^{-3}$ para una exposición a largo plazo [19]. Por otra parte, el Departamento de Salud Pública de Inglaterra ha establecido un valor guía de $10 \mu\text{g m}^{-3}$ como promedio anual [20].

5.2. Métodos para la determinación de VOC en ambientes interiores

Para poder medir las concentraciones de VOC, por lo general muy pequeñas, existen diferentes técnicas de captación y análisis. Las técnicas de muestreo y análisis pueden dividirse en técnicas *offline* y técnicas *online*, también llamadas técnicas continuas o en tiempo real. En las técnicas *offline*, el muestreo se realiza en un determinado lugar con captadores pasivos (muestreo por difusión) o activos (muestreo por aspiración mediante una bomba de muestreo) rellenos de un determinado adsorbente y, posteriormente, el análisis se realiza en el laboratorio. Normalmente, las concentraciones de VOC determinadas con estas técnicas suelen darse como promedio de varias horas o días o incluso una semana. En el caso de las técnicas *online*, el muestreo y el análisis se realizan en el mismo lugar con un mismo equipo y proporcionan una elevada resolución temporal al poder seguir la evolución de los contaminantes cada pocos minutos. Ambas metodologías presentan ventajas e inconvenientes relacionados con los costes, suministro eléctrico, facilidad de manejo, etc. Dependiendo del objetivo del muestreo se elige un tipo de técnica u otra [13]. En la figura 5.1 se muestran dos tipos de captadores de VOC.



Figura 5.1. a) captador pasivo Radiello®, que consta de un cuerpo difusor azul en cuyo interior se encuentra el cartucho relleno de un adsorbente; b) captador activo SKC, relleno de dos secciones de carbón activo y conectado a una bomba de muestreo y un calibrador para determinar el flujo de muestra.

Entre los métodos normalizados para preparar una campaña de muestreo en aire interior y determinar las concentraciones de VOC, destaca la serie de normas ISO 16000:

- ISO 16000-1:2004. Indoor air. Parte 1: Aspectos generales de la estrategia de muestreo.

- ISO 16000-2:2004. Indoor air. Parte 2: Estrategia de muestreo para formaldehído.
- ISO 16000-3:2011. Indoor air. Parte 3: Determinación de formaldehído y otros compuestos carbonílicos en aire interior y cámaras de ensayo- método de muestreo activo.
- ISO 16000-4:2011. Indoor air. Parte 4. Determinación de formaldehído – Método de muestreo difusivo.
- ISO 16000-5:2007. Indoor air. Parte 5. Estrategia de muestreo para compuestos orgánicos volátiles.
- ISO 16000-6:2011. Indoor air. Parte 6: Determinación de compuestos orgánicos volátiles en aire de interiores y de cámaras de ensayo mediante muestreo activo y adsorbente Tenax TA®, desorción térmica y cromatografía de gases, empleando MS o MS-FID.
- ISO 16000-33:2017. Indoor air. Parte 33. Determinación de ftalatos con cromatografía de gases/espectrometría de masas (GC/MS).
- ISO 16017-1:2000. Aire de interiores, ambiente y ocupacional. Muestreo y análisis de compuestos orgánicos volátiles por tubo adsorbente/desorción térmica/cromatografía de gases capilar. Parte 1: Muestreo por aspiración.
- ISO 16017-2:2003. Aire de interiores, ambiente y ocupacional. Muestreo y análisis de compuestos orgánicos volátiles por tubo adsorbente/desorción térmica/cromatografía de gases capilar. Parte 2: Muestreo por difusión.

Otras normas europeas, como la EN 14662-5:2006 [21] o la EN 14662-2:2006 [22], describen métodos normalizados para la medida de las concentraciones de benceno en aire ambiente empleando desorción química con captadores pasivos o activos, respectivamente. En estas normas se emplea carbón activo como adsorbente que, aunque es específica para aire exterior, puede usarse también para aire interior. La metodología descrita en estas normas puede usarse también para determinar otros VOC.

5.3. Concentraciones de VOC en ambientes interiores y evaluación de su origen

La concentración de VOC en ambientes interiores depende de las fuentes de emisión, el número de ocupantes y las actividades que realizan, así como de otros factores como la temperatura, la ventilación y la humedad relativa [23]. Las investigaciones sobre la calidad del aire interior se han centrado en la identificación y determinación de los niveles de VOC, sus fuentes y su química para poder caracterizar los ambientes interiores con el objetivo de reducir las fuentes de emisión y, por tanto, la exposición a dichos VOC. Diferen-

tes proyectos de investigación internacionales han evaluado las concentraciones de los contaminantes más importantes, incluidos algunos VOC, en distintos edificios. Por ejemplo, en el proyecto SINPHONIE se midió la IAQ de 114 colegios de 23 países de Europa [24]. Entre los VOC medidos estaban: formaldehído, benceno, naftaleno, limoneno, tricloroetileno y tetracloroetileno. Los resultados de este proyecto destacaron la importancia de la IAQ en los colegios como un problema social con claros impactos en la salud, calidad de vida y en el rendimiento del aprendizaje de los escolares de Europa. En el proyecto europeo OFFICAIR se evaluó la calidad del aire de 140 oficinas, y se observó que las impresoras láser y las fotocopiadoras eran una fuente significativa de formaldehído. Se encontró, además, una relación entre los aldehídos y otros VOC emitidos a partir del mobiliario y los materiales de construcción [25]. En 2018, en el proyecto HOMEChem, realizado en Estados Unidos, se llevó a cabo una campaña de aire interior en una casa donde los investigadores simulaban a diario las distintas actividades típicas del hogar como limpiar, cocinar, ventilar, etc. [26]. El objetivo era conocer cómo las actividades cotidianas influyen en las emisiones, las transformaciones químicas y en la eliminación de gases traza y partículas en el aire interior. Se observó que durante los periodos de no ocupación de la vivienda la concentración de muchos VOC era superior a la del exterior, lo cual se relacionó con las emisiones procedentes de los materiales empleados en la vivienda, que son fuentes de estos compuestos. El uso de lejía generó grandes cantidades de compuestos clorados en el aire, mientras que los productos de limpieza emitieron, fundamentalmente, terpenos (sustancias químicas naturales). Los experimentos realizados durante la ocupación de la vivienda mostraron la emisión de grandes cantidades de siloxanos (siliconas volátiles), empleados en los productos de cuidado personal. Finalmente, a partir de los resultados, se simulaban las emisiones de VOC durante un período hipotético de 24 horas, lo que demostró que las emisiones de la casa y su contenido representaban casi la mitad de las emisiones totales de VOC en interiores. Respecto al análisis de los resultados, los investigadores utilizan distintas herramientas estadísticas para la determinación de las fuentes de emisión. Debido a que un ambiente interior también está influenciado por el aire exterior se utiliza generalmente la relación I/O (interior/exterior) para inferir la penetración de los contaminantes en los ambientes interiores y fuentes de interior. Por ello, es imprescindible que en las campañas de muestreo se realice un muestreo simultáneo dentro y fuera de un edificio. Una relación $I/O < 2$ indica que la calidad del aire exterior determina la calidad del aire en interior y un $I/O > 2$ indica que las fuentes de emisión endógenas son responsables de la calidad del aire interior [27]. Además, para identificar más específicamente las fuentes de los contaminantes en interiores se llevan a cabo métodos estadísticos como el análisis de componentes principales (PCA) o el análisis de regresión

lineal múltiple basado en las respuestas a los cuestionarios sobre caracterización de un ambiente interior. Las correlaciones entre los contaminantes también sirven para determinar si tienen un origen común.

A continuación, se analizan las concentraciones de VOC y sus fuentes en algunos de los ambientes interiores más representativos.

5.3.1. Viviendas

En España, las investigaciones realizadas en los ambientes interiores respecto a los VOC son escasas. En un estudio realizado en 22 viviendas de Puertollano, la ciudad más industrializada del centro de la Península Ibérica, se analizaron 29 VOC [28]). El formaldehído fue el aldehído más abundante con un rango de concentración entre 15 y 175 $\mu\text{g m}^{-3}$. Otros VOC como el dodecano y los terpenos (α -pineno y limoneno) fueron los compuestos con concentraciones medias más altas (24, 19 y 17 $\mu\text{g m}^{-3}$, respectivamente). La concentración promedio de benceno (cancerígeno) en interior fue de 1,5 $\mu\text{g m}^{-3}$. Se demostró que la mayor parte de los VOC determinados (especialmente, limoneno, α -pineno, hexanal, formaldehído, pentanal, acetaldehído, o-xileno, dodecano y acetona) procedían de fuentes interiores. Como se comentó anteriormente, el limoneno es ampliamente utilizado en productos de limpieza debido a su olor agradable y el α -pineno se emite por los productos a base de madera en pinturas, disolventes y aromatizantes. Solo los compuestos pentano, hexano y benceno se originaron en el exterior, ya que están asociados a las emisiones de los vehículos.

Por lo general, las concentraciones de aldehídos encontradas en los ambientes interiores tienen su origen en fuentes internas como también se demostró en un estudio realizado en los salones y dormitorios de 25 pisos compartidos de estudiantes en Ciudad Real [29]. En este estudio, de nuevo el formaldehído fue el aldehído más abundante con rangos de concentración mayores en los dormitorios (19-76 $\mu\text{g m}^{-3}$) que en los salones (9-56 $\mu\text{g m}^{-3}$). Estos niveles de concentración de formaldehído fueron mayores que los encontrados en los dormitorios (11-48 $\mu\text{g m}^{-3}$) y salones (10-37 $\mu\text{g m}^{-3}$) en casas de Tarragona [30], pero menores que los registrados en la zona industrial de Puertollano anteriormente mencionada [28]. En este estudio realizado en Puertollano, se encontró que, para la mayoría de los compuestos carbonílicos, cuanto más antiguo era el mobiliario, las concentraciones eran menores. Este resultado es lógico teniendo en cuenta que cuanto más nuevo es un mueble, mayor es la tasa de emisión de contaminantes, la cual va decayendo con el tiempo. La presencia de alfombras afectó a la concentración de interior de tolueno y las concentraciones de benceno en el interior también se relacionaron con el humo del tabaco [28]. Para el caso de las viviendas de estudiantes, los resultados del análisis de regresión lineal múltiple muestra-

ron que acetona, crotonaldehído, benzaldehído, propionaldehído e isovealdehído estaban relacionados con el humo del tabaco mientras que la concentración de acroleína se asoció con la antigüedad de los muebles. Las mayores concentraciones de formaldehído fueron encontradas en los salones con suelos de madera [29].

5.3.2. Centros de Educación Infantil y Primaria

La exposición de los niños a los contaminantes químicos en los colegios y guarderías es de suma importancia, ya que pasan entre cinco y siete horas diarias en estos ambientes. Los niños son más vulnerables a los contaminantes que los adultos debido a que su tasa de respiración es mayor en relación a su masa corporal y sus órganos y sistema inmune aún están en desarrollo. La oficina regional de la OMS en Europa, a través de un grupo de expertos, realizó una revisión de la bibliografía cuyo resultado fue la identificación de los contaminantes químicos más comunes (57 en total) del aire interior en escuelas y guarderías. Posteriormente, desarrollaron una herramienta de cribado para la evaluación de los riesgos en la salud de la exposición combinada a múltiples sustancias químicas. Esta herramienta está a disposición de todos los Estados miembros que deseen evaluar la exposición de los niños en estos entornos [31].

En 2013 se llevó a cabo un estudio en 18 colegios de España situados en la provincia de Ciudad Real. Seis colegios estaban situados en el área urbana de Ciudad Real, seis colegios en el área industrial de Puertollano y seis colegios en zonas rurales [32]. Se analizaron 32 VOC en total, observándose que los contaminantes más abundantes fueron de nuevo formaldehído y hexanal. La concentración máxima medida de formaldehído fue de $66 \mu\text{g m}^{-3}$ en el área urbana; sin embargo, el valor más alto de formaldehído medido como valor promedio se encontró en las zonas rurales. Así, se puede volver a destacar que las principales fuentes de formaldehído se encuentran en el interior. Otros compuestos como el benceno presentaron una concentración mayor en los colegios del área industrial que en los de las zonas urbanas y rurales, lo que reflejó la clara contribución al aire interior de la zona industrial (complejo petroquímico). Sin embargo, las concentraciones de benceno estuvieron por debajo de $1 \mu\text{g m}^{-3}$, excepto en un aula de infantil con un valor de $2 \mu\text{g m}^{-3}$. En el estudio de las fuentes de emisión empleando PCA se determinó que las concentraciones de carbonilos y α -pineno procedían de los muebles de madera y contrachapado. Los alcanos desde el nonano al dodecano y acetona+acroleína se asociaron con el uso de pizarras de tiza y pizarras blancas. El hexano, heptano y ciclohexano se relacionaron con el uso de baldosas de cerámica, mientras que el pentano, tridecano, benceno, etilbenceno y m,p-xileno fueron asociados con emisiones del tráfico. El limoneno y el p-tolualdehído se asociaron con los productos de limpieza y ambien-

tadores. El limoneno también se asoció a las pizarras blancas. Estos resultados indican la presencia de diferentes fuentes para un mismo compuesto. Por último, 1,2,4-trimetilbenceno y benzaldehído se asociaron con el revestimiento de muebles.

En un estudio realizado en colegios portugueses, las concentraciones de formaldehído fueron mayores que las encontradas en los colegios de Ciudad Real, con rangos de concentración de 8-127 $\mu\text{g m}^{-3}$ [33]. En ocho colegios de Italia situados en áreas de alta contaminación, se analizaron las concentraciones de benceno, tolueno, etilbenceno y xileno durante invierno y verano, registrando concentraciones máximas en invierno de 5, 15, 6 y 13 $\mu\text{g m}^{-3}$, mientras que en verano fueron de 11, 15, 10 y 14 $\mu\text{g m}^{-3}$, respectivamente [34]. En este estudio las concentraciones fueron mucho mayores que las determinadas en los colegios de Ciudad Real [32]. Luciali *et al.* [34] determinaron que el uso de productos como pinturas y tintas para las clases de dibujo eran responsables de la emisión de etilbenceno y xileno.

5.3.3. Centros deportivos

Los pabellones deportivos también son ambientes interiores donde niños y adolescentes pasan mucho tiempo. Bralewska *et al.* [35] determinaron la concentración de contaminantes gaseosos inorgánicos y VOC de un polideportivo en Polonia. Las concentraciones medias de 20 VOC (129-193 $\mu\text{g m}^{-3}$) fueron más bajas en el interior que en el exterior. También en gimnasios se han evaluado los niveles de VOC y carbonilos [36]. La acroleína fue el aldehído más abundante con concentraciones por encima de los valores guía recomendados. Esto también ocurrió en el estudio de Villanueva *et al.* [29] en las viviendas de estudiantes de Ciudad Real. Por otro lado, la concentración media de formaldehído, 6 $\mu\text{g m}^{-3}$, fue más baja que los niveles comúnmente encontrados en ambientes interiores. La concentración total de los VOC estudiados alcanzaron niveles máximos que coincidieron con las actividades de limpieza.

En el interior de un gimnasio en León (España), la relación I/O para acetona fue de 7, indicando la presencia de fuentes interiores para este compuesto, mientras que esta relación (I/O) para otros VOC como hexano, benceno y heptano estuvo en torno a 1, indicando que estos compuestos tenían su origen en el exterior [36]. En general, para los compuestos carbonílicos estudiados por Alves *et al.* [36], el rango de I/O osciló entre 1,5 y 5, lo que indicó la presencia de fuentes interiores [36]. En un polideportivo en Polonia [35], las relaciones I/O de tolueno, m/p-xileno, benzaldehído y nonanal fueron mayores que 1, indicando también fuentes de interior. La presencia de VOC y carbonilos en los centros deportivos se debe al equipamiento deportivo, incluyendo equipos de goma (pelotas y colchones), plásticos, pinturas, barnices, elementos estructurales del edificio, procesos relacionados con su mantenimiento y,

en mayor medida, las actividades de limpieza [36]. Sin embargo, estos centros deportivos también están influenciados por fuentes de exterior como las emisiones del tráfico de las carreteras cercanas y las emisiones de chimeneas bajas en las proximidades del centro durante la temporada de calefacción [35].

5.3.4. Peluquerías

Un tipo de ambiente interior donde se han encontrado elevadas concentraciones de VOC son las peluquerías. El objetivo del estudio de Kaikiti *et al.* [37] fue analizar el aire interior de cinco peluquerías en Limassol (Chipre) para evaluar la IAQ de la exposición laboral e identificar los principales VOC generados o las actividades responsables de la contaminación interior. Más de 50 VOC fueron identificados y 14 fueron cuantificados. Los hidrocarburos aromáticos como tolueno, benceno, etilbenceno y xilenos fueron los mayores contaminantes, seguido de alcanos, terpenos y alcoholes. El VOC más abundante fue el tolueno, seguido de el xileno, etilbenceno y benceno con concentraciones medias de 947, 79-372 (concentración de isómeros de xilenos), 88 y 98 $\mu\text{g m}^{-3}$, respectivamente. En peluquerías de Atenas (Grecia) también se encontraron altos niveles de tolueno y xilenos [38]. En una peluquería en León (España), también se encontraron estos compuestos, pero sus concentraciones fueron mucho más bajas que en los estudios anteriores ya comentados: tolueno (3.2-6.6 $\mu\text{g m}^{-3}$), benceno (1.3-2.1 $\mu\text{g m}^{-3}$), etilbenceno (1.3-2.2 $\mu\text{g m}^{-3}$), m,p-xileno (2.6-6.3 $\mu\text{g m}^{-3}$) y o-xileno (1.3-2.6 $\mu\text{g m}^{-3}$). Aldehídos como el formaldehído y el acetaldehído fueron identificados y presentaron niveles de concentración más altos que los BTEX, con concentraciones medias de 11.5 y 8.96 $\mu\text{g m}^{-3}$, respectivamente. En otras peluquerías en Montreal (Canadá), los niveles de formaldehído fueron mayores (27 $\mu\text{g m}^{-3}$), al igual que los encontrados en salones de esmaltado de uñas en Colorado (EE.UU), con un rango de concentración de formaldehído entre 5.32 y 20.6 $\mu\text{g m}^{-3}$ [39, 40]. Algunos estudios realizados en peluquerías han demostrado que los niveles de BTEX pueden ser de 2 a 20 veces más altos que los encontrados en el exterior, destacando la importancia de las fuentes interiores de estos compuestos [41].

Las altas concentraciones de tolueno y xileno se deben al amplio uso de productos de limpieza y lacas para el pelo. Además, los tratamientos capilares junto con los productos químicos empleados contribuyen en diferentes niveles a la emisión de los contaminantes volátiles en el interior [37, 41]. Los niveles de formaldehído se asocian con el uso de productos profesionales para alisar el cabello [42]. También hay que tener en cuenta que los niveles de BTEX medidos dentro del salón no reflejan las emisiones procedentes únicamente del uso de productos cosméticos. Muchos compuestos pueden proceder de la ropa de los clientes, así como ser emitidos por los materiales de construcción y el mobiliario, además de las emisiones del tráfico.

5.4. Conclusiones

Pasamos la mayor parte de nuestro tiempo en ambientes interiores, por tanto, la mayor exposición a sustancias químicas ocurre cuando estamos dentro de los edificios. Reducir la contaminación exterior permite mejorar la calidad del aire interior, pero, como se ha visto en este capítulo, también existen fuentes interiores de contaminación asociadas a los materiales de construcción, productos de limpieza, mobiliario, productos de uso personal, etc. La determinación precisa de las concentraciones de VOC en los ambientes interiores es un parámetro fundamental para la salud humana. Conocer las concentraciones permite implementar estrategias de mitigación o prevención que reduzcan los niveles de exposición a estos contaminantes. La prevención debe usarse como el principal enfoque para mejorar la calidad de vida de las personas; por ello, reducir las fuentes de emisión de VOC (por ejemplo, con el uso responsable de ambientadores, productos de limpieza, incienso, etc.) y proporcionar una ventilación adecuada y diaria en aquellos lugares donde no existe ventilación mecánica (viviendas, colegios, etc.) son dos factores fundamentales que hay que tener en cuenta.

En Villanueva *et al.* [28] se evaluó el riesgo de cáncer a lo largo de la vida asociado a la exposición a formaldehído, acetaldehído y benceno en los hogares de Puertollano. En el caso del formaldehído, no se superó el valor promedio de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En los pisos de estudiantes en Ciudad Real, de entre todos los carbonilos, donde las concentraciones cuantificadas fueron comparadas con guías internacionales, solo la concentración media de acroleína superó el valor de referencia de $0.35 \mu\text{g m}^{-3}$ [29]. En el caso de los colegios evaluados en la provincia de Ciudad Real tampoco se superaron los valores guía establecidos por la OMS [32].

Sin embargo, es necesario determinar el riesgo en la salud a partir de la exposición combinada en múltiples sustancias químicas simultáneamente, y no de manera individual, como se ha estado realizando. De esta manera tendremos una visión más real del riesgo que sobre la salud tienen la gran cantidad de sustancias químicas que respiramos cada día.

Referencias

- [1] D. Rodríguez y E. Jiménez, «Material particulado y ozono en espacios interiores», en J. Fernández-Agüera, M. Á. Campano y J. J. Sendra (eds.), *Calidad del aire interior en los edificios para el bienestar: estrategias de aplicación práctica*. Barcelona, Octaedro, 2023, p. 180.
- [2] W. R. O. for Europe, *Review of evidence on health aspects of air pollution: REVIHAAP project: technical report*, 2013. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/341712>

- [3] D. Penney, V. Benignus, S. Kephelopoulos, D. Kotzias, M. Kleinman, Agnes Verrier y A. Verrier, *WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants.*, vol. 9. Copenhagen, Dinamarca: World Health Organization Regional Office for Europe, 2010. doi: 10.1186/2041-1480-2-S2-11.
- [4] World Health Organization. Regional Office for Europe, *Methods for sampling and analysis of chemical pollutants in indoor air: supplementary publication to the screening tool for assessment of health risks from combined exposure to multiple chemicals in indoor air in public settings for children.* World Health Organization. Regional Office for Europe, 2020. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/334389>
- [5] Ministerio de la Presidencia del Gobierno de España, «Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios», BOE n.º 207, 2007, Madrid, Ministerio de la Presidencia del Gobierno de España, 2021, p. 97. <https://www.boe.es/buscar/pdf/2007/BOE-A-2007-15820-consolidado.pdf>
- [6] B. Clarisse, A. M. Laurent, N. Seta, Y. Le Moullec, A. El Hasnaoui y I. Momas, «Indoor aldehydes: measurement of contamination levels and identification of their determinants in Paris dwellings», *Environ. Res.*, vol. 92, n.º 3, pp. 245-253, doi: 10.1016/S0013-9351(03)00039-2.
- [7] B. Zabiegała, «Organic compounds in indoor environments», *Polish J. Environ. Stud.*, vol. 15, n.º 3, pp. 383-393, 2006.
- [8] F. A. Esteve-Turrillas, A. Pastor y M. de la Guardia, «Assessing air quality inside vehicles and at filling stations by monitoring benzene, toluene, ethylbenzene and xylenes with the use of semipermeable devices», *Anal. Chim. Acta*, vol. 593, n.º 1, pp. 108-116, 2007, doi: 10.1016/J.ACA.2007.04.055.
- [9] IAQM, *Indoor air quality guidance: assessment, monitoring, modelling and mitigation*, p. 63, 2021, https://iaqm.co.uk/wp-content/uploads/2013/02/iaqm_indoorairquality.pdf
- [10] W.-T. Tsai, «An overview of health hazards of volatile organic compounds regulated as indoor air pollutants», *Rev. Environ. Health*, vol. 34, n.º 1, pp. 81-89, 2018, doi: 10.1515/reveh-2018-0046.
- [11] R. Golden y S. Holm, «Indoor air quality and asthma: has unrecognized exposure to acrolein confounded results of previous studies?», *Dose-Response*, vol. 15, n.º 1, 2017, doi: 10.1177/1559325817691159.
- [12] C. Shrubsole, S. Dimitroulopoulou, K. Foxall, B. Gadeberg y A. Doutsis, «IAQ guidelines for selected volatile organic compounds (VOCs) in the UK», *Build. Environ.*, vol. 165, p. 106382, 2019, doi: 10.1016/J.BUILD-ENV.2019.106382.
- [13] T. Vera, F. Villanueva, L. Wimmerová y E. I. Tolis, «An overview of methodologies for the determination of volatile organic compounds in indoor air», *Appl. Spectrosc. Rev.*, vol. 27, n.º 8, pp. 625-674, 2022, doi: 10.1080/05704928.2022.2085735.

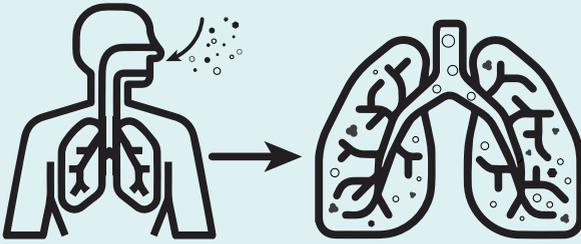
- [14] WHO, *Air quality guidelines for Europe*. Copenhagen, Dinamarca, WHO Regional Office for Europe, 2001. <https://www.who.int/publications/item/9789289013581>
- [15] F. Ahmed, S. Hossain, S. Hossain, A. N. M. Fakhruddin, A. T. M. Abdullah, M. A. Z. Chowdhury y S. H. Gan, «Impact of household air pollution on human health: source identification and systematic management approach», *SN Appl. Sci.*, vol. 1, n.º 5, pp. 1-19, 2019, doi: 10.1007/s42452-019-0405-8.
- [16] V. van Tran, D. Park e Y. C. Lee, «Indoor air pollution, related human diseases, and recent trends in the control and improvement of indoor air quality», *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 17, n.º 8, 2020, doi: 10.3390/ijerph17082927.
- [17] International Agency for Research on Cancer, *Agents classified by the IARC monographs* (vols. 1-130), 2022. <https://monographs.iarc.who.int/list-of-classifications>
- [18] Health Canada (Government of Canada), *Residencial indoor air quality guideline: formaldehyde*. Government of Canada, 2006. <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/publications/healthy-living/residential-indoor-air-quality-guideline-formaldehyde.html>
- [19] ANSES, *Indoor air quality guidelines (IAQGs)*, Cedex, Francia, 2018. <https://www.anses.fr/en/content/indoor-air-quality-guidelines-iaqgs>
- [20] PHE, *Indoor air quality guidelines for selected volatile organic compounds (VOCs) in the UK*. Londres (Reino Unido), Public Health England, 2019. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/831319/VO__statement_Final_12092019_CS__1_.pdf
- [21] AENOR, *UNE-EN 14662-5:2006. Calidad del aire ambiente. Método normalizado de medida de las concentraciones de benceno. Parte 5: muestreo difusivo seguido de desorción por disolventes y cromatografía de gases*. Madrid, AENOR, 2006.
- [22] AENOR, *UNE-EN 14662-2:2006. Calidad del aire ambiente. Método normalizado de medida de las concentraciones de benceno. Parte 2: muestreo por aspiración seguido de desorción por disolvente y cromatografía de gases*. Madrid, AENOR, 2006. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0035276>
- [23] P. Markowicz y L. Larsson, «Influence of relative humidity on VOC concentrations in indoor air», *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 22, pp. 5772-5779, 2015, doi: 10.1007/s11356-014-3678-x.
- [24] E. Csobod, I. Annesi-Maesano, P. Carrer, S. Kephelopoulou, *et al.*, *SINPHONIE. Schools indoor pollution and health observatory network in Europe. Final report*, Luxemburgo, Publications Office of the European Union, 2014. doi: 10.2788/99220.

- [25] A. Spinazzè, D. Campagnolo, A. Cattaneo, P. Urso *et al.*, «Indoor gaseous air pollutants determinants in office buildings. The OFFICAIR project», *Indoor Air*, vol. 30, n.º 1, pp. 76-87, 2019, doi: 10.1111/ina.12609.
- [26] C. Arata, P. K. Misztal, Y. Tian, D. M. Lunderberg, K. Kristensen, A. Novoselac, M. E. Vance, D. K. Farmer, W. W. Nazaroff y A. H. Goldstein, «Volatile organic compound emissions during HOMEChem», *Indoor Air*, vol. 31, n.º 6, pp. 2099-2117, 2021, doi: 10.1111/ina.12906.
- [27] O. Geiss, G. Giannopoulos, S. Tirendi, J. Barrero-Moreno, B. R. Larsen y D. Kotzias, «The AIRMEX study. VOC measurements in public buildings and schools/kindergartens in eleven European cities: statistical analysis of the data», *Atmos. Environ.*, vol. 45, n.º 22, pp. 3676-3684, 2011, doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.04.037.
- [28] F. Villanueva, A. Tapia, M. Amo-Salas, A. Notario, B. Cabañas y E. Martínez, «Levels and sources of volatile organic compounds including carbonyls in indoor air of homes of Puertollano, the most industrialized city in central Iberian Peninsula. Estimation of health risk», *Int. J. Hyg. Environ. Health*, vol. 218, n.º 6, pp. 522-534, 2015, doi: 10.1016/j.ijheh.2015.05.004.
- [29] F. Villanueva, S. Lara, A. Notario, M. Amo-Salas y B. Cabañas, «Formaldehyde, acrolein and other carbonyls in dwellings of university students. Levels and source characterization», *Chemosphere*, vol. 288, 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.132429.
- [30] J. Rovira, N. Roig, M. Nadal, M. Schuhmacher y J. L. Domingo, «Human health risks of formaldehyde indoor levels: An issue of concern», *J. Environ. Sci. Heal.* vol. 51, n.º 4, pp. 357-363, 2016, doi: 10.1080/10934529.2015.1109411.
- [31] WHO European Centre for Environment and Health, *A screening tool for assessment of health risks from combined exposure to multiple chemicals in indoor air in public settings for children: methodological approach*. World Health Organization. Regional Office for Europe, 2021. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/341708>
- [32] F. Villanueva, A. Tapia, S. Lara y M. Amo-Salas, «Indoor and outdoor air concentrations of volatile organic compounds and NO₂ in schools of urban, industrial and rural areas in Central-Southern Spain», *Sci. Total Environ.*, vol. 622-623, pp. 222-235, 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.274.
- [33] J. Madureira, I. Paciência, J. Rufo, E. Ramos, H. Barros, J. P. Teixeira y E. de Oliveira Fernandes, «Indoor air quality in schools and its relationship with children's respiratory symptoms», *Atmos. Environ.*, vol. 118, pp. 145-156, 2015, doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.07.028.
- [34] P. Luciali, S. Marinello, E. Pollini, M. Scaringi, S. Z. Sajani, S. Marchesi y L. Cori, «Indoor and outdoor concentrations of benzene, toluene,

- ethylbenzene and xylene in some Italian schools evaluation of areas with different air pollution», *Atmos. Pollut. Res.*, vol. 11, n.º 11, pp. 1998-2010, 2020, doi: 10.1016/j.apr.2020.08.007.
- [35] K. Bralewska, W. Rogula-Kozłowska y A. Bralewski, «Indoor air quality in sports center: assessment of gaseous pollutants», *Build. Environ.*, vol. 208, 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108589.
- [36] C. A. Alves, A. I. Calvo, A. Castro, R. Fraile, M. Evtyugina y E. F. Bate-Epey, «Indoor air quality in two university sports facilities», *Aerosol Air Qual. Res.*, vol. 13, n.º 6, pp. 1723-1730, 2013, doi: 10.4209/aaqr.2013.02.0045.
- [37] C. Kaikiti, M. Stylianou y A. Agapiou, «TD-GC/MS analysis of indoor air pollutants (VOCs, PM) in hair salons», *Chemosphere*, vol. 294, p. 133691, 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.133691.
- [38] A. Tsigonia, A. Lagoudi, S. Chandrinou, A. Linos, N. Evlogias y E. C. Alexopoulos, «Indoor air in beauty salons and occupational health exposure of cosmetologists to chemical substances», *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 7, n.º 1, pp. 314-324, 2010, doi: 10.3390/ijerph7010314.
- [39] F. Labrèche, J. Forest, M. Trottier, M. Lalonde y R. Simard, «Characterization of chemical exposures in hairdressing salons», *Appl. Occup. Environ. Hyg.*, vol. 18, n.º 12, pp. 1014-1021, 2003, doi: 10.1080/10473220390244667.
- [40] A. Lamplugh, M. Harries, F. Xiang, J. Trinh, A. Hecobian y L. D. Montoya, «Occupational exposure to volatile organic compounds and health risks in Colorado nail salons», *Environ. Pollut.*, vol. 249, pp. 518-526, 2019, doi: 10.1016/j.envpol.2019.03.086.
- [41] M. Evtyugina, E. D. Vicente, A. M. Vicente, T. Nunes, F. Lucarelli, G. Calzolari, S. Nava, C. Blanco-Alegre, A. I. Calvo, A. Castro, R. Fraile, F. Oduber, M. Cerqueira y C. A. Alves, «Air quality and particulate matter speciation in a beauty salon and surrounding outdoor environment: Exploratory study», *Atmos. Pollut. Res.*, vol. 12, n.º 11, 2021, doi: 10.1016/j.apr.2021.101174.
- [42] M. A. Aglan y G. N. Mansour, «Hair straightening products and the risk of occupational formaldehyde exposure in hairstylists», *Drug Chem. Toxicol.*, vol. 43, n.º 5, pp. 488-495, 2020, doi: 10.1080/01480545.2018.1508215.

CAPÍTULOS 4 y 5

UN ZOOM A LO QUE RESPIRAMOS



ENTRE OTRAS COSAS RESPIRAMOS:

- MATERIAL PARTICULADO (PM)
 - GRUESO (PM₁₀)
 - FINO (PM_{2.5})
- OZONO (O₃)
- COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES (COVs)

VALORES LÍMITE
SEGÚN OMS

PM _{2.5}	15 µg/m ³ Media 24h
PM ₁₀	45 µg/m ³ Media 24h
O ₃	100 µg/m ³ Media 8h
COVs	120-1200 ppb Media 8h

MATERIAL PARTICULADO

EJEMPLO DE FUENTES



VENTILACIÓN NATURAL



POLVO DE TIZA



ASMA / BRONQUITIS CRÓNICA



DISFUNCIÓN DEL SISTEMA NERVIOSO CENTRAL

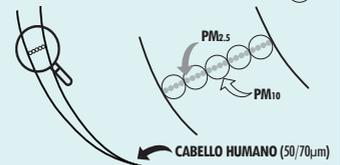


DAÑOS EN SISTEMA CARDIOVASCULAR



DISFUNCIÓN DEL SISTEMA REPRODUCTOR

MATERIAL PARTICULADO FINO PM_{2.5} (<2.5µm) ○
MATERIAL PARTICULADO GRUESO PM₁₀ (2.5µm -10µm) ○



OZONO

EJEMPLO DE FUENTES



FOTOCOPIADORAS



OZONIZADORES / IONIZADORES



IRRITACIÓN DE OJOS



TOS



DOLOR DE CABEZA



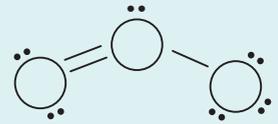
DISMINUCIÓN FUNCIÓN PULMONAR



ENFERMEDAD CARDIOVASCULAR



TUMORES



O₃

COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES

EJEMPLO DE FUENTES



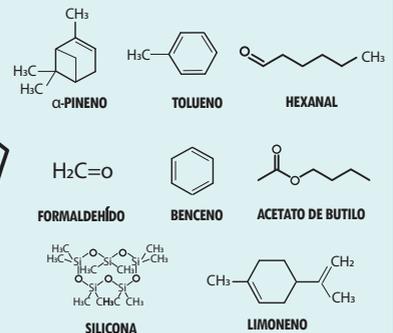
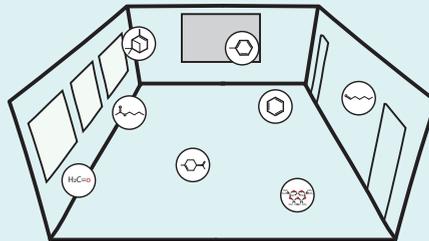
PRODUCTOS DE LIMPIEZA



MASCARILLAS PARA EL PELO



HUMO DE TABACO



Las partículas biológicas en el aire: la atmósfera como vector de las partículas biológicas y su acción sobre los seres vivos

EUGENIO DOMÍNGUEZ-VILCHES

Departamento de Botánica, Ecología y Fisiología Vegetal,
Universidad de Córdoba (UCO), Córdoba, España

JESSICA FERNÁNDEZ-AGÜERA

Escuela Técnica Superior de Arquitectura,
Universidad de Sevilla (US), Sevilla, España

FABIO ORLANDI

MARCO FORNACIARI DA PASSANO

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale,
Università degli Studi di Perugia, Perugia, Italia

Lista de acrónimos

PanAm aerolínea internacional estadounidense (acrónimo en inglés de Pan American World Airways).

6.1. Introducción

Las partículas transportadas por el aire de origen biológico están presentes ahí donde exista actividad biológica. Por tanto, la mayor parte de la superficie de la Tierra se puede considerar como una gran fuente de emisión potencial de material aerobiológico, tanto de origen natural como producido por la actividad humana, entrando este a formar parte, posteriormente, de las atmósferas de exteriores y de interiores.

6.2. Historia de la aerobiología

Las características del aire que respiramos ya se conocían desde hace mucho tiempo; ya en el siglo V a.C., Hipócrates de Kos indicaba que «el hombre podía ser atacado por fiebres epidémicas cuando inhalaba el aire infectado con poluciones hostiles a la raza humana», mientras que Tito Lucrecio Caro, en el siglo I antes de nuestra era, expresaba en su obra de *Rerum Natura* [1] que «las motitas que se mueven en un rayo de luz no son más que átomos invisibles al ojo humano».

Sin embargo, fue en el el siglo XVI, con la invención del microscopio óptico por parte de Anton Van Leeuwenhoek (1632-1723) [2], cuando se pudo comprobar que tanto en el agua como en la atmósfera existían partículas de origen biológico y microorganismos, entre los que se encontraban esporas microscópicas y otros tipos de seres invisibles al ojo humano. Gracias al invento de Leeuwenhoek, De Michelli [3] demostró la presencia de lo que llamó las «semillas de los hongos en el aire». Asimismo, indicó que los hongos no eran ni plantas ni animales, sino un grupo absolutamente aparte, siendo además estas esporas las responsables del desarrollo de las colonias sobre el sustrato; rechazó así la teoría de la generación espontánea de los organismos, vigente hasta ese momento.

Más tarde, cuando Darwin realizaba su viaje alrededor del mundo en el *Beagle*, hizo una serie de experimentos en pleno Océano Atlántico que demostraron que la atmósfera, a través de los vientos, actuaba como medio de transporte para grandes cantidades de microorganismos desde continentes lejanos, y estas se depositaban posteriormente sobre la superficie del mar o sobre las islas oceánicas. Los resultados de los experimentos de Darwin fueron estudiados por C. G. Ehrenberg [4], poseedor de una extensa colección sobre el mundo microscópico que fue publicada en varios artículos en los que demostraba que los vientos alisios podían transportar polen, esporas de hongos y seres microscópicos a miles de kilómetros.

Pero no fue hasta la publicación de Miquel [5] cuando se hizo una descripción exhaustiva de los organismos vivos que se encuentran presentes en la atmósfera, indicando que su contenido variaba enormemente según las horas del día, la estación del año y la altitud. A raíz de aquellos trabajos, Mollish, H. [6] describió lo que denominó *the floating condition of life* (la condición flotante de la vida en el aire), acuñando el término *aeroplancton*.

Trabajos posteriores se centraron en los aspectos médicos de la condición biológica del aire que respiramos, focalizándose en una enfermedad muy poco conocida hasta entonces y mal descrita, denominada *fiebre del heno*. Los médicos, principalmente ingleses, comenzaron a interesarse científicamente sobre el contenido biológico, porque, al parecer y para ellos, la enfermedad se debía a alguna condición del aire que afectaba al aparato respiratorio de los seres vivos, lo que daba lugar a diversos síndromes que, de una forma general, se conocían como *fiebre del heno* o *catarro estival*, pero que

posteriormente se describiría como alergias al polen, principalmente de gramineas, como veremos más adelante.

Ya en el siglo XX, J. Hirst [7], además de acuñar para siempre el término *aerobiología*, que describió como «la disciplina que se encarga del estudio del transporte a través de la atmósfera de los organismos y el material de significado biológico, prestando atención a la fuente de producción de estos organismos y al material que se libera por ellos en la atmósfera, su dispersión y deposición y su impacto en los sistemas vegetales, animales y humanos». Hirst ideó y construyó el primer muestreador volumétrico de polen y esporas (*sporetrap*), que permitió un rápido avance de esta ciencia y su aplicación a otras, como la agricultura, la medicina, la física, la meteorología, etc.

6.3. Metodología aerobiológica

Muchos han sido los métodos y aparatos que se han venido utilizando para analizar el contenido de las partículas biológicas del aire. Desde simples portaobjetos impregnados de vaselina y colocados o en el suelo, o bien elevados a altitud por cometas y otros vehículos aéreos, hasta los tiempos actuales en los que los estudios cualitativos y cuantitativos de las partículas biológicas presentes en la atmósfera se realizan automáticamente mediante robots que se encuentran acoplados a microscopios ópticos de alta resolución [8]. Estos nuevos sistemas permiten un análisis prácticamente instantáneo de las partículas de origen biológico presentes en la atmósfera, así como su utilización en cualquiera de las ciencias mencionadas anteriormente.

6.4. Algunas aplicaciones de la aerobiología

6.4.1. Aeropatología

Una aplicación importante de la aerobiología es la de conocer el contenido de esporas de los hongos patógenos presentes en el aire, que, una vez depositadas sobre las plantas, pueden producir diversos tipos de patologías (siendo algunas muy graves, como en el caso de las plantas cultivadas). La infección por parte de determinados hongos patógenos puede llevar consigo la desaparición total de las cosechas, la no producción de grano (en el caso de los cereales) o incluso la contaminación de este grano con toxinas que pueden producir enfermedades graves en los humanos, como el ergotismo, por ingestión de alimentos preparados a partir de este grano contaminado.

Stakman *et al.* [9] llevaron a cabo experimentos de muestreo de la atmósfera cercana a los cultivos de cereales, viajando en un tren que llevaba insta-

lados dispositivos *sporetrap*. Básicamente, su interés se centraba en la presencia de *Puccinia graminis* –la roya de los cereales– en los campos de cultivo, causante de tremendas pérdidas en los cultivos de estas plantas.

Sus resultados fueron utilizados por Fred Campbell Meier [10], que entendió desde muy pronto la importancia bélica del conocimiento del comportamiento y las vías de dispersión de estas esporas en las capas altas de la atmósfera y su posible utilización como arma biológica. Muchos de los trabajos de Meier fueron subvencionados por los departamentos de Agricultura y de Estado de los Estados Unidos, dado su potencial aplicación en futuros conflictos. El interés de Meier se centraba, sobre todo, en esporas de hongos fitopatógenos, que podían ascender hasta las capas altas de la atmósfera –lo que él llamaba la *vida microbiana del aire superior*– y ser arrastradas a largas distancias, por lo que muchos de sus trabajos se realizaron utilizando *sporetraps* instalados en plataformas aéreas de diversos tipos.

Así, en 1938 –vísperas de la Segunda Guerra Mundial–, Meier, con el apoyo del Gobierno de Estados Unidos, diseñó una campaña de estudios para analizar la presencia y los movimientos de microorganismos en las capas altas de la atmósfera y su deposición en territorios muy alejados. Esto fue posible porque Meier era amigo de los aviadores Charles Lindbergh y Amelia Earhart, dado que estos llevaron varios tipos de muestreadores de partículas biológicas en sus aviones a rincones remotos del planeta. Un muestreador en particular fue diseñado por Lindbergh y Meier, el llamado Skyhook [11]. Este muestreador fue utilizado en 1933 durante el Atlantic Survey Flight de Lindbergh, a bordo de un Lockheed Sirius bautizado como Tingmissartok (el que vuela como un gran pájaro, en lengua anuki), que recorrió más de 45.000 km. El Skyhook fue construido en una noche por The American Instrument Co. de Washington DC. Consistía en un tubo de aluminio que sobresalía verticalmente de la cabina hasta una altura de unos 2 pies (unos 60 cm). Al final del tubo se colocó un cartucho que contenía un portaobjetos con una superficie adhesiva. Los resultados completos de los análisis nunca se publicaron, aunque mostraron que la atmósfera estaba poblada en gran medida con diferentes tipos de microorganismos, al menos en la zona inferior de la envolvente de vuelo.

Desafortunadamente, Meier desapareció misteriosamente mientras ampliaba sus estudios en el Pacífico a bordo del PanAm Martin M-130 «Hawaii Clipper». La respuesta puede estar en el último párrafo de uno de sus artículos: «Las potencialidades de la distribución mundial de esporas de hongos y otros organismos atrapados y transportados al exterior por los vientos transcontinentales pueden tener tremendas consecuencias económicas...»

Tanto Meier como McKinley pensaron que las grandes masas de agua ofrecerían la oportunidad de medir las distancias sobre las cuales los vientos pueden transportar las esporas y los granos de polen. Meier también pensó

que sería una buena idea comenzar a tomar muestras de aire sobre el Pacífico y capacitar al personal de PanAm para que tomase muestras regulares para él.

Asimismo, los británicos estaban muy interesados en las posibilidades que se abrían en este campo y crearon institutos de investigación aerobiológica. El más importante de ellos fue el de Porton Down (Wiltshire, Inglaterra), hogar de dos instalaciones del Gobierno Británico: el Laboratorio de Ciencia y Tecnología de Defensa del Ministerio de Defensa, conocido durante más de 100 años como una de las instalaciones de investigación militar más secretas y controvertidas del Reino Unido (2.800 ha) y la Agencia de Seguridad Sanitaria del Reino Unido. Tanto es así que, durante la Segunda Guerra Mundial, los científicos de Porton Down desarrollaron armas biológicas utilizando esporas de ántrax y de otros microorganismos.

El más importante de los laboratorios fue dirigido por Philip H. Gregory, quien, gracias a los resultados obtenidos y extrapolados –ya no solo al campo de la fitopatología, sino también al de la aerobiología en sentido amplio–, permitió grandes avances en esta ciencia. Gregory [12] publicó un tratado que posteriormente ha sido básico para todos los investigadores en este campo, *The microbiology of the atmosphere*, donde se sientan las bases fundamentales de cómo realizar el muestreo y análisis de las atmósferas, tanto de exteriores como de interiores, y para la identificación y cuantificación de las partículas de origen biológico presentes en el aire y que pueden ser de utilidad para muchos campos de la ciencia.

6.4.2. Aeroalergología

Como ya se ha mencionado anteriormente, en el siglo XIX se produjo la aparición de la enfermedad conocida como *fiebre del heno*, la cual dio lugar a un incremento en el interés en el contenido biológico del aire por parte de los médicos. Hay que remontarse a finales del siglo XVIII y principios del XIX, cuando John Bostock describió los síntomas de esta enfermedad, aunque sin poder encontrar una explicación a su desarrollo en los seres humanos. En su trabajo de 1819, indicaba que «la fiebre del heno, aunque de origen desconocido, no tiene nada que ver ni con el heno ni con padecer fiebre». Una vez descrita la enfermedad, el médico Charles Blackley [13] realizó un interesante trabajo de carácter experimental, en el que profundizaba en las causas y la naturaleza de lo que médicamente se conocía como *Catarrhus aestivus* (fiebre del heno). Para ello, utilizó cometas en las que había dispuesto portaobjetos impregnados de vaselina, haciéndolas volar a 500 m de altura, capturando así el polen y las esporas presentes a distancia de los focos emisores. Así demostró que estas partículas podían viajar a gran altura y, como consecuencia, transportarse a grandes distancias. El corolario de su trabajo era un aviso a los enfermos de polinosis: «La mejor forma de no sufrir la enfermedad era pasar el verano en un yate, en medio del mar».

6.5. Procesos aerobiológicos

Los fenómenos y procesos que permiten que la atmósfera posea una determinada carga de estas partículas biológicas (pólenes y esporas de los hongos) son:

- La producción, es decir, dónde aparecen, liberan o se emiten.
- Su entrada en la atmósfera y, por tanto, su dispersión y transporte.
- Su deposición, como consecuencia de la acción de la gravedad y la falta de vientos (posteriormente, se pueden producir fenómenos de refltación y, por tanto, de nuevas deposiciones).
- El impacto sobre los seres vivos (en particular, sobre los humanos).
- Su inhalación y entrada en el tracto respiratorio.
- La expresión de los fenómenos alérgicos o de otro tipo, por parte de aquellos individuos que son sensibles a estas partículas biológicas.

6.6. Salud ambiental: esporopolinosis

Cuando las esporas de los hongos o los granos de polen se ponen en contacto con el aparato respiratorio de algunos animales –fundamentalmente el ser humano–, se produce una respuesta fisiológica de las células del aparato respiratorio que conocemos con el nombre de *alergia polínica* o *esporopolinosis*. Esta respuesta es un tipo de prurito inflamatorio, más o menos intenso o violento, dependiendo tanto del individuo como de la carga antigénica que llega a sus vías respiratorias.

Los granos de polen y las esporas poseen una envoltura de protección formada básicamente por unos compuestos conocidos con el nombre de *esporopoleninas*, que no son más que un tipo especial de proteínas. Por tanto, la respuesta alérgica es una reacción –en los llamados individuos atópicos– a la entrada en el aparato respiratorio de proteínas que son reconocidas como extrañas por el individuo: el superior para los granos de polen que tienen mayor tamaño, el inferior para las esporas de los hongos que son más pequeñas.

Estas proteínas pueden ser estructurales o haber sido depositadas durante la esporogénesis¹ sobre la cubierta, pudiendo ser utilizadas en los mecanismos de reconocimiento en el proceso de fecundación de la planta o en el proceso de colonización por el hongo. Una vez llegan a las mucosas del apa-

1. El polen porta el gameto masculino de las plantas superiores, mientras que las esporas son los elementos reproductores asexuales de los hongos. Son altamente resistentes, encontrándose en sedimentos de muchos millones de antigüedad o en otros materiales como edificios, tejidos, alimentos, drogas, dinero, cabello, etc. Son muy variables en forma y tamaño, por lo que pueden servir para identificar la planta de la que proceden.

rato respiratorio, se disuelven en estas, dando lugar al fenómeno reactivo conocido como *alergopolinosis*.

En los individuos atópicos, el sistema inmunológico –formado por antígenos específicos a la proteína de que se trate– produce unas células, denominadas *mastocitos*, que tienen cubierta toda su superficie exterior con moléculas de inmunoglobulinas en forma de Y, en cuyos extremos se captura la proteína antigénica, que es también capturada por la inmunoglobulina adyacente, e inactiva al antígeno (figura 6.1). El resultado es el aumento de la tensión ejercida sobre la membrana del mastocito, hasta el punto de que llega a romperla y se libera el contenido citoplasmático de su interior, que en su mayor parte está compuesto por unas moléculas conocidas como mediadores químicos, entre las que destacan las histaminas.

Estas histaminas se liberan en el torrente sanguíneo y activan la producción de más mastocitos, que son transportados al lugar de la entrada del antígeno, lo que da lugar a una acumulación de sangre y, en consecuencia, a un prurito o inflamación. Si esta se produce en los bronquios, pasan a impedir

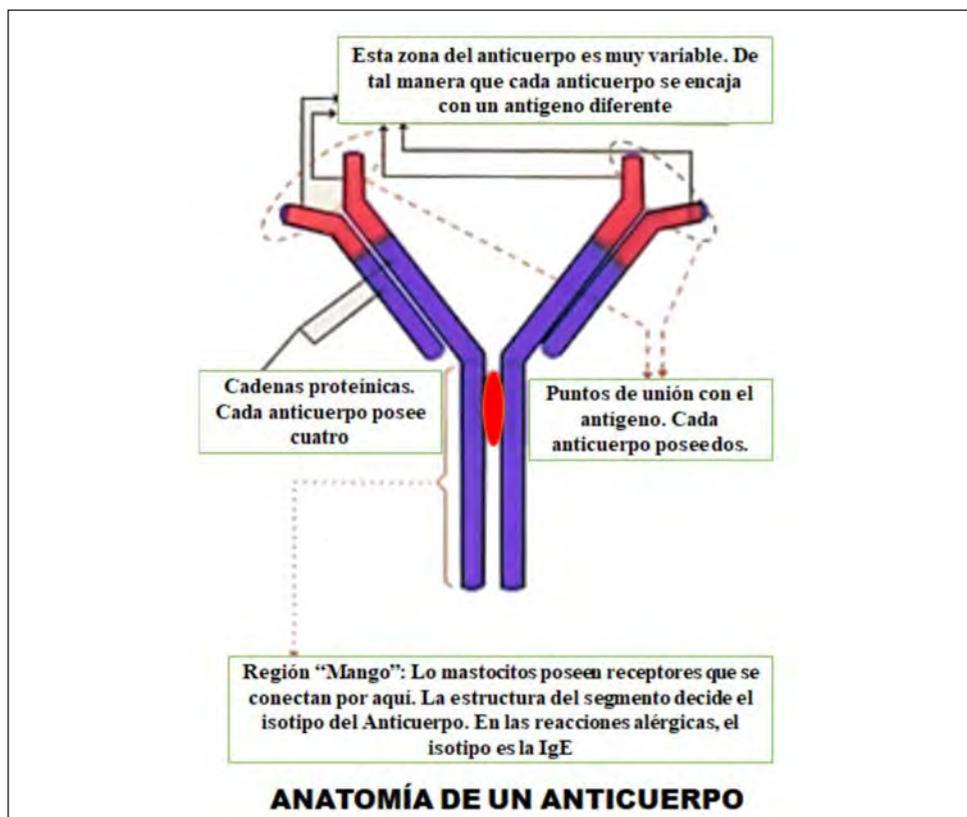


Figura 6.1. Esquema de la estructura molecular de un anticuerpo.

también su normal funcionamiento y, por lo tanto, se dificulta la respiración (asma bronquial).

Los mastocitos del aparato respiratorio son conocidos como tipo A. Existen otros tipos de mastocitos, como los B, que se producen en el aparato digestivo y sirven esencialmente para eliminar los gusanos intestinales o lombrices, muy comunes en tiempos pasados –en los cuales la higiene personal y alimenticia era muy deficiente– y que hoy en día son menos comunes en los humanos de los países más desarrollados (figura 6.2). Cabe destacar que estos mastocitos de tipo B son más potentes en cuanto a la respuesta antigénica, dado que para la expulsión de estos gusanos es necesaria una reacción más violenta del tejido intestinal que genera mayores contracciones y un aumento de las deposiciones, que permitirán la expulsión de estos por las heces.

Algunas teorías intentan explicar que el aumento del número de individuos atópicos-polinóticos en los tiempos actuales se debe a la casi desaparición de las infecciones por gusanos en el intestino, habiéndose producido una migración de los mastocitos tipo B al aparato respiratorio.

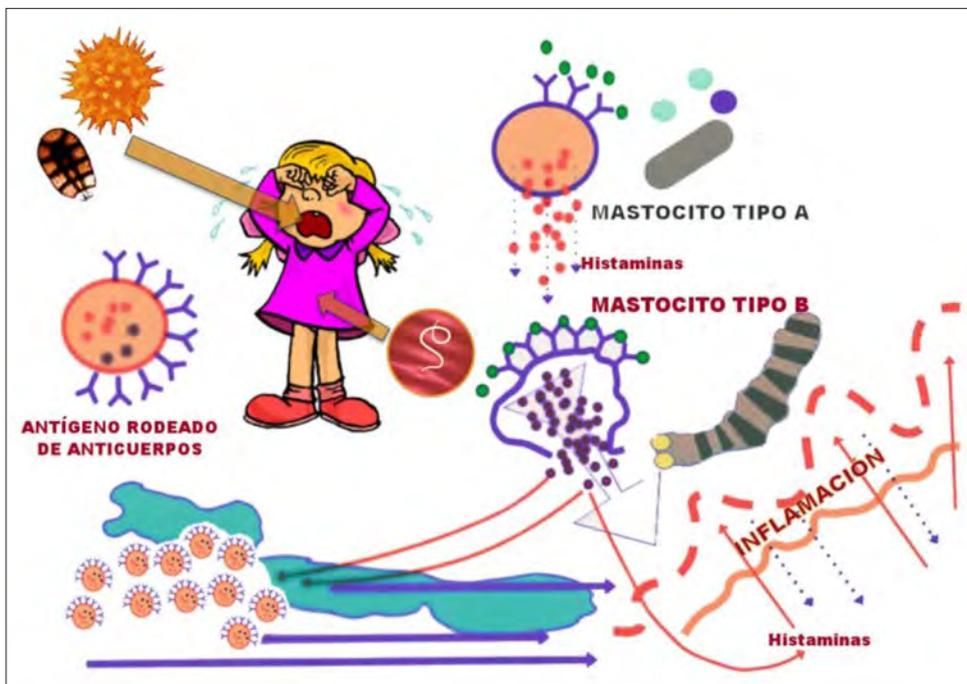


Figura 6.2. Bases biológicas de la respuesta inmunológica al polen y a las esporas de hongos.

6.7. Partículas biológicas presentes en las atmósferas de interiores

Los organismos más comunes en la atmósfera de los interiores habitados son las bacterias y los virus que causan problemas de naturaleza infecciosa, siendo necesario que sean huéspedes de un ser vivo (célula) para poder desarrollarse. Por lo general, son transportados por el viento o adheridos a otros organismos en biopelículas o en aerosoles, y afectan principalmente al tracto respiratorio de los humanos y al de algunos animales domésticos, pudiendo también penetrar en los interiores, adheridos a partículas no biológicas mediante el movimiento de la ropa o el polvo. También es frecuente encontrar en estos ambientes cianobacterias y microalgas, que suelen formar una película sobre los sustratos de los distintos elementos que forman parte de un espacio interior.

Sin embargo, a efectos aerobiológicos, las partículas más importantes que afectan a la calidad de las atmósferas de interiores son los vectores dispersantes de los hongos (esporas), las estructuras implicadas en la reproducción sexual de las plantas superiores (granos de polen) y el polvo acumulado en los hogares.

6.8. La importancia aerobiológica del polvo doméstico

Mención aparte, y como un importante elemento de la biota de interiores, debe tenerse en cuenta al polvo doméstico, compuesto básicamente por esporas y micelios de hongos, polen y, sobre todo, por ácaros (*Dermatophagoides pteronyssinus*). Estos últimos son insectos microscópicos que se alimentan de las descamaciones de la piel de los humanos y del material de origen animal y vegetal que se utiliza en los hogares, y, aunque no son causantes *per se* de ninguna enfermedad en los humanos, están implicados en fenómenos de reacción alérgica, como integrantes del polvo de la vivienda.

John Floyer [15] describió de manera muy precisa el asma bronquial, causada «al barrer el más mínimo polvo de una habitación o hacer la cama». Sin embargo, tuvieron que pasar 125 años antes de que se comenzara a comprender, gracias a Giacomo R. Ancona, el «asma del polvo doméstico» [16]. Ancona examinó la salud de los trabajadores de los molinos de grano que sufrían de asma y sospechó que la enfermedad era causada por los ácaros que vivían sobre el grano (*Pediculoides ventricosus*).

Es interesante resaltar que Willem Storm van Leeuwen (1882-1933) [17] se interesó por el denominado «asma del polvo doméstico», estimulado por las publicaciones de Cooke [18], quien opinaba que debía existir un alérgico

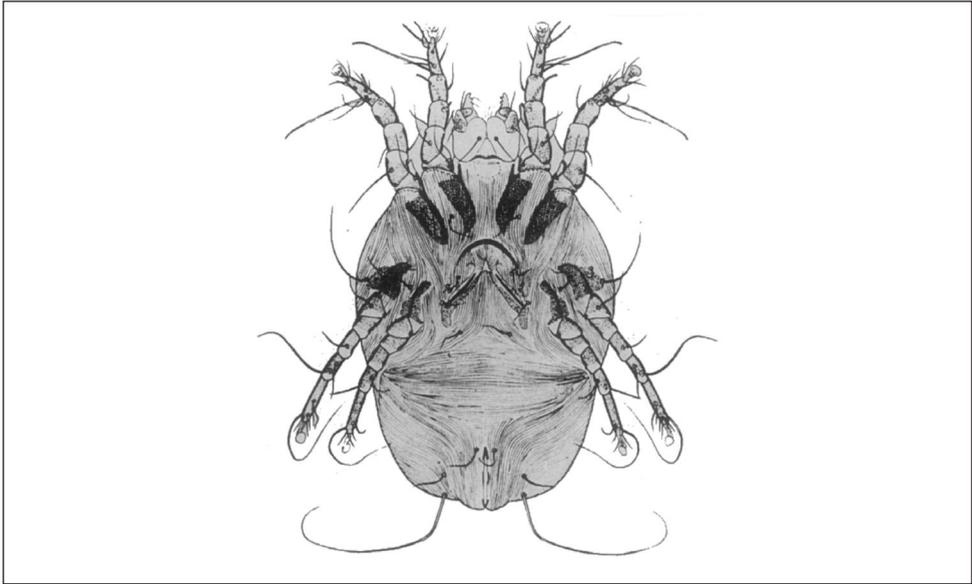


Figura 6.3. *Dermatophagoides pteronyssinus* [14].

no específico en el polvo doméstico. El problema residía en que las pruebas cutáneas con extractos de polvo doméstico a menudo resultaban negativas, mientras que las muestras de polvo en sí mismas podían provocar ataques de asma. ¿Era realmente el polvo de la casa lo que conducía al asma o fueron otros factores, posiblemente climáticos, los culpables? Para aclarar esta cuestión, Van Leeuwen [17] desarrolló un experimento especial en 1923. Llevó a tres personas asmáticas desde los Países Bajos hasta la zona de alta montaña de St. Moritz, en Suiza. En pocos días, los pacientes ya no tenían síntomas de asma, pero si inhalaban polvo de una lata que contenía polvo de la habitación y de la casa de sus apartamentos de Holanda, los síntomas asmáticos volvían a aparecer en St. Moritz.

Hace solo 50 años (1964), el grupo de Reindert Voorhorst y los desgraciadamente ya fallecidos, Frits T. Spieksma y Marise Spieksma-Boezeman, demostraron la presencia de ácaros en el polvo doméstico en muestras de polvo de apartamentos de Leiden (Países Bajos) que producían síntomas asmáticos. Así, Marise Spieksma-Boezeman [14] pudo corroborar que los ácaros del polvo doméstico eran la fuente principal de alérgenos en el polvo doméstico y que la cantidad de ácaros en las casas húmedas era mayor que en las casas secas. Algo que había desconcertado a los investigadores fue su aparición en un material tan indefinible como el polvo doméstico, así como su notable especificidad y el hecho de que tantos pacientes asmáticos fueran atópicos [19].

6.9. El cambio climático y las alergias respiratorias

Es conocido que el calentamiento global puede incrementar o acortar la estación polínica, así como la severidad de síntomas en algunas plantas con interés alergógeno, además de que un incremento de las lluvias torrenciales puede provocar frecuentes episodios de asma. También está ampliamente demostrado que el aumento de episodios de contaminación urbana provoca problemas de salud, algunos de ellos ligados a la respuesta alérgica o asmática.

Eguiluz-Gracia *et al.* [20] indican que tanto la contaminación del aire como el calentamiento global podrían tener un impacto significativo en la salud y el bienestar humanos, contribuyendo a la aparición y agravamiento de la rinitis alérgica y el asma, entre otras enfermedades respiratorias crónicas. Desde el episodio pandémico de 2020, las personas han experimentado un proceso de creciente aislamiento en espacios cada vez más cerrados, de tal manera que tienden a pasar la mayor parte del tiempo en hábitats interiores. Este hecho implica una mayor exposición a alérgenos de interior, como los ácaros del polvo doméstico y otros contaminantes, que pueden repercutir seriamente en la salud respiratoria, pues aumenta la frecuencia de procesos respiratorios, sobre todo en niños, por lo que son necesarios ajustes en las políticas de diseño de las soluciones habitacionales y los cambios de estilo de vida necesarios para mitigar los efectos nocivos de estos cambios (figura 6.4).

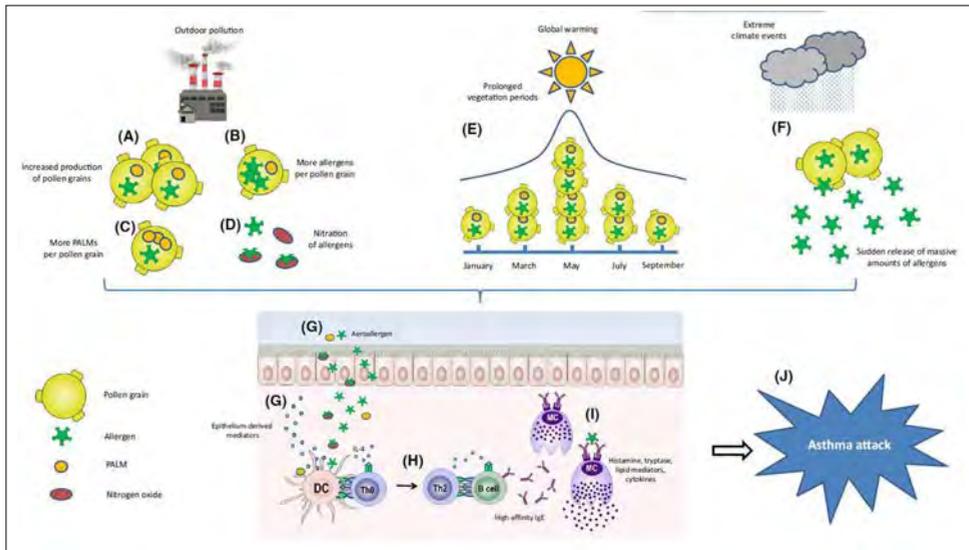


Figura 6.4. Los alérgenos del polen y esporas de hongos pueden desencadenar la liberación de mediadores proinflamatorios e inmunomoduladores que aceleran el inicio de la sensibilización mediada por IgE y de la alergia [20].

Por otro lado, D'Amato *et al.* [21] han demostrado que, mediante un aumento de la temperatura de espacios interiores, se podría reducir el efecto que causa el aire frío en los casos de asma y rinitis, siendo así los pacientes menos susceptibles a infecciones respiratorias.

Como se ha mencionado anteriormente, el cambio climático parece estar produciendo impactos en la calidad de la atmósfera del aire exterior, pero también indirectamente en el aire interior de las viviendas y de los espacios habitacionales. Cuanto más frías son las temperaturas en invierno, más se tiende a calentar las estancias interiores; por tanto, estas se vuelven más secas y se reducen las posibilidades de crecimiento de las poblaciones de ácaros [22]. En Alemania, se pudo demostrar que los inviernos inusualmente fríos conducen a una reducción en el número de ácaros, así como también influyeron las fluctuaciones de temperatura más amplias, tanto en verano como en invierno [23]. Si, en el futuro, los inviernos pasasen a ser menos fríos y esto se asociara con una mayor humedad relativa del aire, podrían desarrollarse un mayor número de ácaros en las viviendas y, en consecuencia, producirse un aumento en las tasas de rinitis y asma [24]. Sin embargo, en contrapartida, con una situación de crisis energética, vinculada entre otros a la guerra en Ucrania, que pueda llevar a mayores restricciones en el uso de la calefacción, sería de esperar una reducción en la concentración de ácaros en ambientes de interiores y, por tanto, una disminución en la gravedad de los síntomas de los individuos atópicos y sensibles a la acción del polvo doméstico.

Por extrapolación, las variaciones de los parámetros climáticos de las viviendas (uso y consignas de calefacción/refrigeración), así como de las condiciones estructurales habitacionales deberían inducir también al cambio de la marca asmática y alérgica producido por los ácaros del polvo de cada vivienda.

6.10. La capacidad alérgica e infectiva de las partículas biológicas presentes en el aire

Según De Vitte [25], los humanos inhalan, ingieren y tocan miles de hongos cada día. Su ubicuidad y diversidad, reflejada en su compleja taxonomía, contrasta fuertemente con nuestro escaso conocimiento sobre su distribución, efectos patogénicos e intervenciones efectivas a nivel ambiental e individual. Este trabajo expuso una descripción general de las características más destacadas de los hongos, tanto como actores permanentes del *exposoma* humano como determinantes clave de la salud humana a través de la lente de la alergia fúngica y otras reacciones de hipersensibilidad fúngica. Una mejor comprensión del *exposoma* fúngico arroja nueva luz sobre la epidemiología

de las enfermedades de hipersensibilidad relacionadas con hongos, su sustrato inmunológico, los métodos actualmente disponibles y los biomarcadores para hongos médicos y ambientales (figura 6.5).

Muchos hongos y algunos alérgenos del polen son enzimáticamente activos y pueden dañar la barrera epitelial y aumentar la absorción de alérgenos, como, por ejemplo, los de *Alternaria alternata* y las proteasas del polen de diferentes especies, como las del olivo (*Olea europaea*) y varios alérgenos de ambrosía (*A. artemisiifolia*). Tal actividad enzimática probablemente desem-

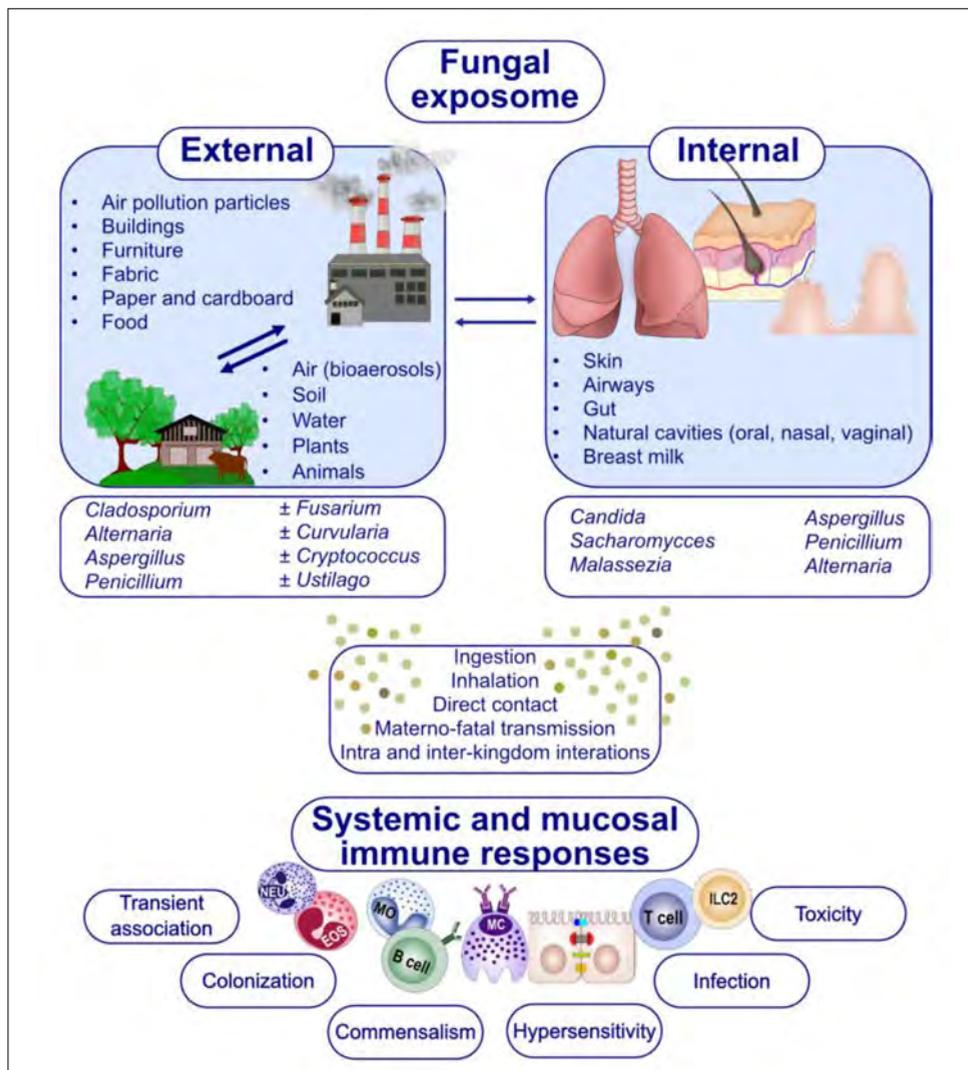


Figura 6.5. Sensibilización del sistema inmune por efecto de la exposición a polen y hongos [25].

peña un papel en la sensibilización. Asimismo, tanto el polen como las esporas contienen sustancias distintas de los alérgenos que pueden ser relevantes o tener un papel sinérgico en la inducción de una respuesta inmune. Por ejemplo, las fracciones de bajo peso molecular privadas de alérgenos del polen de ambrosía (*A. artemisiifolia*) promueven la producción de IgE específica. Los granos de polen también liberan lípidos, adenosina y nicotina amina adenina dinucleótido fosfatasa hidrogenasa, productos que pueden actuar como adyuvantes inmunológicos. Al igual que el polen, los hongos producen productos distintos de los alérgenos, como los B-glucanos, el ergosterol, los polisacáridos extracelulares y las micotoxinas, que podrían influir de manera similar en la respuesta inmunitaria [26, 27].

Los posibles efectos alérgicos o inmunológicos asociados con la exposición a estos productos siguen siendo controvertidos. Tal exposición podría modificar la respuesta inmune a los alérgenos y su presentación al sistema inmunitario, reclutando neutrófilos que aumentan la inflamación alérgica [28].

Existe un alto nivel de reactividad cruzada entre el polen de muchas especies, incluso entre plantas filogenéticamente muy distantes. Sin embargo, la reactividad cruzada entre diferentes grupos de hongos está menos definida, a pesar de que muchos sujetos alérgicos están sensibilizados a múltiples especies de esporas de hongos [29].

Por otro lado, y adicionalmente a su posible respuesta alérgica, los hongos dan lugar a dos tipos de infecciones sistémicas, de asentarse y de germinar en el sistema respiratorio de los humanos, según los taxones implicados: los hongos patógenos virulentos, que causan enfermedades como histoplasmosis, blastomicosis y coccidioidomicosis, y los patógenos oportunistas, que afectan especialmente a individuos inmunológicamente suprimidos, en los que inducen aspergilosis, zigomicosis, candidiasis y varias otras enfermedades (temas que se salen del ámbito de este capítulo).

6.11. ¿Nuevas causas de la prevalencia de la atopia?

Aparte de las posibles causas intrínsecamente genético-fisiológicas, actualmente se buscan otras causas que puedan explicar el aumento de la prevalencia e incremento de las atopias y asma, sobre todo en los países industrializados, barajándose, entre otras, el incremento de las migraciones (sea por cuestiones socioeconómicas, políticas o bélicas).²

2. En España viven, según publica la ONU, 6.104.203 de inmigrantes, lo que supone un 12,9 % de la población de España. En el *ranking* de inmigración, España es el 46° país del mundo por porcentaje de inmigración. Los inmigrantes en España proceden principalmente de Marruecos (11,66 %), Rumanía (10,20 %) y Ecuador (6,80 %). Según datos del INE, durante 2021, el número de extranjeros aumentó en

La atopía y el asma parecen estar relacionados con factores ambientales en personas genéticamente susceptibles (como la contaminación y la variabilidad climática), habiéndose documentado diferentes tasas de prevalencia en todo el mundo. En países desarrollados e industrializados se observa una mayor prevalencia de atopía y asma en comparación con los países subdesarrollados y menos prósperos. Las migraciones implican la exposición a un nuevo conjunto de contaminantes y alérgenos; además, involucran factores socioeconómicos y culturales, como las condiciones de vivienda (su tipología y condiciones de confort), la dieta y la accesibilidad a los servicios médicos, y, probablemente, todos ellos afectan a la salud de los migrantes.

Los estudios de migración proporcionan información sobre el papel de los factores ambientales en el desarrollo de la atopía y el asma. Casi el 3% de la población mundial son inmigrantes, ya que, en los últimos 35 años, el número de migrantes internacionales se ha más que duplicado a 175 millones. Y aunque este aumento refleja parcialmente el crecimiento demográfico durante el mismo período, la globalización, la brecha en los niveles de vida entre países ricos y pobres y el envejecimiento de las sociedades en el mundo rico alimentan una mayor movilidad laboral. La migración implica cuestiones sociales, así como cuestiones médicas interesantes e intrigantes.

La inmigración a países con prevalencia de alergias provoca, a su vez, un aumento de alergias y asma en los inmigrantes si lo comparamos con la prevalencia de atopía en sus países de origen. Generalmente, el aumento de la alergia y del asma no está relacionado con el origen étnico, aunque en ciertas poblaciones puede desempeñar un papel importante. Estudios sobre migrantes apoyan la hipótesis de que el estilo de vida y los factores ambientales en los países industrializados occidentales facilitan la atopía y asma. El efecto depende del tiempo cronológico. La adquisición de alergias parece estar influenciada por la edad en el momento de la inmigración, siendo los migrantes, en general, más propensos al desarrollo de alergias que la población local. La baja higiene previa a la inmigración no parece proteger contra el desarrollo de atopía o asma [30].

La hipótesis de la higiene sugiere, según observaciones epidemiológicas, que la exposición a los microbios en los primeros años de vida está asociada con la prevención de enfermedades como la enfermedad inflamatoria intestinal y el asma. Blumberg *et al.* [31] mostraron que se acumulaban más células asesinas naturales (*natural killer cells*) invariantes en los pulmones y la lámina propia del colon, dando como resultado una mayor susceptibilidad a la enfermedad inflamatoria intestinal y al asma en ratones libres de gérmenes que en ratones libres de patógenos específicos. La exposición de ratones neonatales libres de gérmenes a la microbiota convencional normalizaba el

49.612 personas, hasta un total de 5.417.883. Este incremento respondió, en su mayor parte, a un saldo migratorio positivo de 153.094 personas [32].

número de estas células, y daba como resultado una menor susceptibilidad a la enfermedad inducida, mientras que la exposición de ratones adultos libres de gérmenes no lo hace [31].

En consecuencia, una deficiencia de higiene en sociedades menos desarrolladas da lugar a una menor tasa de atopía y asma, mientras que, en aquellos países con una higiene más controlada, esa tasa va en aumento año por año. Se hipotetiza que entre las causas podrían estar el menor tamaño de las familias y los hogares, soluciones habitacionales mejor acondicionadas, una microflora intestinal más estable, un alto uso de antibióticos, la casi desaparición de los gusanos intestinales, unos buenos saneamientos y, por supuesto, una baja carga fecal-oral, en contraposición con las condiciones de los países en vías de desarrollo. Evidentemente, se podría realizar una extrapolación a las condiciones higiénicas dentro de las poblaciones de los países desarrollados y a la higiene que existe entre unas soluciones habitacionales y otras.

En resumen, la ausencia de una exposición prolongada y repetida, dados los altos niveles de limpieza, hacen que nuestro sistema inmunológico se vea estimulado por sustancias que hipotéticamente deberían ser inofensivas, como el polen y las esporas fúngicas, lo cual provoca respuestas inmunológicas indeseables para algunos seres humanos.

6.12. Conclusión

La aerobiología desempeña un papel muy importante en el conocimiento del porqué de las patologías biológicas en los lugares donde los humanos desempeñamos diariamente nuestras actividades. Por tanto, la investigación sobre el espectro, la variabilidad y los factores incidentales, que actúan sobre el comportamiento de las partículas biológicas presentes en los hábitats de interior y exterior, son fundamentales para tomar las medidas preventivas, tanto arquitectónicas como de higiene, que eviten enfermedades, aparentemente propias del mundo desarrollado y que causan incomodidades y pérdidas económicas, debidas a su influencia sobre la vida de los individuos y a las terapias necesarias para su alivio o eliminación.

Porque, como ya dijo Samuel Johnson (*Remarks*, 1775), «el conocimiento es de dos tipos: conocemos un tema nosotros mismos o sabemos dónde podemos encontrar información sobre él».

Referencias

- [1] J. Marchena, *De la naturaleza de las cosas* (trad. Tito Lucrecio Caro). Madrid, Librería de Hernando y Compañía, 1918.

- [2] S. Hoole, *The select works of Antony Van Leeuwenhoek: containing his microscopical discoveries in many of the works of nature*. Wentworth, 1800.
- [3] P. A. Michelli, *Nova plantarum genera*. Florencia (Italia), 1729.
- [4] C. G. Ehrenberg, *Charles Darwin correspondence 1869-1882 from Ehrenberg*, 2022. https://www.correspondence.ie/index.php?letters_function=4&letters_idno=13940.
- [5] P. Miquel, *Les organismes vivants de l'atmosphère*. Hachette Livre BNF, 1883.
- [6] H. Molish, *Microchemie der Pflanze*. Jena (Alemania), Verlag von Gustav Fischer, 1923.
- [7] J. M. Hirst, «An automatic volumetric spore trap», *Ann. Appl. Biol.*, vol. 39, pp. 257-265, 1952, doi: 10.1111/j.1744-7348.1952.tb00904.x.
- [8] J. Oteros *et al.*, «An operational robotic pollen monitoring network based on automatic image recognition», *Environ. Res.*, vol. 191, p. 110031, 2020, doi: 10.1016/j.envres.2020.110031.
- [9] E. C. Stakman, A. W. Henry, G. C. Curran y W. N. Christopher, «Spores in the upper air», *J. Agric. Res.*, vol. 24, pp. 599-606, 1923.
- [10] F. C. Meier, «Collecting micro-organisms from the Arctic atmosphere», *Sci. Mon.*, vol. 40, pp. 5-20, 1935. <https://archive.org/details/562587-collecting-micro-organisms-from-the-arctic>.
- [11] Smithsonian's National Air and Space Museum, *Pollen tube 'sky-hook', Lockheed Sirius 'Tingmissartoq', Lindbergh*, 1933. <https://artsandculture.google.com/asset/pollen-tube-sky-hook-lockheed-sirius-tingmissartoq-lindbergh/qgHYds3rpmxBgA?hl=en>.
- [12] P. H. Gregory, *The microbiology of the atmosphere*. Londres (Reino Unido), Leonard Hill, 1961.
- [13] C. H. Blackley, *Experimental researches on the causes and nature of Catarrhus Aestivus, Hay Fever or Hay Asthma*. Kessinger Publishing Co, 1873.
- [14] R. Voorhorst, M. I. Spieksma-Boezeman y F. T. Spieksma, «Is a mite (*Dermatophagoides* sp.) the producer of the house-dust allergen?», *Allerg. und Asthma*, vol. 10, pp. 329-334, 1964. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14307280/>.
- [15] J. Floyer, *A treatise of the asthma*. Londres, *Abhandlungen von der Engbrüstigkeit*. Leipzig, Dinamarca, 1782.
- [16] G. Ancona, «Asma bronchiale anafilattico. Nota II (preventiva): asma epidemico da *Pediculoides ventricosus*», *Sper. Arch. Biol. Norm. e Patol.*, vol. 76, pp. 270-276, 1922.
- [17] S. W. van Leeuwen, «Bronchial asthma in relation to climate», *Proc. R. Soc. Med.*, vol. 17, pp. 19-26, 1924. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2201247/>.
- [18] R. A. Cooke, «Studies in specific hypersensitiveness: IV. New etiologic factors in bronchial asthma», *J. Immunol.*, vol. 7, n.º 1922, pp. 147-162, 1926, doi: 10.4049/jimmunol.7.2.147.

- [19] R. Voorhorst, F. T. M. Spieksma, H. Varekamp, M. J. Leupen y A. W. Lyklema, «The house-dust mite (dermatophagoides pteronyssinus) and the allergens it produces. Identity with the house-dust allergen», *J. Allergy*, vol. 39, n.º 6, pp. 325-339, 1967, doi: 10.1016/0021-8707(67)90045-7.
- [20] I. Eguiluz-Gracia *et al.*, «The need for clean air: the way air pollution and climate change affect allergic rhinitis and asthma», *Allergy*, vol. 75, pp. 2170-2184, 2020, doi: 10.1111/all.14177.
- [21] G. D'Amato, L. Cecchi, M. D'Amato y G. Liccardi, «Air pollution and climate change on the worsening of allergic respiratory diseases», *Rass. di Patol. dell'Apparato Respir.*, vol. 23, n.º 6, pp. 313-317, 2008.
- [22] K.-C. Bergmann y H. Müsken, «Milben sind nicht gleich Milben», *Allergologie*, vol. 38, n.º 2, pp. 47-54, 2015, doi: 10.5414/ALX01733.
- [23] U. Gehring, B. Brunekreef, B. Fahlbusch, H. E. Wichmann y J. Heinrich, «Are house dust mite allergen levels influenced by cold winter weather?», *Allergy Eur. J. Allergy Clin. Immunol.*, vol. 60, n.º 8, pp. 1079-1082, 2005, doi: 10.1111/j.1398-9995.2005.00872.x.
- [24] J. P. Zock *et al.*, «Distribution and determinants of house dust mite allergens in Europe: The European community respiratory health survey II», *J. Allergy Clin. Immunol.*, vol. 118, n.º 3, pp. 682-690, 2006, doi: 10.1016/j.jaci.2006.04.060.
- [25] J. Vitte *et al.*, «Fungal exposome, human health y unmet needs: a 2022 update with special focus on allergy», *Allergy Eur. J. Allergy Clin. Immunol.*, vol. 77, n.º 11, pp. 3199-3216, 2022, doi: 10.1111/all.15483.
- [26] R. Codina, R. E. Esch y R. F. Lockey, «The clinical relevance of pollen versus fungal spores in allergic diseases», *J. Allergy Clin. Immunol. Pract.*, vol. 9, n.º 10, pp. 3615-3620, 2021, doi: 10.1016/j.jaip.2021.06.004.
- [27] R. K. Bush, J. M. Portnoy, A. Saxon, A. I. Terr y R. A. Wood, «The medical effects of mold exposure», *J. Allergy Clin. Immunol.*, vol. 117, n.º 2, pp. 326-333, 2006, doi: 10.1016/j.jaci.2005.12.001.
- [28] L. K. Dubey, J. B. Moeller, A. Schlosser, G. L. Sorensen y U. Holmskov, «Induction of innate immunity by *Aspergillus fumigatus* cell wall polysaccharides is enhanced by the composite presentation of chitin and beta-glucan», *Immunobiology*, vol. 219, n.º 3, pp. 179-188, 2014, doi: 10.1016/j.imbio.2013.10.003.
- [29] Y. Fukutomi y M. Taniguchi, «Sensitization to fungal allergens: resolved and unresolved issues», *Allergol. Int.*, vol. 64, n.º 4, pp. 321-331, 2015, doi: 10.1016/j.alit.2015.05.007.
- [30] M. Rottem, M. Szyper-Kravitz y Y. Shoenfeld, «Atopy and asthma in migrants», *Int. Arch. Allergy Immunol.*, vol. 136, pp. 198-204, 2005, doi: 10.1159/000083894.

- [31] I. Visan, «The hygiene hypothesis», *Nat. Immunol.*, vol. 13, n.º 5, pp. 437-437, 2012, doi: 10.1038/ni.2299.
- [32] Instituto Nacional de Estadística, *Cifras de población (CP) a 1 de julio de 2022. Estadística de migraciones (EM). Primer semestre de 2022. Notas de prensa*, 2022. https://www.ine.es/prensa/cp_j2022_p.pdf (accessed Sep. 13, 2022).

Filtración de aire en espacios interiores

JAVIER PÉREZ
Prevención Docente, Málaga, España

Lista de acrónimos

- A ancho.
- ACH renovaciones por hora (acrónimo del inglés *air changes per hour*).
- ARN ácido ribonucleico.
- CADR tasa de entrega de aire limpio (acrónimo del inglés *clean air delivery rate*).
- CEIP Colegio de Educación Infantil y Primaria.
- COVID-19 acrónimo de enfermedad por coronavirus (del inglés *COronaVIrus Disea-se-2019*).
- CO₂ dióxido de carbono.
- EPA filtros de partículas eficientes (de sus siglas en inglés *efficient particulate air*).
- EPI equipo de protección individual.
- FFP2 mascarilla filtrante (EPI) de tipo 2 (acrónimo del inglés *filtering face pieces*).
- h altura.
- HEPA filtros de partículas de alta eficiencia (de sus siglas en inglés *high efficiency particulate air*).
- IDA calidad del aire interior (acrónimo del inglés *indoor air quality*).
- L largo.
- MPPS tamaño de partícula en el que el filtro de aire tiene su menor arrestancia (acrónimo del inglés *most penetrating particle size*).
- ODA calidad del aire exterior (acrónimo del inglés *outdoor air quality*).
- PAC equipo de limpieza del aire portátil (acrónimo del inglés *portable air cleaner*).
- PCR reacción en cadena de la polimerasa (acrónimo del inglés *polymerase chain reaction*).
- SARS-CoV-2 síndrome respiratorio agudo severo (acrónimo del inglés *severe acute respiratory syndrome coronavirus 2*).
- ULPA filtro de partículas ultra pequeñas en el aire (acrónimo del inglés *ultra-low particulate air*).
- UV-C ultravioleta de rango C.
- V volumen.

7.1. Introducción

Si hay una medida de autoprotección importante durante una pandemia provocada por un virus respiratorio (o de transmisión aérea) es procurar que las personas no respiren el aire ya respirado previamente por otras. La misión de la ventilación es introducir aire exterior «limpio», lo que va a provocar el desplazamiento y dilución del aire exhalado tras la respiración, así como de otra serie de contaminantes que puedan existir en el interior..., y lo que es más importante, el desplazamiento/dilución de los aerosoles potencialmente infectivos que pueda haber suspendidos en el aire interior, teniendo en cuenta que dentro de ellos podemos encontrar virus. Esta debería ser la primera opción, a ser posible, y de manera prioritaria mediante ventilación mecánica controlada, o en su defecto la ventilación natural, ya que son las únicas opciones que suponen la renovación real del aire. La recirculación del aire sin más, pero que no desplace, diluya o atrape ni CO₂, ni partículas ni aerosoles, debería quedar descartada.

En el caso de ventilación natural, el proceso de airear es más fácil en los meses de otoño y primavera, ya que es posible abrir ventanas y puertas (ventilación cruzada), de forma permanente y distribuida, con lo que es mucho más fácil lograr un caudal de renovación adecuado. Pero en periodos de mala meteorología surge la necesidad de ir cerrando ventanas. ¿Qué pasa entonces?, o, mejor dicho, ¿qué pasa si la ventilación natural, como suele suceder en muchos espacios cerrados, no es suficiente? La respuesta es que debemos filtrar adicionalmente.

El principal objetivo de la filtración –que suele estar compuesta por varios procesos diferentes– tiene como finalidad retirar del aire ambiente la mayor parte de partículas posibles. Dicho proceso, que no es excluyente con el de ventilación, consiste en hacer pasar varias veces (en función del caudal de renovación del equipo), el aire de una dependencia a través de varios filtros que se encargan de retener las partículas volátiles presentes en el aire (incluidos aerosoles potencialmente infectivos), quedando retenidos en su interior en el mayor porcentaje posible.

7.2. Tipos de filtro

La eficacia en el proceso de filtración viene determinada por el porcentaje de las partículas que, tras atravesar el filtro, quedan retenidas en él. En función de este parámetro, y de acuerdo con la norma UNE-EN-1822 [1], que se aplica en los filtros de alta eficiencia, podemos encontrar en el mercado los siguientes tipos de filtros (tabla 7.1):

Tabla 7.1. Tipos de filtro, según UNE-EN 1822 [1]

Clasificación de los filtros de alta eficiencia	Tipo de filtro	Eficacia en la retención	Penetración	Nº de partículas que deja pasar por cada 100.000 partículas suspendidas en el aire
Filtro de alta eficiencia EPA	E 10	≥ 85%	≤ 15%	15.000
	E 11	≥ 95%	≤ 5%	5.000
	E 12	≥ 99,5%	≤ 0,5%	500
Filtro de muy alta eficiencia HEPA	H 13	≥ 99,95%	≤ 0,05%	50
	H 14	≥ 99,995%	≤ 0,005%	5
Filtro para partículas ultra-pequeñas en aire ULPA	U 15	≥ 99,9995%	≤ 0,0005%	0,5
	U 16	≥ 99,99995%	≤ 0,00005%	0,05
	U 17	≥ 99,999995%	≤ 0,000005%	0,005

Existen dos normativas que regulan qué características deben cumplir los filtros utilizados.

- La norma UNE-EN-779 [2] (sustituida por la UNE-EN-16890 [3]) para filtros convencionales de baja y media eficiencia, con una eficacia inferior al 98 % en partículas de 0,4 µm, que clasifica los filtros en clase G (grueso), clase M (medio) y clase F (fino), ordenados a su vez según su eficacia de filtración.
- La norma UNE-EN-1822 [1] para los filtros de alta eficiencia, llamados también filtros absolutos (EPA, HEPA, ULPA), que los clasifica en clase E (EPA), clase H (HEPA) y clase U (ULPA), ordenados a su vez según su eficacia de filtración.

Una diferencia importante entre estos filtros es el tamaño de las partículas que son capaces de retener. Por ejemplo, los filtros tipo HEPA atrapan partículas desde las 0,3 µm de diámetro en adelante, mientras que los filtros ULPA atrapan partículas hasta 0,1/0,25 µm, por lo que:

- Un filtro HEPA (H14) tiene una eficiencia de filtración del 99,995 % para partículas de 0,3 µm de diámetro o mayores, dejando pasar solo 5 de cada 100.000 partículas de dicho tamaño.
- Un filtro ULPA (U16) tiene una eficiencia del 99.99995 % para partículas de hasta 0,1/0,25 µm de diámetro o mayores, dejando pasar sólo 0,05 de cada 100.000 partículas de dicho tamaño.

A la hora de elegir el tipo de filtro más conveniente para una determinada actividad, deberíamos tener en cuenta factores como: la calidad del aire inte-

rior (IDA), la calidad del aire exterior (ODA) y el nivel de exigencia y de protección necesarios en función de la actividad a realizar. Sin embargo, a nivel general, en la mayor parte de las situaciones, un filtro de tipo H13 (eficiencia de filtración del 99,95 % para partículas $\geq 0,3 \mu\text{m}$ de diámetro) suele ser suficiente. Si bien los filtros ULPA recogen partículas que, debido a su menor tamaño, son más difíciles de atrapar, en la mayoría de los ámbitos laborales no suele ser necesario aplicar una calidad de filtración tan elevada. Además, los filtros ULPA son más caros que los HEPA, tienen un tiempo de vida útil más pequeño, y provocan una caída de caudal importante en el equipo que los incorpora, algo trascendental a la hora de hacer un correcto dimensionado del equipo necesario. A esto, habría que sumarle que en una situación de pandemia como la de COVID-19, un filtro HEPA del tipo H13 ya es capaz de atrapar los aerosoles potencialmente infectivos que puedan quedar suspendidos en el aire (es importante resaltar que, como se citó en capítulos anteriores, los virus no «vuelan», sino que su desplazamiento se realiza a través de aerosoles que los llevan en su interior). Teniendo en cuenta que hay una correlación directa entre partículas en el aire y microorganismos, si el equipo consigue retirar una cantidad importante de partículas en el aire, eliminamos también una gran cantidad de microorganismos potencialmente infectivos.

Los filtros de aire de partículas de muy alta eficiencia (HEPA) y los filtros de aire de partículas ultrapequeñas (ULPA) están confeccionados básicamente de fibra de vidrio hilada enrollada en un material que posteriormente se pliega, aumentando así la superficie de filtrado. El proceso de filtración, que es parecido al que realizan las mascarillas del tipo FFP2/FFP3, se basa en la combinación de cuatro mecanismos distintos –que funcionan al mismo tiempo– para atrapar las partículas, pudiendo así garantizar la retención tanto de partículas de gran tamaño, como de las más pequeñas que son las más difíciles de retener. Los mecanismos que utiliza el filtro, en orden de menor a mayor porcentaje de captura de partículas, son los siguientes (figura 7.1):

- **Tamizado.** Proceso eficaz para las partículas de tamaño mayor a $1\mu\text{m}$. En este caso, el tamaño de la partícula es mayor que el hueco libre que hay entre las fibras, quedando atrapada en él.
- **Inercia.** Este proceso es eficaz con las partículas de gran tamaño (en torno a valores de $1\mu\text{m}$). Las partículas siguen la trayectoria del aire. Cuando la corriente de aire que arrastra la partícula rodea una fibra del filtro, la inercia que lleva la partícula le impide seguir la trayectoria de la corriente y continúa con la misma dirección que traía, quedando atrapada en la fibra del filtro.
- **Interceptación.** Este proceso es adecuado para retener partículas de entre $0,2$ y $3 \mu\text{m}$. En este caso, las partículas siguen la trayectoria del aire, encuentran una fibra en su camino y quedan atrapadas en ella.

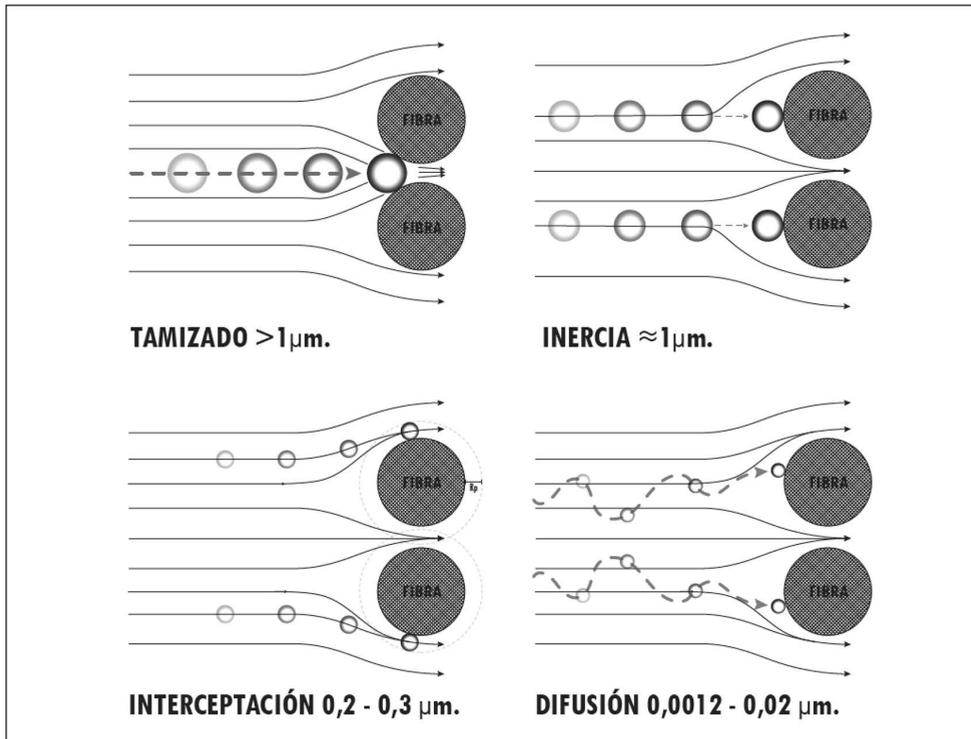


Figura 7.1. Mecanismos físicos en los que se basa el proceso de captura de partículas de un filtro.

- **Difusión.** Es el proceso que realiza el mayor porcentaje de la captura de las partículas y tiene una alta eficacia para las partículas más pequeñas, que van desde los 0,001 a 0,2 μm . Este tipo de partículas no sigue el flujo del movimiento de aire, sino que van cambiando continuamente de dirección mediante lo que se llama **movimiento browniano**. Ese cambio continuo de movimiento hace que aumente la probabilidad de que choque con la fibra y quede atrapada en ella.

En el rango de tamaños de partícula comprendido entre 0,2 y 0,3 μm , la eficacia de captación de cada tipo de filtro presenta un mínimo. Esto se debe a que, en este intervalo, las partículas son demasiado pequeñas para ser atrapadas por interceptación, pero demasiado grandes para ser retenidas por difusión, por lo que, al seguir el flujo del aire, pueden atravesar con mayor facilidad los filtros. Así, la norma UNE-EN-1822 [1] introdujo el concepto MPPS (tamaño de partícula más penetrante). MPPS es el tamaño de partícula para que el filtro de aire tenga su menor arrestancia (capacidad de un filtro de atrapar las partículas del aire) y, por tanto, es un dato característico de cada filtro en unas condiciones determinadas (figura 7.2). Este valor se utili-

za en las especificaciones de los filtros HEPA para definir a qué tipo de filtro pertenece.

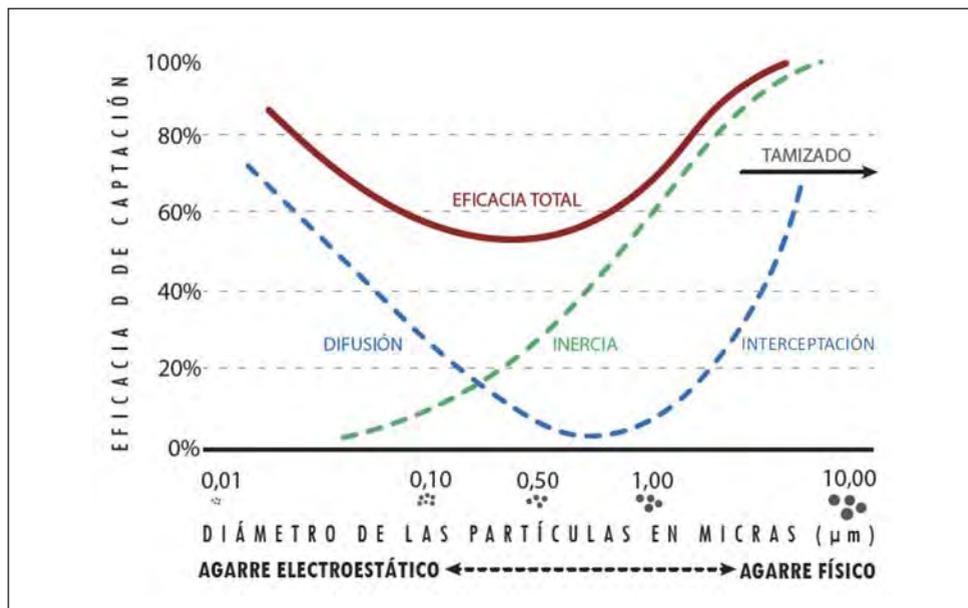


Figura 7.2. Curva de la eficiencia mínima de filtrado de un filtro según el tamaño de la partícula.

Inicialmente, el proceso de filtración se utilizó para proteger las instalaciones de la mala calidad del aire exterior cuando la actividad así lo requería, por lo que no se utilizaban unos estándares muy exigentes. Sin embargo, desde hace ya un tiempo también se emplea para proteger la salud, además de para evitar la falta de confort en las personas, ya que las partículas que quedan en suspensión en el aire pueden ser inhaladas y pasar al tracto respiratorio (de manera tanto más profunda, cuanto menor sea su tamaño), pudiendo generar problemas graves de salud, por lo que los niveles de exigencia en este caso son ya más rigurosos. Los filtros de alta eficiencia, ya sea en su versión HEPA o ULPA, se han utilizado en gran variedad de sectores, como el médico, el industrial, en transportes... Como ejemplo, están las salas blancas, quirófanos, laboratorios, recintos donde se trabaja con microelectrónica, aviones, etc. El uso de un tipo u otro de filtro va a estar relacionado con el nivel de exigencia en cuanto a la calidad del aire interior requerido. La pandemia de COVID-19 ha extendido su uso mediante equipos portátiles (PAC), que incluyen el bloque de filtrado completo en un solo equipamiento. En cualquier equipo, y mucho más en los de este tipo, es muy importante que el ajuste del filtro al soporte esté validado para evitar el paso de aire sin filtrar a través de las juntas.

El equipo portátil más básico que nos podemos encontrar en el mercado está formado por un prefiltro (utilizado para descargar de trabajo al filtro HEPA y evitar así su saturación y, por lo tanto, alargar su vida útil), que se encarga de atrapar las partículas de mayor tamaño (como polvo, pelusa, polen), y el filtro (EPA, HEPA, ULPA), que es el encargado de atrapar las partículas de menor tamaño (por ejemplo, virus, bacterias, polen, hongos, aerosoles). En la actualidad, estos equipos suelen montar un tercer filtro, de carbono activo, que se sitúa entre los dos anteriores y se encarga de adsorber gases, olores, tóxicos volátiles... En estos equipos, los distintos filtros (que suelen ser de forma rectangular o cilíndrica) normalmente van a ir dispuestos, de menor a mayor capacidad de retención (figura 7.3). Por último, tras los filtros, va el sistema de impulsión del aire que ya ha sido purificado.

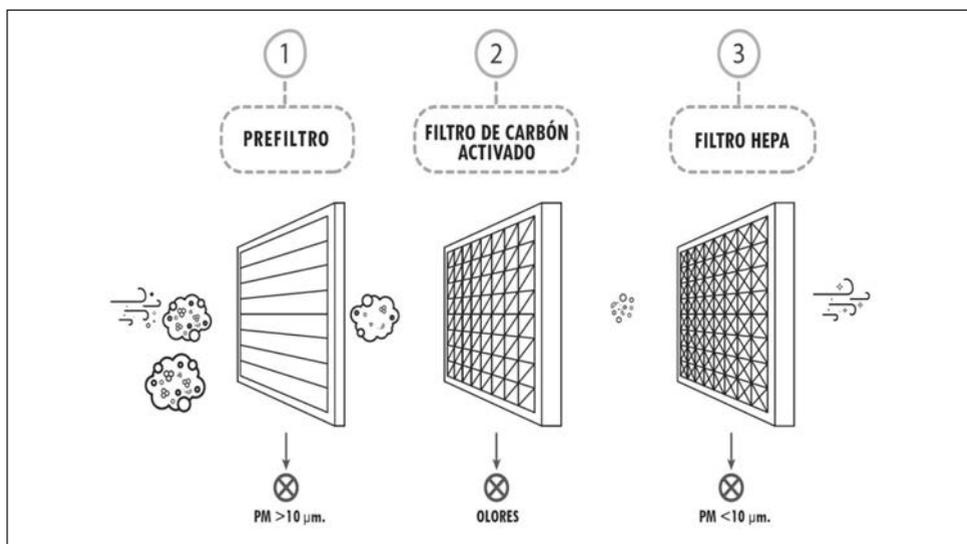


Figura 7.3. Etapas de filtrado habituales en un equipo portátil de purificación de aire (PAC).

Puede ser habitual que este tipo de aparatos incluya otro tipo de tecnologías complementarias (UV-C, fotocatalisis, generación de iones, ozono...), que en muchos de los casos pueden ser inmotivadas, siendo a veces incluso contraproducentes cuando trabajan en presencia de personas, pero, sobre todo, encarecen el producto innecesariamente.

7.3. Caudal necesario

Si hay algo fundamental a la hora de elegir en el mercado un aparato purificador, es que este tenga el caudal necesario para purificar el total del volu-

men del aire de una sala el número de veces necesario en función de la actividad que se vaya a realizar. CADR son las siglas de *clean air delivery rate*, que significa: tasa de entrega de aire limpio, es decir, la cantidad de aire que puede limpiar un filtro HEPA en un tiempo determinado. La ratio CADR se mide en metros cúbicos de aire por hora (m^3/h), y va a ser fundamental a la hora de elegir el aparato que mejor se adapte a nuestras necesidades. Por ejemplo, un purificador con filtro HEPA y CADR de $350 \text{ m}^3/\text{h}$ significa que es capaz de filtrar 350 metros cúbicos de aire en una hora.

Es cierto que cualquier filtro que se ponga en una dependencia va a ser mejor que nada, pero cuando hablamos de salud es fundamental que los equipos comprados sean realmente efectivos, y eso solo ocurre cuando están correctamente dimensionados. A lo largo de la pandemia de COVID-19, muchas personas se han lanzado a internet desesperadamente en búsqueda de purificadores con filtros HEPA (la mayoría de ellos son equipos portátiles para ser utilizados como mecanismo de autoprotección); sin embargo, en múltiples ocasiones no se ha realizado la compra teniendo en cuenta la importancia de este aspecto. Debido al desconocimiento, estos equipos no han sido elegidos en muchos casos en función del CADR, sino únicamente por la información genérica que aparecía en el anuncio correspondiente –según la declaración realizada por el vendedor con los metros cuadrados que supuestamente cubría el equipo–, afirmación que en muchas ocasiones no se ajustaba para nada a la realidad técnica. La compra de purificadores supone una gran inversión (solo hay que multiplicar el número de equipos para cada espacio que filtrar por el precio de cada uno de ellos para ver la cifra final), y nos podemos encontrar con que, si no se tiene en cuenta las características correctas que debe tener el equipo, los purificadores comprados no garantizan una filtración eficiente. Es más, puede generarse, asimismo, una falsa sensación de seguridad, al relajarse los usuarios por pensar que con el filtro HEPA ya está todo resuelto. Por tanto, lo recomendable, siempre que haya dudas, es ponerse en contacto con personal cualificado (lo mejor sería que dichas personas no tuvieran interés comercial) para que nos indiquen el tipo de equipo de purificación que mejor se adapta a las necesidades de cada uno de nuestros espacios que vayamos a proteger, adaptando su coste a lo estrictamente necesario.

De todas formas, elegir el tipo de equipo portátil que mejor se adapta a nuestras necesidades no es muy complicado; basta con seguir una serie de recomendaciones básicas. Lo primero que debemos conocer es el volumen del local en el que vamos a situar el equipo, así como el número de cambios de aire por hora (ACH) necesarios en función de la actividad que se vaya a realizar. Con esto, podemos calcular de una manera sencilla el caudal necesario.

Como normal general, lo primero que hay que hacer es calcular el volumen de la dependencia que purificar (V , en m^3). Para ello, multiplicamos el

largo (L , en m) por el ancho (A , en m) y por el alto (h , en m) de la sala, o bien multiplicamos la superficie de la dependencia por su altura. Por ejemplo (ecuación 1):

$$V = L \cdot A \cdot h = 10 \text{ m} \cdot 6 \text{ m} \cdot 2'5 \text{ m} = 150 \text{ m}^3 \quad \text{Ecuación 1}$$

El siguiente paso es conocer la tasa de renovación necesaria (ACH), es decir, cuántas veces a la hora se debe renovar el aire que hay en una habitación o dependencia según el tipo de local y la actividad que en él se realice. Para ello, se puede acudir a tablas ya existentes, como la de la norma DIN-1946 [4], donde se indica el número aconsejable de renovaciones de aire por hora en locales tipo (tabla 7.2). Por ejemplo, para el aula de una escuela, los valores de acuerdo con esta tabla varían entre cinco y siete renovaciones por hora, valores coincidentes con los recomendados por la Escuela de Salud Pública de Harvard [5], que aconseja cinco cambios de aire por hora, mientras que la OMS recomienda seis.

Así, la tasa de entrega de aire limpio ($CADR$, en m^3/h), que, como hemos visto, no es nada más que la cantidad de aire (en m^3) por hora que el filtro HEPA debe filtrar para conseguir el número de cambios de aire recomendados, se obtiene multiplicando el volumen del local (V , en m^3) por el número de renovaciones de aire por hora requerido (ACH , en h^{-1}), como se muestra en la ecuación 2:

$$CADR = V \cdot ACH = 150 \text{ m}^3 \times 5 = 750 \text{ m}^3/\text{h} \quad \text{Ecuación 2}$$

Esto significa que un aula de 150 m^3 , que necesita cinco renovaciones de aire por hora, debería equiparse con un purificador que tuviese un caudal de $750 \text{ m}^3/\text{h}$.

Sin embargo, encontrar en el mercado un purificador con filtro HEPA portátil con un caudal de $750 \text{ m}^3/\text{h}$ por un precio asequible es prácticamente imposible. Por ese motivo, normalmente se suele combinar la ventilación natural con la filtración. Si hay que renovar el aire cinco veces cada hora como en el caso anterior, se pueden realizar las siguientes combinaciones, a modo de ejemplo:

- 3 ACH con ventilación natural + 2 ACH con filtro HEPA.
- 2 ACH con ventilación natural + 3 ACH con filtro HEPA.
- Etc.

Incluso aunque el volumen del local fuera pequeño y el filtro HEPA tuviera un caudal suficiente para que por sí solo cubriera el número de renovacio-

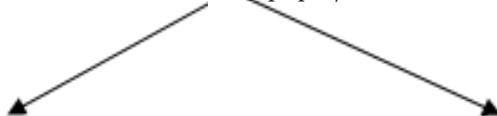
Tabla 7.2. Renovaciones de aire por hora aconsejadas por tipo de local, según norma DIN 1946

Sector terciario		Sector industrial	
Tipo de local	Renovaciones de aire por hora	Tipo de local	Renovaciones de aire por hora
Auditorios	6-8	Almacenes	5-10
Aulas	5-7	Cabinas de pintura	25-50
Bibliotecas	4-5	Cocinas industriales	15-30
Cámaras blindadas	3-6	Fundiciones	8-15
Casinos	8-12	Inodoro	8-15
Cocinas profesionales	15-30	Laboratorios	8-15
Despachos de reuniones	6-8	Laminadores	8-12
Discotecas	10-12	Locales de aerógrafos	10-20
Garajes	5	Locales de decapado	5-15
Gimnasios	4-6	Remojos	≤ 80
Habitaciones hotel	3-8	Salas de fotocopias	10-15
Inodoro terciario	8-15	Salas de máquinas	10-40
Lavanderías	10-20	Talleres de gran alteración del aire	10-20
Oficinas	4-8	Talleres de poca alteración del aire	3-6
Piscinas	3-4	Talleres de montaje	4-8
Restaurantes	8-12	Talleres de soldadura	20-30
Salas de conferencias	6-8	Tintorerías	5-15
Salas de espera	4-6		
Salas de reuniones	5-10	Sector residencial/doméstico	
Teatros y cines	5-8	Tipo de local	Renovaciones de aire por hora
Tiendas	4-8	Armarios roperos	4-6
Vestuarios	6-8	Cocinas	10-15
		Cuartos de baño	5-7
		Duchas	15-25
		Habitaciones	3-8
		Inodoro	4-5

nes de aire por hora requeridas, también debería complementarse con ventilación natural, ya que el filtro HEPA solo elimina las partículas y aerosoles (retirando carga viral del ambiente), pero no disminuye la concentración de CO₂, el cual, en concentraciones elevadas, puede afectar a la capacidad de concentración de los ocupantes, así como provocar dolores de cabeza, somnolencia, mareos...

Una cuestión práctica relacionada con lo anterior es que a veces es interesante conocer cómo se puede calcular el número de veces que renueva el aire un filtro HEPA de un determinado caudal. La respuesta a esta pregunta es muy sencilla: dividiendo la tasa de entrega de aire limpio del filtro HEPA (CADR) entre el volumen del local que filtrar.

$$\text{ACH} = \text{CADR del equipo} / \text{volumen.}$$



Si el CADR de un purificador con filtro HEPA es 500 m³/hr. y el volumen es 150 m³,
 $\text{ACH} = 500 / 150 = 3,3$ veces.

Así, con un filtro de dicho caudal se puede renovar 3,3 veces el aire de la habitación o local, por lo que el resto de ACH que faltan se debería complementar con ventilación natural.

Existe otra opción mucho más sencilla para calcular la tasa de entrega de aire limpio (CADR) que debe tener un purificador de aire con filtro HEPA. En este caso, lo único que hay que hacer es acudir a una de las numerosas calculadoras web que se pueden encontrar, algunas de las cuales están basadas en las recomendaciones de la Escuela de Salud Pública de Harvard, y en las que solo se requiere introducir las dimensiones de la habitación o local en cuestión y el número de cambios de aire por hora que se precisan.

Por último, otra alternativa a valorar para conseguir los 750 m³/h requeridos en nuestro equipo de filtración del ejemplo anterior es utilizar varios equipos purificadores con filtros HEPA, de forma que la suma de los caudales de cada uno sea igual al caudal total necesario. Además, esta elección tiene la ventaja añadida de permitir tomar el aire en varios puntos distintos de la habitación o local, mejorando así la efectividad real, a lo que habría que sumar que dos equipos más pequeños suelen ser más económicos que uno de gran tamaño, por lo que esta opción también debería ser tenida en cuenta.

7.4. Mantenimiento de un equipo

Si es importante para un equipo de filtración portátil que se monte un filtro adecuado a las necesidades de la actividad que se vaya a realizar y que disponga de un caudal proporcional al volumen de aire que filtrar, otro elemento crucial en la filtración es realizar un mantenimiento adecuado de los filtros.

Un estudio conjunto realizado por Prevención Docente y el LIFTEC-UNIZAR/CSIC observó qué ocurre con un filtro HEPA portátil de tipo comercial una vez que ha sido utilizado el tiempo de uso recomendado por el fabricante y cuál es la pérdida de efectividad asociada.

La experiencia consistía, por una parte, en analizar la cantidad de partículas atrapadas en un filtro tras seis meses de uso –tiempo de vida útil recomendado por el fabricante– y, por otra, en averiguar la pérdida de carga que sufre un equipo a medida que se va llegando al final del período de uso aconsejado (figura 7.4). En la primera parte, para una misma tarea –como era la actividad escolar realizada en varias aulas de similar volumen y parecido número de alumnos por clase– se observaron dos patrones claramente diferenciados en función de la ventilación de cada una de las aulas:

- En aulas donde se midieron niveles de CO₂ más bajos y, por lo tanto, con mejor ventilación natural, se observó que los purificadores acumulaban una gran cantidad de partículas en el prefiltro.
- En aulas con peor ventilación, los equipos acumulaban –por lo menos aparentemente en su exterior– muchas menos partículas.

Una de las curiosidades encontradas fue que, al quitar la capa de partículas acumuladas en los prefiltros de los equipos del primer patrón –es decir, los



Figura 7.4. Evolución de un filtro HEPA a lo largo de su vida útil, con retirada de la capa de partículas acumuladas en su prefiltro.

que recogieron mayor cantidad de partículas–, solo suponían el 35% del peso total de las partículas que quedaban retenidas en el purificador, a pesar de que era la capa más aparente y se podría haber pensado que, por tanto, debería haber sido la más pesada. Pero lo más llamativo resultó ser que, independientemente del patrón de ventilación de la dependencia, en ambos casos los filtros HEPA tenían un peso muy parecido –una vez eliminada la capa exterior de partículas atrapadas en los prefiltros–. Así, en los equipos del primer patrón –los que atrapaban una gran cantidad de partículas en el prefiltro–, dos de cada tres partículas retenidas en el equipo lo hacían en filtro HEPA, y no en el prefiltro, que es lo que pudiera parecer a simple vista; mientras que en los equipos del segundo patrón –los que atrapaban una menor cantidad de partículas en el prefiltro–, casi todas las partículas eran retenidas por el filtro HEPA.

En la segunda parte del estudio, LIFTEC-UNIZAR/CSIC pudo comprobar la pérdida de eficiencia progresiva del filtro –que supone la pérdida de carga del aparato– a medida que las partículas se iban quedando depositadas en el filtro. En su estudio se pudo observar como el caudal de un equipo de 320 m³/h pasó a 289 m³/h tras dos o tres meses trabajando a caudal mínimo, y a 212 m³/h al final del tiempo de uso recomendado del filtro. En la última parte de su estudio también observaron que la simple limpieza de las partículas retenidas en el prefiltro del equipo provocaba un incremento de caudal en este hasta volver a alcanzar valores de 273 m³/h.

De estas experiencias se concluye que, si se dimensiona un purificador con filtro HEPA con valores muy ajustados a los requeridos en función del volumen de aire que filtrar, a medida que el filtro va reteniendo partículas, se va produciendo una pérdida de carga que va a hacer que trabaje con valores por debajo de los recomendados. Otra conclusión es la importancia de cambiar los filtros –siguiendo las recomendaciones del fabricante– cuando estos se van degradando al llegar al final de su vida útil, ya que la mayor parte de las partículas –además, las más peligrosas por su tamaño– quedan atrapadas en el filtro HEPA, donde es muy difícil su limpieza.

7.5. Verdades y mentiras de los filtros HEPA portátiles

A lo largo de la pandemia de COVID-19, y ante el generalizado desconocimiento de este tipo de equipos, están circulando –a veces interesadamente– numerosas afirmaciones que poco o nada se ajustan a la realidad. Por ello, vamos a intentar desmontar una serie de mitos relacionados con este tipo de tecnología que incluyen los equipos portátiles de filtración:

- Es falso que sea complicado poner en funcionamiento desde cero un purificador con filtro HEPA. Simplemente se ha de desembalar, enchufar a

la corriente eléctrica, pulsar el botón de encendido, y el equipo empieza a funcionar. Asimismo, hay modelos que se gestionan mediante una aplicación por el móvil y otros no.

- Es falso que un purificador con filtro HEPA sea un dispositivo peligroso, ya que generalmente consisten en una caja en cuyo interior hay un ventilador con un filtro de alta eficiencia, siendo imposible que accidentalmente se pueda acceder a las aspas del ventilador.
- Es falso que su funcionamiento sea complejo. Simplemente, el sistema de impulsión succiona el aire de la sala, obligándolo a pasar a través del filtro de alta eficiencia, atrapando estas partículas y aerosoles, dejando pasar los gases (aire, CO₂...).
- Es falso que para dimensionar correctamente un purificador portátil con filtro HEPA sea obligatorio recurrir a personal especializado. Como hemos visto en este capítulo, existen calculadoras que, sabiendo el volumen de la sala y el nivel de ventilación requerido, calculan automáticamente el caudal necesario.
- Es verdadero que los purificadores con filtros HEPA retiran material particulado y aerosoles, como se puede comprobar midiendo con un simple contador de partículas a la entrada y salida del equipo, por lo que pueden retirar carga viral del aire si este contiene aerosoles potencialmente infectivos.
- Es verdadero que los filtros HEPA pueden recoger partículas por debajo de 1 µm (el virus mide 0,1/0,5 µm). Como se puede observar en la figura 7.5, dichos filtros atrapan partículas de aire incluso más pequeñas que el tamaño del propio virus.
- Es verdadero que los filtros HEPA retienen el SARS-CoV-2 en su interior, como así lo demuestra el estudio realizado por Villanueva *et al.* [6], en el que identificaron restos de dicho virus sobre la fibra de vidrio de filtros HEPA instalados en distintos ambientes interiores, validando, además, un método para detectar la presencia de ARN del SARS-CoV-2 en dicho tipo de filtros, por lo que incluso podría ser un sistema utilizado para la vigilancia del virus.
- En este estudio [6], realizado desde el punto de vista de la prevención, pudo identificarse a una persona contagiada tras realizarse 36 PCR tanto a los residentes como al personal sanitario de una residencia, después de que el filtro HEPA diera positivo en SARS-CoV-2.
- Es falso que los purificadores con filtros HEPA disminuyan las concentraciones de CO₂ que hay en el aire, puesto que es un gas y, por lo tanto, simplemente atraviesa el filtro. Esto se puede comprobar fácilmente colocando para ello un medidor de CO₂ a la entrada y otro a la salida del equipo (las medidas serán iguales). Por ese motivo sigue siendo importante ventilar y utilizar los equipos de filtración como una capa más de protección.

- Es cierto –como ya se ha indicado en este capítulo– que es mejor poner dos purificadores con filtros HEPA cuyos caudales sumen el caudal necesario que usar uno solo con dicho caudal total, ya que así toman el aire potencialmente nocivo en varios puntos distintos de la sala.
- Es cierto que el principal problema de los purificadores con filtros HEPA es el nivel de ruido que generan (normalmente, a mayor CADR, mayor potencia sonora emitida). A medida que nos vamos alejando del aparato, el nivel de ruido (presión sonora) disminuye y se va confundiendo con el nivel de ruido general que pueda haber en la sala.
- Es falso que poner dos purificadores con filtros HEPA en lugar de uno duplique el nivel de ruido (presión sonora). Al colocar dos purificadores del mismo caudal, el ruido solo aumenta 3 dB(A).
- Es cierto que el purificador con filtro HEPA siempre debe trabajar a máximo caudal, que es para el que fue dimensionado. En el modo automático, los equipos trabajan a menor caudal y disminuyen mucho su efectividad a cambio de trabajar con menor ruido.
- La posición ideal para que el equipo portátil trabaje es dejando espacio libre a su alrededor –pues con ello se favorece la entrada de aire en su interior– y situándolo en la zona central de la sala (si hay varios se dispondrán de forma estratégica), un poco levantados del suelo.
- Es verdadero que el uso de purificadores con filtros HEPA está recomendado por entidades como el Ministerio de Sanidad y el Ministerio de Transición Ecológica de España [7], la Escuela de Salud Pública de Harvard [5] o el CSIC [8].

Por último, es importante indicar que los filtros HEPA no hacen «magia», ya que nunca van a filtrar el aire al 100%; por lo tanto, deben considerarse como una capa más de protección, que siempre debería ir acompañada de la ventilación correspondiente del local.

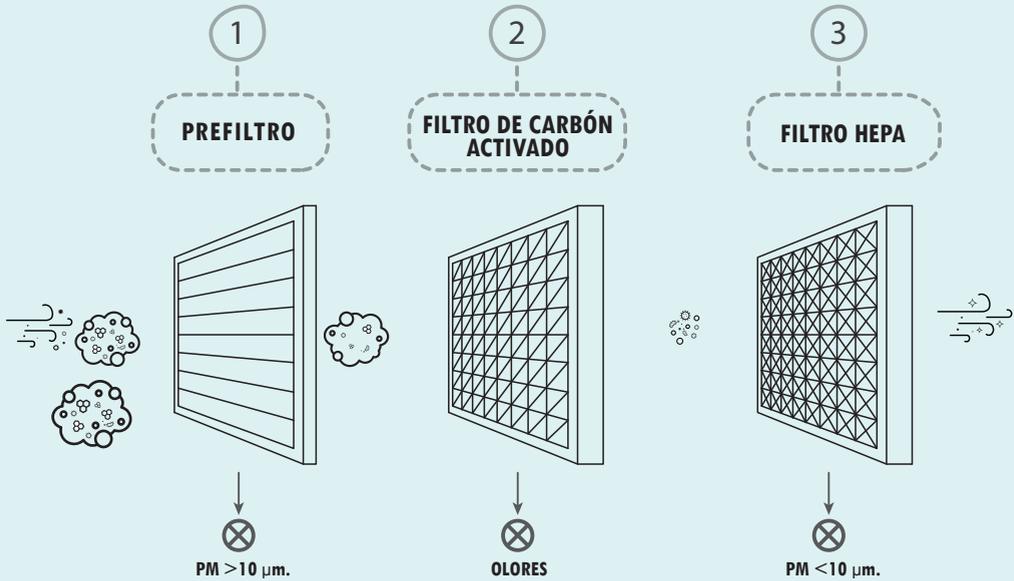
Referencias

- [1] AENOR, *UNE-EN 1822-1:2020. Filtros absolutos (EPA, HEPA y ULPA). Parte 1: clasificación, principios generales del ensayo y marcado*. Madrid, AENOR, 2020. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?Tipo=N&c=N0063134>
- [2] A.-A. E. de N. y Certificación, *UNE-EN 779:2013. Filtros de aire utilizados en ventilación general para eliminación de partículas. Determinación de las prestaciones de los filtros*. Madrid, AENOR, 2013.
- [3] A.-A. E. de N. y Certificación, *UNE-EN ISO 16890-1:2017. Filtros de aire utilizados en ventilación general. Parte 1: especificaciones técnicas, requisitos*

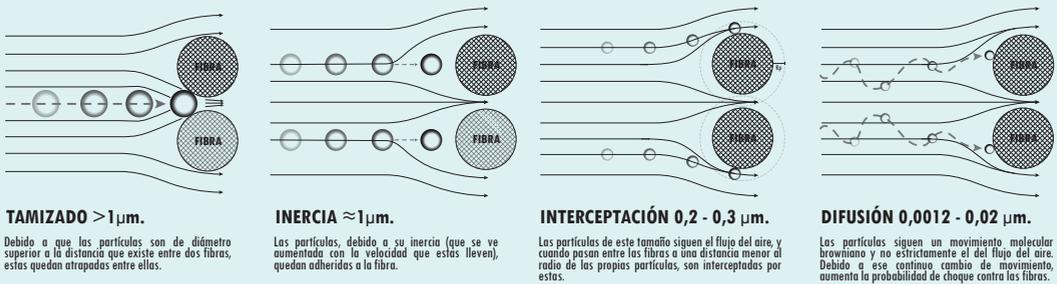
- y clasificación según eficiencia basado en la materia particulada (PM). Madrid, AENOR, 2017. <https://tienda.aenor.com/norma-une-en-iso-16890-1-2017-n0058514>
- [4] AENOR. Asociación Española de Normalización y Certificación, *DIN 1946-2:1994-01. Ventilation and air conditioning; technical health requirements (VDI ventilation rules)*. Madrid, AENOR, 1994. <https://tienda.aenor.com/norma-din-1946-2-1994-01-2204739>
- [5] J. Allen, J. Spengler, E. Jones y J. Cedeno-Laurent, *5-step guide to checking ventilation rates in classrooms*. Cambridge (EE.UU), 2020. <https://schools.forhealth.org/wp-content/uploads/sites/19/2020/08/Harvard-Healthy-Buildings-program-How-to-assess-classroom-ventilation-08-28-2020.pdf>
- [6] F. Villanueva, A. Notario, B. Cabañas, P. Martín, S. Salgado y M. F. Gabriel, «Assessment of CO₂ and aerosol (PM_{2.5}, PM₁₀, UFP) concentrations during the reopening of schools in the COVID-19 pandemic: the case of a metropolitan area in Central-Southern Spain», *Environ. Res.*, vol. 197, 2021, doi: 10.1016/j.envres.2021.111092.
- [7] Ministerio de Sanidad y Ministerio de transición ecológica de España, *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*. Madrid, 2020. https://www.sanidad.gob.es/profesionales/saludPublica/ccayes/alertasActual/nCov/documentos/Recomendaciones_de_operacion_y_mantenimiento.pdf
- [8] M. de la C. Minguillón, X. Querol, J. M. Felisi y T. Garrido, *Guía para ventilación en aulas*, 2020, doi: 10.20350/digitalCSIC/12677.

CAPÍTULO 7

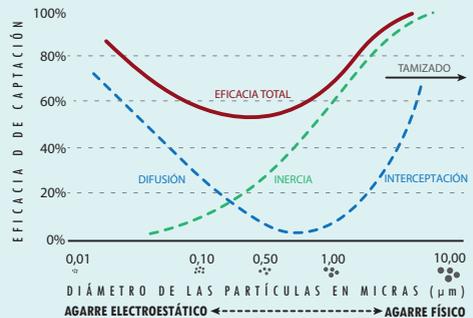
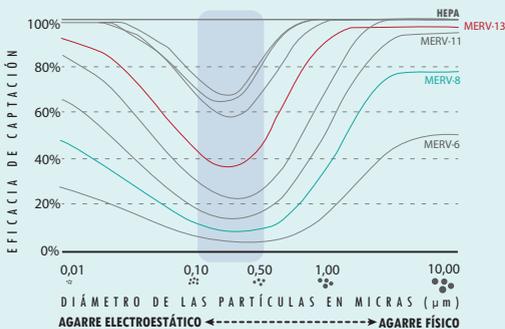
CAPACIDAD DE FILTRADO



CAPTACIÓN DE PARTÍCULAS



TASA DE EFICACIA



Ventilación e infiltraciones en viviendas

JESSICA FERNÁNDEZ-AGÜERA
 MIGUEL ÁNGEL CAMPANO
 SAMUEL DOMÍNGUEZ-AMARILLO
 IGNACIO ACOSTA
 Escuela Técnica Superior de Arquitectura,
 Universidad de Sevilla (US), Sevilla, España.

Lista de acrónimos

A área de suelo.

A_w área de ventana.

CCD (ventilación), continua, cruzada y distribuida.

CO₂ dióxido de carbono.

CTE código técnico de la edificación.

DB documento básico (código técnico de la edificación, CTE).

HE exigencias básicas de ahorro de energía (código técnico de la edificación, CTE).

H_s altura existente entre huecos en fachadas enfrentadas.

HS exigencias básicas de salubridad.

IAQ calidad del aire interior (acrónimo del inglés *indoor air quality*).

NBE normativa básica de edificación.

NTE normas tecnológicas de la edificación.

n_{50} relación del cambio de aire con una presión diferencial de 50 Pa.

PCA análisis de componentes principales (acrónimo del inglés *principal component analysis*).

ppm partes por millón.

P presión.

P_w perímetro de ventanas.

T_a temperatura del aire.

$T_{a,i}$ temperatura del aire interior.

$T_{a,o}$ temperatura del aire exterior.

v velocidad meteorológica del viento.

v_a velocidad del aire en el interior.

VMC ventilación mecánica controlada.

α constante de cambio de aire para viviendas plurifamiliares.

γ_A coeficiente de ponderación del área de suelo (*area*).

γ_{AW} coeficiente de ponderación del área de ventanas (*windows area*).
 γ_{PW} coeficiente de ponderación del perímetro de ventanas (*windows perimeter*).
 β_K coeficiente de ponderación de cocina (*kitchen*) separada.
 β_B coeficiente de ponderación por persianas exteriores (*blinds*).
 β_E coeficiente de ponderación por la exposición de la envolvente (*exposure*).
 β_F coeficiente de ponderación según el tipo de fachada (*facade*).
 β_M coeficiente de ponderación según el estado de conservación (*maintenance*).
 β_W coeficiente de ponderación según el tipo de ventana (*window*).
 β_{WB} coeficiente de ponderación por la ventana del baño (*window bath*).
 β_{WS} coeficiente de ponderación según la severidad del invierno (*winter severity*).

8.1. Introducción

Como se ha discutido en capítulos anteriores, la ventilación consiste en el proceso de renovar el aire de un recinto mediante aporte de aire exterior, sustituyendo, con ello, el aire viciado interior. Con esto se consigue mejorar la calidad del aire interior (IAQ). Ventilando, por tanto, se pueden diluir hasta niveles aceptables los contaminantes emitidos en el interior con el fin de conseguir una atmósfera interior adecuada.

Esta necesidad de renovar el ambiente interno con aire exterior puede derivar –en función de las condiciones climatológicas externas– en un incremento del consumo energético requerido para acondicionar el espacio a condiciones de confort. En este punto es donde se necesita determinar qué factores se pueden mejorar y conciliar al mismo tiempo, con el doble objetivo de reducir la demanda energética asociada al acondicionamiento térmico, por un lado, y de mejorar sensiblemente la calidad ambiental de estos espacios interiores mediante la ventilación, por otro [1].

8.2. Formas de ventilación más comunes en viviendas

La renovación del aire interior puede realizarse de múltiples formas, de entre las que destacan principalmente:

- Ventilación natural:
 - Por infiltraciones a través de la envolvente
 - Mediante apertura de ventanas
 - Por tiro inducido (efecto chimenea)
- Ventilación mecánica controlada (VMC):
 - Extracción mecánica por núcleos húmedos (flujo simple)
 - Admisión y extracción mecánica (doble flujo)

8.2.1. Ventilación natural

Cuando un recinto se ventila naturalmente, el aire se renueva por la diferencia de presión entre el exterior y el interior mediante el paso del aire a través de las ranuras y oquedades de los cerramientos y elementos de la envolvente constructiva –infiltraciones incontroladas–, así como por ventanas o puertas cuando estas son abiertas de forma voluntaria.

También es posible potenciar esta entrada de aire a través de la envolvente mediante conductos de tiro inducido en los núcleos húmedos (cocinas y baños), los cuales, aprovechando el efecto chimenea, fomentan una corriente de aire ascendente que genera una depresión en los ambientes interiores que es equilibrada por un mayor aporte de aire exterior por la envolvente.

En los edificios de viviendas, los principales elementos impulsores de movimiento del aire a través de la envolvente son:

- El efecto chimenea (figura 8.1): estratificación del aire caliente debido a la presión de flotabilidad, dependiente del salto térmico existente en el aire del recinto ($T_{a,i}$).
- La presión del viento en las fachadas, que podrá ser positiva o negativa.
- El salto térmico entre el aire del interior del recinto ($T_{a,i}$) y el exterior ($T_{a,o}$).
- El tamaño y posición de las aberturas y grietas en la envolvente. La posición relativa entre estas es especialmente relevante en el caso de la ventilación cruzada, ya que la diferencia de altura existente entre los huecos de dichas fachadas enfrentadas (H_s) puede potenciar el efecto chimenea (figura 8.1), en caso de estar la abertura de entrada enfrentada a la dirección dominante del viento.

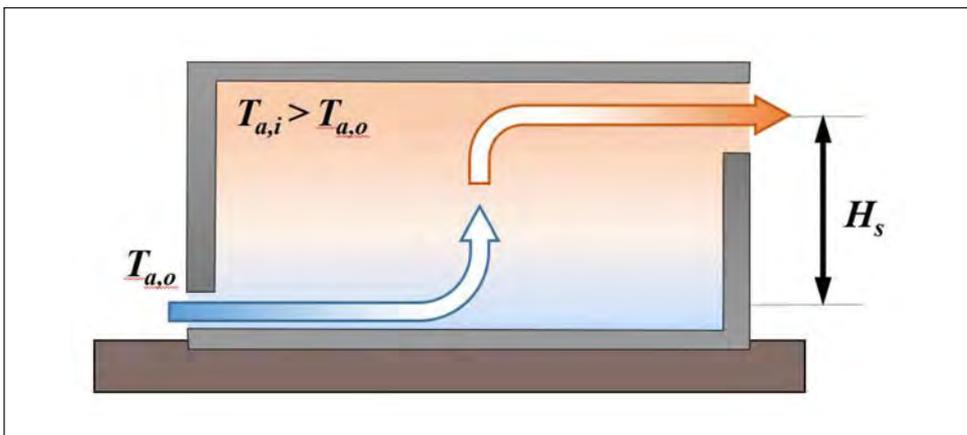


Figura 8.1. Ventilación cruzada con disposición de huecos que potencian el efecto chimenea.

- Las fugas por conductos de tiro forzado al exterior, que están también influenciadas por el efecto chimenea. (Se explica con más detalle en el apartado 2.1.3).
 - Los dispositivos/mecanismos de extracción puntuales de procesos de combustión.
 - La ventilación mecánica actuando en otras zonas del edificio.
- Todos estos factores que influyen en la ventilación –y su cálculo matemático– se explican con más detalle en el anejo K de Campano [2].
- Asimismo, el empleo de la ventilación natural conlleva lo siguiente:

- Esta no es controlable, ni homogénea o continua.
- Se puede producir una falta de confort térmico por la presencia de corrientes de aire (por frío o calor, estratificación o velocidad del aire) o por alteración general de la temperatura del ambiente interior.
- Puede haber un posible aumento del gasto energético para mantener condiciones de confort térmico en situación de invierno o verano (en caso de que el sistema de climatización tenga capacidad para neutralizar la demanda térmica incrementada).
- Puede producir la entrada de ruido, agua, polen, contaminantes, polvo, insectos, aves, etc., procedentes del exterior.

Ventilación por infiltraciones a través de la envolvente

La ventilación de un espacio mediante infiltraciones se produce cuando el aire del exterior penetra en el interior del recinto a través de rendijas (*crack*) y otras aberturas no intencionadas de la envolvente. Las infiltraciones, o flujo de aire incontrolado que penetra en los edificios, dependen de la permeabilidad al aire de los cerramientos y de las diferencias de presión entre el interior y el exterior. Para que exista una fuga de aire (infiltración o exfiltración) debe haber tanto una comunicación directa entre interior y exterior en la envolvente como una fuerza motriz (diferencia de presión) [1].

Este caudal de entrada no controlado a través de la envolvente, de naturaleza variable, puede ser insuficiente para lograr una adecuada ventilación en viviendas, ya sea para mantener una adecuada calidad del aire o para evitar el riesgo de proliferación de moho.

Estanqueidad al aire

Para poder caracterizar el nivel de infiltraciones en un recinto, es necesario definir previamente el concepto de estanqueidad al aire de su envolvente. Esta es la resistencia al flujo de aire a través de los distintos componentes que conforman dicha envolvente. Habitualmente se expresa a través de los siguientes parámetros básicos:

- Flujo de aire a 50 Pa (V_{50}), en m³/h.
- Tasa de renovación de aire a 50 Pa (n_{50}), en h⁻¹.
- Área efectiva de fuga (ELA), en m².

Evaluación de la estanqueidad

El método más comúnmente aceptado en la comunidad científica para la evaluación de la estanqueidad es el ensayo de presurización y despresurización, denominada como *blower door test* [3, 4]. Este se basa en el empleo de un ventilador que extrae o impulsa aire (*blower*) y está montado en un marco de puerta adaptable y estanco al paso del aire –a modo de puerta (*door*)–. Este permite conocer parámetros relacionados con la estanqueidad al aire a 50 Pa de presión respecto al exterior, empleando la ecuación de flujo [5-7]. Otro método igualmente utilizado para la estimación de la estanqueidad al aire es el de gases trazadores, de mayor complejidad y que requiere mayor instrumentación y tiempo de desarrollo. El valor añadido de este último es que permite conocer la estanqueidad al aire de las viviendas en el momento de la medida a presión atmosférica –lo que puede llegar a compensar su mayor dificultad–. La tabla 8.1 recoge los principales resultados de algunos de los ensayos de estanqueidad al aire realizados en Europa.

Análisis mediante modelos predictivos estadísticos

El análisis estadístico mediante regresión de baterías de ensayos con *blower door* ha servido para desarrollar varios modelos predictivos de estanqueidad al aire basados en los parámetros constructivos y morfológicos de las edificaciones. Entre estos, destacan los de Chan *et al.* [8] y Sherman [9] en EE.UU, el de Yoshino en Japón [10], el de Mochida [11] en China, el de Montoya [12] en viviendas unifamiliares en Cataluña y el de Fernández-Agüera [1, 13-15] en viviendas plurifamiliares en el área mediterránea.

Asimismo, el anejo H del *Documento básico sobre ahorro de energía del código técnico de la edificación* (CTE-DB HE) incluye un método predictivo para determinar la permeabilidad al aire del edificio a 50 Pa (n_{50}). Sin embargo, este método puede resultar demasiado genérico e impreciso para caracterizar el comportamiento de una vivienda, especialmente en el caso de edificios existentes, por lo que se desaconseja su utilización para propósitos de análisis relacionados con la infiltración y la ventilación de las viviendas. Por ello, en la sección 4 de este capítulo se detalla el modelo predictivo estadístico para viviendas plurifamiliares en área mediterránea de Fernández-Agüera *et al.* [15], mucho más preciso y detallado, dada la mayor muestra de estudio inicial y las variables analizadas, que permiten una mayor definición de sus componentes morfológicos y singularidades regionales.

Tabla 8.1. Estudios de estanqueidad al aire en Europa

País	Año	N.º ensayos	n_{50} (h^{-1})			Referencia
			media	mínimo	máximo	
Alemania	2012	27	1,21	0,01	4,7	Papaglastra 2008) [16]
Bélgica	1995-1998	51	7,8	1,8	25	Kalamees (2006) [17]
	2008-2012	21	4,99	0,5	22,5	Papaglastra (2008) [16]
Estonia	1999-2000	19	9,6	4,9	32	Kalamees (2006) [17]
	2003-2005	32	4,9	0,7	14	Kalamees (2006) [17]
	2005-2007	21	3,2	0,7	8,1	Kalamees (2006) [17]
	2005-2007	16	2,8	0,4	5,5	Kalamees (2006) [17]
España	2013	-	2,6	-	-	Meiss (2013) [18]
	2013	13	4,8	2,3	9,1	Sordo (2013) [19]
	2013	120	3,4	1,9	5,8	Tiberio (2013) [20]
	2019	98	6,96	3,23	14,14	Fdez.-Agüera (2019) [15]
	2019	53	7,51	3,88	13,39	Fdez.-Agüera (2019) [15]
Finlandia	1981-1998	171	5,9	1,6	18	Kalamees (2006) [17]
	2002-2004	100	3,9	0,5	8,9	Kalamees (2006) [17]
	2012	128	2,54	0,3	16,2	Papaglastra (2008) [16]
Francia	2012	644	3,38	0,04	60,96	Papaglastra (2008) [16]
Grecia	2005	40	6,7	1,87	13,1	Sfakianaki (2008) [21]
Holanda	2012	218	1,48	0,06	6,2	Papaglastra (2008) [16]
Irlanda	2011	28	9,6	5,4	14,9	Dyer (2011)
Italia	2011	20	7,3	3,2	23,3	d'Ambrosio (2011) [22]
Noruega	1980	61	4,7	2	8	Kalamees (2006) [17]
	1984	10	4	3,3	5,4	Kalamees (2006) [17]
	2012	17	1,09	0,17	2,79	Papaglastra (2008) [16]
Portugal		24	6,75	2,4	12,3	Ramos (2015) [23]
Reino Unido	2012	471	13,1	2	30	Kalamees (2006) [17]
Suecia	1978	205	3,7	-	-	Kalamees (2006) [17]
	2012	44	1,02	-	-	Kalamees (2006) [17]

Ventilación mediante apertura de ventanas

La ventilación mediante apertura de ventanas, que habitualmente actúa como complemento de las infiltraciones incontroladas por la envolvente, depende principalmente de dos factores físicos de naturaleza dinámica (figura 8.2) [24]:

- Diferencia de temperatura del aire entre el interior y el exterior (ΔT_a). A mayor diferencia entre estas, mayor será el flujo de salida de aire caliente por estratificación (diferencia de densidad) y, por tanto, mayor la entrada de aire frío en el caso del invierno, siendo prácticamente nulo su efecto en periodo cálido –para viviendas convencionales y alturas reducidas de sus techos–.
- Dirección y presión del viento. Ya sea positiva o negativa, esta variable depende, a su vez, de múltiples factores, como la ubicación y el entorno, la estación del año, los vientos predominantes y su velocidad efectiva, la forma del edificio, la altura del recinto, etc.

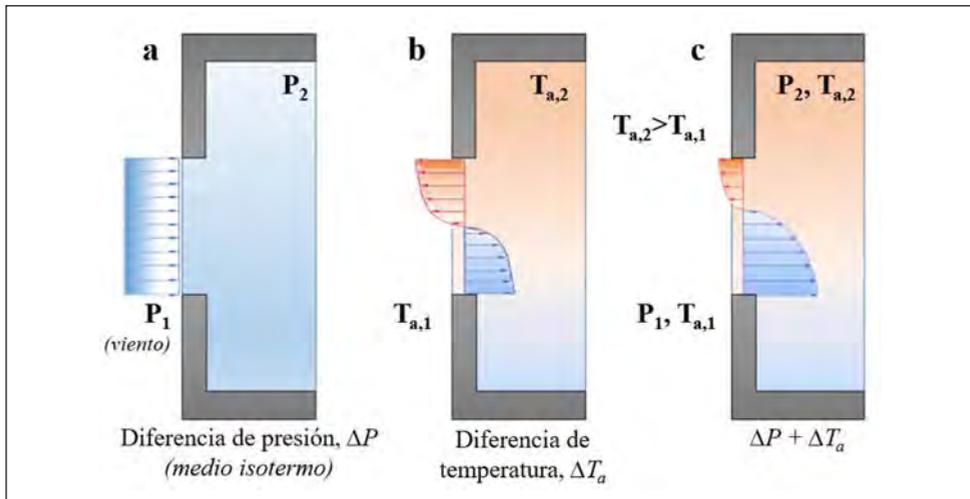


Figura 8.2. Fenómenos físicos por los que se produce la ventilación natural a través de huecos: a) diferencial de presión (viento); b) diferencial de temperatura entre interior y exterior; c) combinación de diferencial de temperatura interior-exterior y diferencial de presión [2].

Así, el caudal de ventilación será mayor en días de invierno con viento, mientras que se reducirá notablemente en días de entretiempo/verano sin viento, llegando incluso a presentar valores marginales durante los periodos de estancamiento térmico y, por tanto, no produciendo ventilación apreciable¹.

1. La renovación de aire en estos casos es prácticamente despreciable, incluso con las ventanas completamente abiertas, debido al equilibrio energético entre el interior y el exterior.

Por otra parte, la eficacia de la ventilación de un recinto a la hora de barrer toda su superficie depende de la disposición de los huecos en su envolvente [2]:

- Ventilación unilateral. Se considera que una vivienda tiene ventilación unilateral si sus huecos están en la misma fachada o en fachadas adyacentes del recinto. Su capacidad de penetración es limitada, al no inducirse el movimiento del aire por no estar estos huecos sometidos a diferente presión; por eso pueden generarse «fondos de saco» en los recintos o viviendas con este tipo de ventilación, donde la renovación del aire es notablemente menor (figura 8.3a).
- Ventilación cruzada. Si la vivienda dispone de huecos en fachadas opuestas, de forma que tengan diferentes condiciones de presión de viento, entonces se considera que tiene una ventilación cruzada. Además, si dichas fachadas opuestas son transversales a la dirección dominante del viento, aumentará la eficacia de esta ventilación (figura 8.3b). Esto puede combinarse con disponer los huecos a alturas diferentes (con el más bajo enfrentado a la dirección dominante del viento) para potenciar el efecto de tiro térmico.

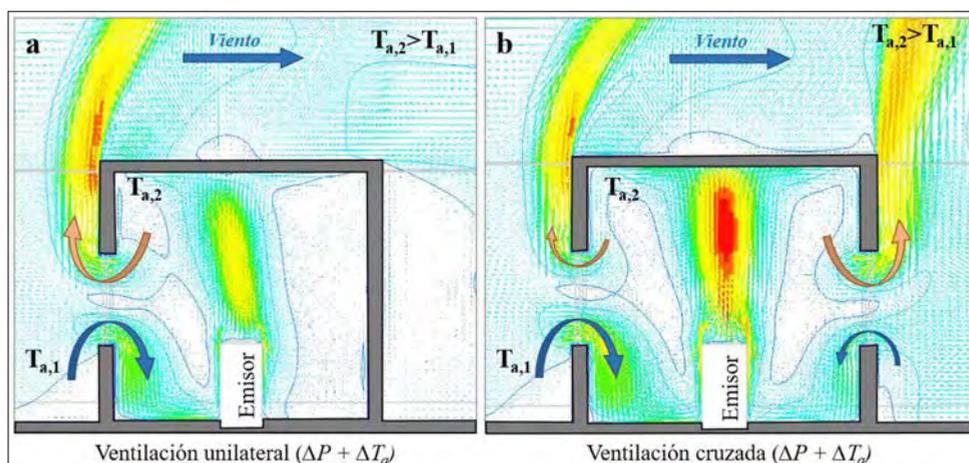


Figura 8.3. Ventilación en un recinto: a) ventilación unilateral; b) ventilación cruzada [2].

Un factor muy importante que influye en la ventilación en nuestra región climática es el comportamiento de los usuarios con respecto a la apertura no controlada de ventanas a lo largo del día. Esta depende de muchos factores, como pueden ser los siguientes [9, 25]:

- Densidad de ocupación. Normalmente la apertura de las ventanas se incrementa cuando el número de ocupantes es mayor.

- Temperatura exterior del aire. A igualdad de otras condiciones, la apertura de las ventanas decrece a medida que la temperatura exterior es más fría.
- Orientación solar. La apertura de las ventanas es mayor en las orientaciones que tienen incidencia solar significativa.
- Hora del día. Cuando las viviendas están desocupadas las ventanas suelen estar cerradas.
- Velocidad del viento. La apertura de las ventanas decrece cuando aumenta la velocidad del viento –presencia de corrientes de aire–.
- Días de la semana. Las ventanas están abiertas más frecuentemente los fines de semana que los días laborables debido al aumento de permanencia en la vivienda de los ocupantes.
- Fumadores. Las ventanas de los edificios cuyos ocupantes son fumadores se abren el doble de veces que las de usuarios que no lo son.

Ventilación por tiro inducido (efecto chimenea)

La ventilación por tiro forzado se basa en el empleo de un conducto vertical en el que, por efecto del diferencial térmico y de la altura de columna (tiro térmico), se potencia la evacuación del aire por estratificación en los recintos a los que esta se conecta (habitualmente, baños y cocina). Ello genera una depresión en dichos recintos, por lo que se produce una entrada de aire exterior, ya sea por infiltraciones a través de cerramientos y carpinterías o por ventanas abiertas (figura 8.4a), tal como se recogía en las ya derogadas normas tecnológicas de la de edificación (NTE). De esta forma, el aire que entra por los recintos en contacto con el exterior se utiliza para ventilar los locales húmedos (ventilación por barrido).

Por otra parte, la presión de viento también puede fomentar la renovación de aire exterior de este sistema de ventilación, ya sea por su acción sobre las fachadas (ventilación transversal) como por las bocas de expulsión de los conductos verticales de tiro forzado (efecto Venturi). Sin embargo, a pesar de que este sistema es capaz de potenciar el flujo de entrada de aire de renovación exterior, proveniente tanto de infiltraciones incontroladas como de la apertura de ventanas, sigue siendo dependiente de las condiciones climáticas externas (viento y salto de temperatura entre interior y exterior), con lo que no garantiza una adecuada renovación del aire interior.

8.2.2. Ventilación mecánica controlada

En la ventilación mecánica controlada (VMC), la renovación del aire se produce por la actuación de equipos mecánicos dispuestos al efecto (habitualmente, ventiladores). Por ello, si está correctamente diseñada y dimensionada, es el único método de ventilación capaz de garantizar la correcta y continua renovación de aire en todos los espacios de la vivienda, para así obtener

un ambiente saludable. Esto es especialmente relevante en el caso de viviendas, ya que, con el objeto de evitar acumulación de contaminantes, esta ventilación debe funcionar las 24 horas del día y los 365 días del año.

Esta ventilación mecánica controlada puede realizarse mediante flujo simple (extracción o admisión mecánica) o por doble flujo (combinación de extracción y admisión mecánicas). Esta última permite la incorporación de técnicas adicionales de control como el filtrado de la corriente de aporte o la recuperación de calor del flujo de extracción.

Extracción mecánica por núcleos húmedos (flujo simple)

Los sistemas de flujo simple por extracción mecánica fuerzan la salida del aire en los locales húmedos (cocina, baños y aseos) mediante la acción de un ventilador (trabajando por depresión). Con ello provoca una entrada de aire exterior a través de la envolvente de los locales secos (dormitorios y salón) para compensar la reducción de la presión de aire creada en los locales húmedos (figura 8.4b).

Dado que este sistema se suele emplear en edificios de nueva construcción, la permeabilidad al aire de la envolvente y carpinterías es reducida [26], con lo que la entrada de aire exterior por depresión en los locales secos se ha de realizar habitualmente mediante aberturas de admisión fijas en las fachadas o carpinterías exteriores, denominadas «aireadores», que se ubican a un mínimo de 1,80 m del suelo (a fin de evitar corrientes de aire molestas para los ocupantes). Además, para facilitar el paso del flujo de aire entre recintos, las particiones o puertas entre estancias con admisión y aquellas con extracción han de disponer de aberturas de paso (figura 8.4b).

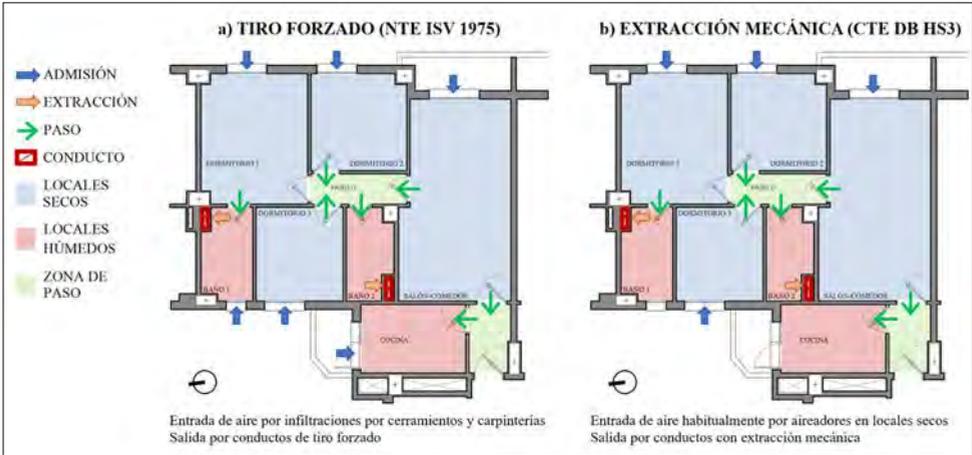


Figura 8.4. Comparativa entre ventilación natural por tiro forzado (a) y extracción mecánica (b).

La admisión de aire a través de infiltraciones o apertura de ventanas sigue siendo según temperatura del exterior, lo que puede provocar un desequilibrio en las condiciones térmicas y de confort de la vivienda, así como un incremento del consumo energético.

Admisión y extracción mecánica (doble flujo)

En vivienda, la instalación de un sistema de doble flujo, dotado de dos ventiladores para extracción e impulsión de aire exterior –que reproducen el esquema de tránsito del aire desde los locales secos a los húmedos que generan los sistemas de un solo flujo por extracción mecánica–, suele ir vinculado al uso de un recuperador de calor, aunque pueden existir sistemas simples. Su empleo permite tomar la energía del aire que se va a expulsar y, sin mezclarse, cedérsela al aire de renovación exterior que se va a introducir en la vivienda (figura 8.5).

Asimismo, el aire exterior entra atemperado en el recinto/equipo de tratamiento térmico por acción del recuperador. Su uso permite tanto mejorar las condiciones de confort térmico y bienestar de los ocupantes (corrientes de aire, caudal de ventilación mínimo garantizado), como reducir en gran medida el consumo energético debido a la ventilación.

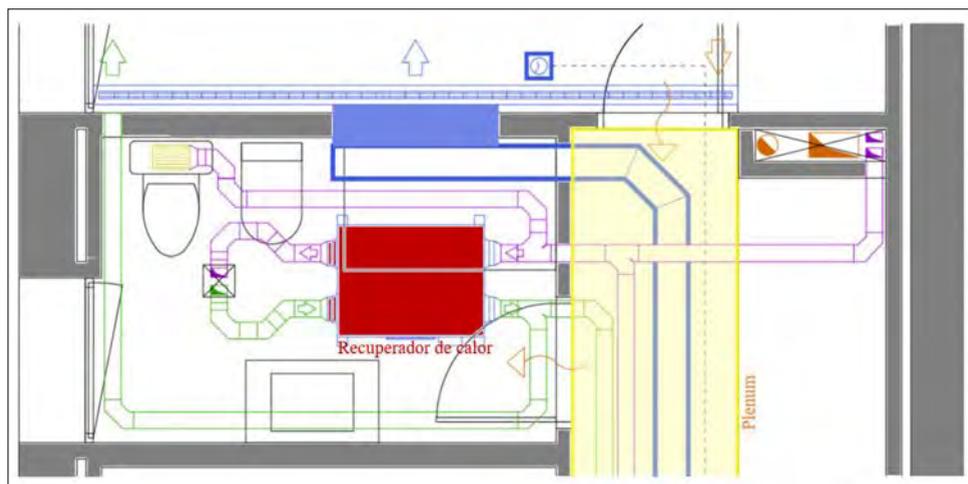


Figura 8.5. Ventilación mecánica en viviendas mediante sistema con recuperación de calor.

Estos equipos pueden dotarse de filtros (para reducir la entrada de partículas exteriores contaminantes) y de sensores de CO₂ (para la regulación del caudal de aire exterior según las necesidades del recinto, pudiendo disminuir aún más el consumo energético).

8.4. Normas y guías de aplicación

El empleo de los métodos de ventilación en viviendas aparece recogido y tabulado en las diversas normativas y directrices existentes, tanto actuando por separado como siendo utilizadas de forma combinada. Estas normas y modelos de ventilación existentes en el entorno europeo tradicionalmente han partido del supuesto de que los ocupantes de un espacio cerrado son los contaminadores principales/ exclusivos. Sin embargo, a partir de las normas elaboradas en 2007 (EN 15251:2007 [27] –derogada por la EN 16798-1:2019 [28], así como la UNE 171330-1:2008 [29]) –, se incluyen los contaminantes de fuente interior (materiales y mobiliario en su mayoría) como causantes principales de la contaminación del aire interior, cuyos componentes químicos hay que diluir de igual manera que los producidos por los ocupantes.

Así, para hacer una estimación de los requisitos de ventilación de los edificios, entre los que se encuentran los residenciales, es necesario considerar la carga total de contaminantes, incluyendo la causada por los propios materiales constructivos, los ocupantes y sus actividades.

8.4.1. Norma española

Tradicionalmente, la ventilación se basaba, sobre todo, en el flujo de aire a través de los huecos de la envolvente. Este flujo estaba condicionado por el gradiente térmico interior-exterior, la diferencia de presión por altura debido a la estratificación del aire (nivel de presión neutral) y la diferencia de presiones de viento incidente y de presión-succión en las fachadas.

La primera norma al respecto, aunque sin carácter de obligado cumplimiento, formaba parte de las normas tecnológicas de la edificación (NTE), concretamente la NTE ISV 1975 [30]. Este conjunto de normas fue de aplicación voluntaria, al poderse adoptar otros estándares y condiciones equivalentes que cumpliesen igualmente las disposiciones básicas. En esta norma se planteaba el uso de conductos de tiro forzado por efecto chimenea, que podía ser común al conjunto vertical de viviendas plurifamiliares, siempre que la conexión a este se realizara mediante un conducto individual de al menos dos metros desde la toma hasta la desembocadura en el colector.

La posterior norma básica de edificación (NBE) CT 1979 [31], también de ámbito nacional, no mencionaba condiciones exigibles como tal en cuanto a caudales de ventilación o para garantizar la salubridad de los edificios. Así, la citada NTE ISV 75 fue la única referencia española para la edificación residencial que dictó las condiciones para una adecuada ventilación, dentro de este tipo de edificación.

La VMC no había sido exigida a nivel normativo en España hasta la entrada en vigor en 2006 del *Código técnico de la edificación* (CTE) [32]. En el artícu-

lo 13 de la parte 1, se hace referencia a las exigencias básicas de salubridad (HS), entre las que se destaca la «exigencia básica HS 3: calidad del aire interior». En este documento básico (DB) HS3 se dispone que, en los edificios de viviendas, trasteros y garajes, se debe poder ventilar adecuadamente eliminando los contaminantes con el objetivo de aportar la renovación de aire suficiente para garantizar la salubridad de este tipo de espacios. Asimismo, se cuantificaban los caudales mínimos de ventilación de cada espacio –el diseño del sistema de ventilación– y se establecían criterios de diseño, de dimensionado, construcción y mantenimiento, pero no se plantean niveles interiores máximos de contaminantes. Estos caudales mínimos de ventilación de cada espacio de la unidad de vivienda se han reajustado en la modificación del CTE de 2017 y mantenido en la de 2022 [26] en función del número de dormitorios y comedores/salas de estar (locales secos) de la vivienda (tabla 8.2).

Tabla 8.2. Caudales mínimos para ventilación de caudal constante en locales habitables [26]

N.º de dormitorios en la vivienda	Locales secos ^{1,2}			Locales húmedos ²	
	Dormitorio principal	Resto de dormitorios	Salas de estar y comedores ³	Mínimo en total	Mínimo por local
0 o 1	8	-	6	12	6
2	8	4	8	24	7
3 o más	8	4	10	33	8

1. En los locales secos de las viviendas destinados a varios usos se considera el caudal correspondiente al uso para el que resulte un caudal mayor.

2. Cuando en un mismo local se den usos de local seco y húmedo, cada zona debe dotarse de su caudal correspondiente.

3. Otros locales pertenecientes a la vivienda con usos similares (salas de juego, despachos, etc.).

Esta norma tiene como objetivo final –planteado en el capítulo 1– que en los locales habitables de las viviendas se aporte un caudal de aire exterior suficiente para conseguir que, en estos, la concentración anual de CO₂ sea inferior a 900 ppm, logrando, asimismo, que el acumulado anual de CO₂ que exceda el valor de 1,600 ppm sea menor que 500.000 ppm · h.

Este sistema de ventilación mecánica controlada puede ser:

- De caudal constante, con un caudal mínimo según la tabla 8.2.
- De caudal variable controlado, en el que se debe utilizar algún sistema que permita modular el caudal según la necesidad, como detectores de presencia, detectores de contaminantes, medición de CO₂ o programación temporal.

Asimismo, cabe destacar que las directrices de ventilación del documento CTE DB HS3 responden a unos mínimos prestacionales. De esta forma, el

empleo de un sistema de ventilación mecánica controlada de doble flujo con recuperación de calor es perfectamente aplicable en estos espacios. Así, es posible garantizar un caudal mínimo de aire de renovación exterior durante todo el día, controlando los niveles promedio límite de concentración de CO_2 , a la vez que permite aumentar las prestaciones de la vivienda por la recuperación de la energía térmica del aire expulsado.

La figura 8.6 muestra la evolución de los tres sistemas de extracción empleados en la normativa nacional, desde la NTE ISV 1975 hasta el vigente CTE DB-HS3.

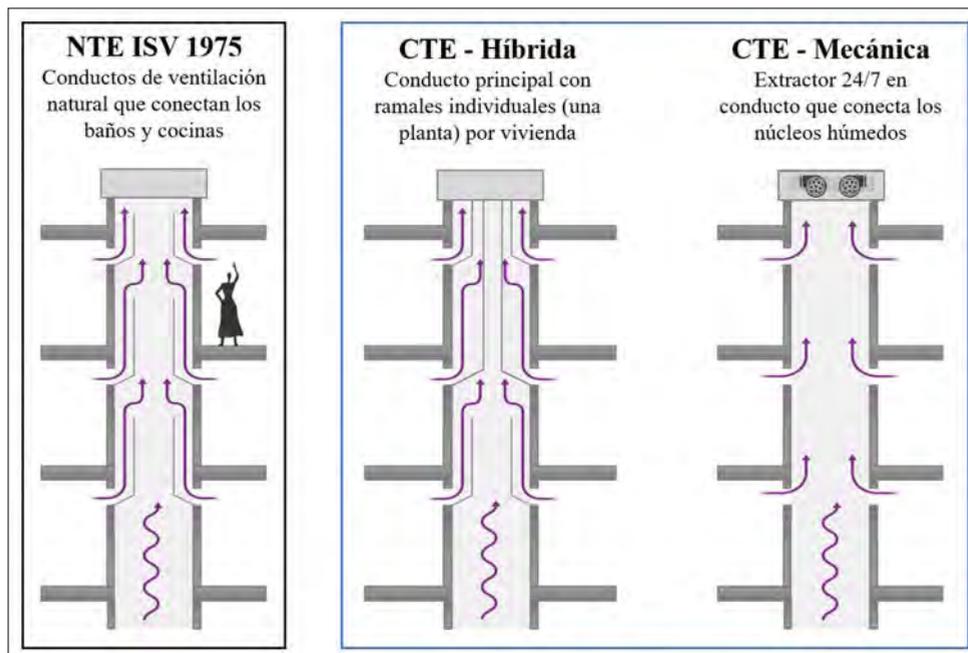


Figura 8.6. Ventilación de viviendas mediante conductos de tiro forzado en núcleos húmedos.

Por otra parte, el CTE [26] exige que se disponga de un sistema de extracción para la zona de cocción en la cocina, que ha de ser necesariamente independiente de la red de ventilación general de la vivienda, y con capacidad de extraer un mínimo de 50 l/s.

8.4.2. Regulaciones en Europa, Canadá y Estados Unidos

La tabla 8.3 resume diferentes normas y estándares relacionados con la ventilación requerida en los edificios de viviendas en Europa, Canadá y Estados Unidos [25].

Tabla 8.3. Regulaciones sobre ventilación en viviendas en otros países [25, 33], recopilada en [1]

País	Tasa de ventilación	Sala de estar	Dormitorio	Cocina	Baño	Aseo
Canadá	>0,3 h ⁻¹ , 5 l/s persona			50 l/s (inter) 30 l/s (cont)	25 l/s (inter) 15 l/s (cont)	
Nueva Zelanda	0,34 h ⁻¹			50 l/s (inter) o 12 l/s (cont) o ventanas practicables	25 l/s (inter) o 10 l/s (cont) o ventanas practicables	
EE.UU	0,05 (área) +3,5 l/s persona			50 l/s (inter) o 5 ACH (cont) o ventanas practicables	25 l/s (inter) o 10 l/s (cont) o ventanas practicables	
Alemania	<50 m ² 60 m ³ /h <80 m ² 90 m ³ /h <800 m ² 120 m ³ /h	1-1,5 h ⁻¹		40 m ³ /h	40 m ³ /h	20 m ³ /h
Bélgica		Admisión	Admisión	Extracción	Extracción	Extracción
		1 l/s/m ²	1 l/s/m ²	1 l/s/m ²	1 l/s/m ²	25 m ³ /h
		Min 75 m ³ /h	Min 25 m ³ /h	Min 50 m ³ /h	Min 50 m ³ /h	
		Máx 150 m ³ /h	Máx 36 m ³ /h	Máx 75 m ³ /h	Máx 75 m ³ /h	
Dinamarca	0,5 h ⁻¹			Extracción 20 l/s	Extracción 15 l/s	Extracción 10 l/s
Finlandia		0,5 l/s·m ²	Min 4 l/s·persona 0,7 l/s·m ²	Extracción 20 l/s	Extracción 15 l/s	
Francia				20-45 m ³ /h (cont) 75-135 m ³ /h (inter)	15-30 m ³ /h	15-30 m ³ /h
Grecia		Min 8,5 m ³ /h·persona		Min 8,5 m ³ /h·persona	Min 34 m ³ /h·persona	
Italia	0,35-0,5 h ⁻¹	40 m ³ /h·persona	40 m ³ /h·persona	Extracción 4 h ⁻¹	Extracción 4 h ⁻¹	
Noruega	>0,5 h ⁻¹					

Paises Bajos	0,9 dm ³ /s·m ²	0,9 dm ³ /s·m ²	21 dm ³ /s	14 dm ³ /s	7 dm ³ /s
Suecia	0,35 l/s·m ²	4 l/s·cama	Extracción		
			10 l/s		
Suiza	15 m ³ /h·persona				

8.5. Modelo predictivo para viviendas plurifamiliares en área mediterránea

En el momento actual podemos disponer de un modelo estadístico de predicción de la hermeticidad en edificios multifamiliares de la región mediterránea. Este procedimiento ha sido desarrollado por Fernández-Agüera *et al.* [15] y está igualmente disponible como herramienta de cálculo [34]. Está compuesto por dos modelos de comportamiento diseñados para estimar la hermeticidad en viviendas construidas desde 1980 hasta la fecha (modelo predictivo 1) o previas a 1979² (modelo predictivo 2). Ambos módulos están basados en un conjunto de parámetros edificatorios y de localización fácilmente accesibles, como la severidad climática, la exposición de la envolvente, la presencia de ventanas en el baño y el tipo de fachada; parámetros que quedan recogidos y descritos en la tabla 8.4.

La medición, tomada a partir de una muestra aleatoria estratificada, se realizó mediante ensayos de *blower door* estándar, siguiendo la metodología desarrollada por Fernández-Agüera *et al.* [35] y los intervalos de diferencial de presión descritos en la ISO 9972 [36].

A partir de esta muestra, se identificaron agrupaciones de viviendas muy similares entre sí, que a su vez fueran significativas y claramente diferentes del resto de viviendas de la muestra. Asimismo, se realizó un análisis de componentes principales (PCA) para establecer qué variables descriptivas eran las de mayor importancia en la morfología de la muestra. A partir de esta información, se desarrolló y validó un modelo de regresión lineal múltiple, que establece la relación entre una variable dependiente (la permeabilidad al aire) y un conjunto de variables independientes (como el año de construcción, las condiciones climáticas, la tipología, la superficie, etc.).

Adicionalmente, estos modelos fueron validados mediante comparación con los valores de permeabilidad al aire obtenidos en otras viviendas evaluadas en el proyecto INFILES [38].

2. En el año 1979 es cuando entran en vigor las primeras normas generalizadas de ahorro energético en viviendas en España (NBE CT-79).

Los dos modelos generados con esta metodología (agrupación de viviendas desde 1980 hasta la fecha y agrupación de viviendas anteriores a 1979) son de aplicación al ámbito de viviendas plurifamiliares ubicadas en zonas climáticas mediterráneas (focalizadas en el sur de España), con área útil inferior a 105 m² y una superficie de ventanas menor a 17 m², como son la gran mayoría de las viviendas colectivas del ámbito nacional, en especial aquellas con algún tipo de protección pública.

Tabla 8.4. Parámetros del modelo predictivo 1 de n_{50} [15]

Elemento	Descripción	Elemento	Descripción
E1	Edificios adosados alineados linealmente con cuatro viviendas por planta	F1	Fábrica de ladrillo de un pie o de pie y medio
E2	Edificios adosados alineados linealmente con dos viviendas por planta	F2	Hoja exterior de 1/2 pie de ladrillo (o de un pie) + cámara de aire + hoja interior de ladrillo hueco
E3	Edificios de galería abiertos	F3	Hoja exterior de 1/2 pie de ladrillo (o de un pie) + aislamiento + hoja interior de ladrillo hueco
E4	Edificios altos independientes	F4	Hoja exterior de 1/2 pie de ladrillo (o de un pie) + cámara de aire + hoja interior de cartón yeso
E5	Edificios adosados alineados linealmente con dos plantas por edificio, ubicados en la esquina del conjunto o en edificios independientes con plantas en forma de H, T o X	F5	Aplacado cerámico + cámara de aire + aislamiento + bloque de termoarcilla
WS A	Severidad de zona climática A según CTE DB HE [26] y De la Flor [37]	W1	Ventanas batientes
WS B	Severidad de zona climática B según CTE DB HE [26] y De la Flor [37]	W2	Ventanas correderas
WS C	Severidad de zona climática C según CTE DB HE [26] y De la Flor [37]	W3	Ventanas batientes y correderas

8.5.1. Modelo predictivo para viviendas plurifamiliares desde 1980 hasta el presente

El primer modelo, planteado para viviendas construidas desde 1980 hasta la fecha, se plantea mediante regresión múltiple paso a paso. Destacan en este las variables de ubicación, morfología, construcción y geometría, incluyendo en esta tanto la superficie de ventanas como el perímetro de estas, como puntos de entrada del aire exterior por infiltraciones (ecuación 1) [15, 34].

$$n_{50} = \alpha + \gamma_{AW} \cdot A_W + \gamma_{PW} \cdot P_W + \beta_K + \beta_B + \beta_{WB} + \beta_{WS} + \beta_W + \beta_E + \beta_F \quad \text{Ecuación 1}$$

donde:

n_{50} es la relación del cambio de aire con una presión diferencial de 50 Pa (h^{-1}).

α es la constante de cambio de aire para viviendas plurifamiliares (h^{-1}).

γ_{AW} es el coeficiente de ponderación del área de ventanas (h^{-1}/m^2).

A_W es el área de ventana (m^2).

γ_{PW} es el coeficiente de ponderación del perímetro de ventanas (h^{-1}/m).

P_W es el perímetro de ventanas (m).

β_K es el coeficiente de ponderación de cocina separada (h^{-1}).

β_B es el coeficiente de ponderación por persianas exteriores (h^{-1}).

β_{WB} es el coeficiente de ponderación por la ventana del baño (h^{-1}).

β_{WS} es el coeficiente de ponderación según la severidad del invierno (h^{-1}).

β_B es el coeficiente de ponderación por persianas exteriores (h^{-1}).

β_E es el coeficiente de ponderación por la exposición de la envolvente (h^{-1}).

β_F es el coeficiente de ponderación según el tipo de fachada (h^{-1}).

La tabla 8.5 recoge los valores para los coeficientes del modelo predictivo 1 de n_{50} .

Tabla 8.5. Coeficientes del modelo predictivo 1 de n_{50} [15]

Coefficiente	Categoría	Valor	Desviación estándar
Constante (α)		6.613	± 1.624
Área de ventana (γ_{AW})		1.265	± 0.218
Perímetro de ventana (γ_{PW})		-0.387	± 0.070
Cocina separada (β_K)	Sí	-1.698	± 0.922
	No	0.000	± 0.000
Persianas exteriores (β_B)	Sí	1.957	± 1.051
	No	0.000	± 0.000
Ventana del baño (β_{WB})	Sí	1.498	± 0.315
	No	0.000	± 0.000
Severidad del invierno (β_{WS})	WS A	*	*
	WS B	4.143	± 0.368
	WS C	0.618	± 0.618
Tipo de ventana (β_W)	W1	-5.154	± 0.600
	W2	-2.445	± 0.493
	W3	*	*

Exposición (θ_β)	E1	-0.075	± 0.473
	E2	-0.620	± 0.665
	E3	-1.558	± 0.588
	E4	-2.570	± 0.664
	E5	*	*
Tipo de fachada (θ_β)	F3	1.179	± 0.619
	F4	-0.838	± 0.668
	F5	*	*

* Variable ya incluida en la constante α (pasa a tomar el valor de 1).

8.5.2. Modelo predictivo para viviendas plurifamiliares desde 1954 hasta 1979

El segundo modelo se aplica a viviendas plurifamiliares construidas entre 1954 y 1979. En él, las variables de superficie de vivienda y grado de conservación tuvieron una mayor importancia frente a otras, como tipo, superficie y perímetro de ventanas o presencia de persianas. Este modelo queda descrito mediante la ecuación 2 [15, 34].

$$n_{50} = \alpha + \gamma_A \cdot A + \beta_{WB} + \beta_M + \beta_F + \beta_E + \beta_{WS} \quad \text{Ecuación 1}$$

donde:

n_{50} es la relación del cambio de aire con una presión diferencial de 50 Pa (h^{-1}).

γ_A es el coeficiente de ponderación del área de suelo (h^{-1}/m^2).

A es el área de suelo (m^2).

β_M es el coeficiente de ponderación según el estado de conservación (h^{-1}).

La tabla 8.6 recoge los valores para los coeficientes del modelo predictivo 2 de n_{50} .

Tabla 8.6. Coeficientes del modelo predictivo 2 de n_{50} [15]

Coefficiente	Categoría	Valor	Desviación estándar
Constante (α)		3,607	$\pm 1,448$
Área de suelo (γ_A)		0,048	$\pm 0,021$
Ventana del baño (β_{WB})	Sí	2,220	$\pm 0,549$
	No	0,000	$\pm 0,000$

Estado de conservación (θ_M)	Deficiente	5,971	$\pm 0,829$
	Buenas condiciones	*	*
	Rehabilitado energéticamente	-4,611	$\pm 1,309$
Tipo de fachada (θ_f)	F1	2,711	$\pm 0,554$
	F2	*	*
Exposición (θ_e)	E1	-0,399	$\pm 0,976$
	E2	-1,805	$\pm 0,711$
	E3	**	**
	E4	-0,968	$\pm 0,919$
	E5	*	*
Severidad del invierno (θ_{WS})	WS A	*	*
	WS B	2,578	$\pm 0,486$
	WS C	2,699	$\pm 0,730$

* Variable ya incluida en la constante α (pasa a tomar el valor de 1).

** Tipología no contemplada en la muestra de estudio de la categoría 2.

Referencias

- [1] J. Fernández-Agüera Escudero, *Caracterización de la estanqueidad al aire de la vivienda social en Andalucía*. Sevilla, Universidad de Sevilla, 2018. <https://idus.us.es/handle/11441/77154>
- [2] M. A. Campano, *Confort térmico y eficiencia energética en espacios con alta carga interna climatizados: aplicación a espacios docentes no universitarios en Andalucía* (tesis doctoral). Sevilla, Universidad de Sevilla, 2015. <https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/30632>
- [3] M. H. Sherman, «Estimation of infiltration from leakage and climate indicators», *Energy Build.*, vol. 10, n.º 1, pp. 81-86, 1987, doi: 10.1016/0378-7788(87)90008-9.
- [4] M. Sherman, «The use of blower-door data», *Indoor Air*, vol. 5, n.º 3, pp. 215-224, 1995, doi: 10.1111/j.1600-0668.1995.t01-1-00008.x.
- [5] Ashrae, «2005 ASHRAE handbook-fundamentals», *Physiology*, n.º 2002, p. 2005, 2005, doi: 10.1039/c1cs15219j.
- [6] ASHRAE, *ASHRAE handbook – fundamentals*. Atlanta, GA, 2009.
- [7] M. Liddament, «A review of European research into airtightness and air infiltration measurement techniques», *Meas. air leakage build. A symp. ASTM Comm. E-6 Perform. Build. Constr.*, n.º 904, pp. 407-415, 1986.

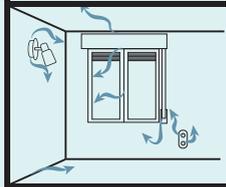
- [8] W. R. Chan, W. W. Nazaroff, P. N. Price, M. D. Sohn y A. J. Gadgil, «Analyzing a database of residential air leakage in the United States», *Atmos. Environ.*, vol. 39, n.º 19, pp. 3445-3455, 2005, doi: 10.1016/j.atmosenv.2005.01.062.
- [9] M. Sherman and J. McWilliams, «Air leakage of US Homes: model prediction», *Therm. Perform. Exter. Envel. Whole Build. X Int. Conf.*, p. 18, 2007.
- [10] H. Yoshino, «Airtightness and ventilation strategy in Japanese residences», *Energy Build.*, vol. 9, n.º 4, pp. 321-331, 1986, doi: 10.1016/0378-7788(86)90037-X.
- [11] A. Mochida, H. Yoshino, T. Takeda, T. Kakegawa y S. Miyauchi, «Methods for controlling airflow in and around a building under cross-ventilation to improve indoor thermal comfort», *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 93, n.º 6, pp. 437-449, 2005, doi: 10.1016/j.jweia.2005.02.003 ER.
- [12] M. I. Montoya, E. Pastor, F. R. Carrie, G. Guyot y E. Planas, «Air leakage in Catalan dwellings: Developing an airtightness model and leakage airflow predictions», *Build. Environ.*, vol. 45, n.º 6, pp. 1458-1469, 2010, doi: 10.1016/j.buildenv.2009.12.009 ER.
- [13] J. Fernández-Agüera, S. Domínguez-Amarillo y M. Á. Campano, «Characterising Draught in Mediterranean Multifamily Housing», *Sustainability*, vol. 11, n.º 8, p. 2433, 2019, doi: 10.3390/su11082433.
- [14] J. Fernández-Agüera, S. Domínguez-Amarillo, J. J. Sendra, R. Suárez y I. Oteiza, «Social housing airtightness in Southern Europe», *Energy Build.*, vol. 183, pp. 377-391, 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.10.041.
- [15] J. Fernández-Agüera, S. Domínguez-Amarillo, J. J. Sendra y R. Suárez, «Predictive models for airtightness in social housing in a Mediterranean region», *Sustain. Cities Soc.*, vol. 51, p. 101695, 2019, doi: 10.1016/j.scs.2019.101695.
- [16] M. Papaglastra, I. Leivada, K. Sfakianaki, F. R. Carrie y M. Santamouris, «International Comparison of Envelope Airtightness», *Euroaisches Blower Door Symp.*, n.º 1, pp. 3-11, 2008.
- [17] T. Kalamees, «Air tightness and air leakages of new lightweight single-family detached houses in Estonia», *Build. Environ.*, vol. 42, n.º 6, pp. 2369-2377, Jun. 2007, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2006.06.001.
- [18] A. Meiss, J. Feijó-Muñoz y M. A. García-Fuentes, «Age-of-the-air in rooms according to the environmental condition of temperature: a case study», *Energy Build.*, vol. 67, pp. 88-96, 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.08.016.
- [19] A. Sordo, *Estudio de infiltraciones en edificios residenciales de Castilla y León* (trabajo fin de máster). Valladolid, Universidad de Valladolid, 2013.
- [20] A. J. Tiberio y P. Branchi, «A study of air leakage in residential buildings», *2013 International Conference on New Concepts in smart cities: fos-*

- tering public and private alliances (SmartMILE)*, 2013, pp. 1-4. doi: 10.1109/SmartMILE.2013.6708180.
- [21] A. Sfakianaki, K. Pavlou, M. Santamouris, I. Livada, M.-N. Assimakopoulos, P. Mantas y A. Christakopoulos, «Air tightness measurements of residential houses in Athens, Greece», *Build. Environ.*, vol. 43, n.º 4, pp. 398-405, 2008, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2007.01.006.
- [22] D. F. R. Alfano, M. Dell'Isola, G. Ficco y F. Tassini, «Experimental analysis of air tightness in Mediterranean buildings using the fan pressurization method», *Build. Environ.*, vol. 53, pp. 16-25, 2012, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2011.12.017.
- [23] N. Ramos, R. Almeida, A. Curado, P. Pereira, S. Manuel y J. Maia, «Air-tightness and ventilation in a mild climate country rehabilitated social housing buildings. What users want and what they get», *Build. Environ.*, vol. 92, pp. 97-110, 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.04.016.
- [24] American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, *ASHRAE handbook-fundamentals*. Atlanta, GA (EE.UU), ASHRAE Handbook Committee, 2017.
- [25] J. McWilliams y M. H. Sherman, *Review of literature related to residential ventilation requirements*, 2007.
- [26] Ministerio de la Presidencia Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática del Gobierno de España, «Real Decreto 450/2022, de 14 de junio, por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación, aprobado por el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo.», BOE-A-2022-9848, Ministerio de la Presidencia Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática del Gobierno de España, 2022, p. 17.
- [27] AENOR. Asociación Española de Normalización y Certificación, *UNE-EN 15251:2008. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*. Madrid, AENOR, 2008.
- [28] AENOR, *UNE-EN 16798-1:2020. Eficiencia energética de los edificios. Ventilación de los edificios. Parte 1: parámetros del ambiente interior a considerar para el diseño y la evaluación de la eficiencia energética de edificios incluyendo la calidad del aire interior*. Madrid, AENOR, 2020. [<https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=norma-une-en-16798-1-2020-n0063261>]
- [29] AENOR, *UNE 171330-1:2008. Calidad ambiental en interiores. Parte 1: diagnóstico de calidad ambiental interior*. Madrid, AENOR, 2008. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?Tipo=N&c=N0063134>
- [30] Ministerio de la Vivienda del Gobierno de España, «Orden de 2 de julio de 1975 por la que se aprueba la Norma Tecnológica de la Edificación NTE-ISV/1975, 'Instalaciones de salubridad: Ventilación'», BOE-A-1975-14350,

- Madrid, Ministerio de la Vivienda del Gobierno de España, 1975, p. 11. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1975-14350>
- [31] España. Presidencia del Gobierno, «Real Decreto 2429/1979, de 8 de julio, por el que se aprueba la norma básica de edificación, NBE-CT-79, sobre condiciones térmicas en los edificios», BOE n.º 253, pp. 24524-24550, 1979. <https://boe.es/boe/dias/1979/10/22/pdfs/A24524-24550.pdf>
- [32] Ministerio de Fomento del Gobierno de España, «Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación», BOE-A-2006-5515, Ministerio de Fomento del Gobierno de España, 2006.
- [33] I. A. Sakellaris, D. E. Saraga, C. Mandin, C. Roda, S. Fossati, Y. de Kluizenaar, P. Carrer, S. Dimitroulopoulou, V. G. Mihucz, T. Szigeti, O. Häneninen, E. De Oliveira Fernandes, J. G. Bartzis y P. M. Bluysen, «Perceived indoor environment and occupants' comfort in European 'Modern' office buildings: the OFFICAIR Study», *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 13, n.º 5, 2016, doi: 10.3390/ijerph13050444.
- [34] J. Fernández-Agüera, M. Á. Campano Laborda, S. Domínguez-Amarillo, I. Acosta García, P. Bustamante Rojas y J. J. Sendra Salas, *Herramienta de predicción de la estanqueidad al aire de viviendas*. Sevilla, Universidad de Sevilla, 2022. <https://hdvirtual.us.es/discovirt/index.php/s/YjZyzZQ797Lxa7m>
- [35] J. Fernández-Agüera, J. J. Sendra y S. Domínguez-Amarillo, «Protocols for measuring the airtightness of multi-dwelling units in Southern Europe», *Procedia Engineering*, 2011, vol. 21. doi: 10.1016/j.proeng.2011.11.1992.
- [36] ISO, *ISO 9972:2015 – Thermal performance of buildings. Determination of air permeability of buildings. Fan pressurization method*. International Standardisation Office, 2015.
- [37] F. J. S. de la Flor, S. Á. Domínguez, J. L. M. Félix y R. G. Falcón, «Climatic zoning and its application to Spanish building energy performance regulations», *Energy Build.*, vol. 40, n.º 10, pp. 1984-1990, 2008, doi: 10.1016/j.enbuild.2008.05.006.
- [38] J. Feijó-Muñoz, A. Meiss, I. Poza-Casado, M. Á. Padilla-Marcos, M. Rabanillo-Herrero, A. Royuela del Val, R. González-Lezcano, C. Pardal, V. Echarri Iribarren, R. Assiego de Larriva, J. Fernández-Agüera, V. J. del Campo Díaz, M. J. Dios-Viéitez y M. Montesdeoca Calderín, *Permeabilidad al aire de los edificios residenciales en España. Estudio y caracterización de sus infiltraciones*. Valladolid, Asimétricas, 2018. <http://hdl.handle.net/10553/55564>

CAPÍTULO 8

TIPOS DE VENTILACIÓN NATURAL



VENTILACIÓN POR INFILTRACIONES



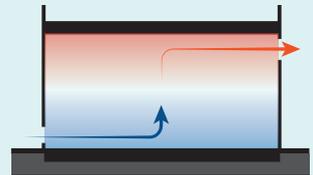
DIFERENCIA DE PRESIÓN, ΔP



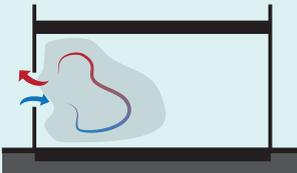
DIFERENCIA DE TEMPERATURA, ΔT_{α}



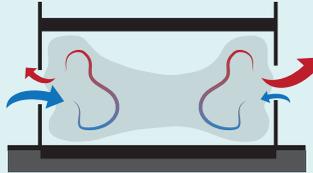
$\Delta P + \Delta T_{\alpha}$



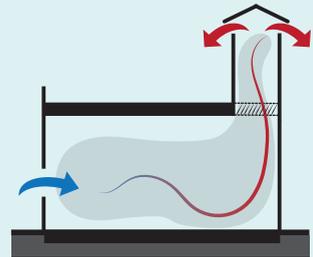
VENTILACIÓN CRUZADA EFECTO CHIMENEA



VENTILACIÓN UNILATERAL



VENTILACIÓN CRUZADA

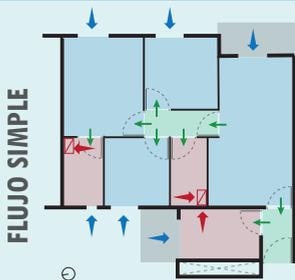


VENTILACIÓN POR TIRO INDUCIDO

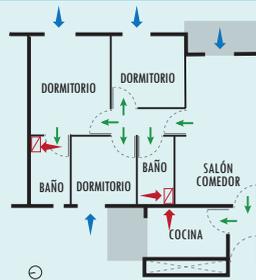
TIPOS DE VENTILACIÓN MECÁNICA CONTROLADA

LEYENDA

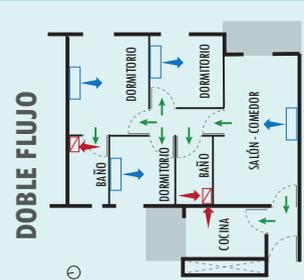
- ADMISIÓN / IMPULSIÓN
- EXTRACCIÓN
- PASO
- ELEMENTO IMPULSIÓN
- ELEMENTO EXTRACCIÓN
- LOCAL SECO
- LOCAL HÚMEDO
- ZONA DE PASO



EXTRACCIÓN POR TIRO FORZADO

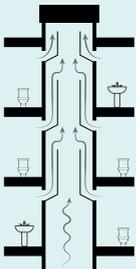


EXTRACCIÓN MECÁNICA

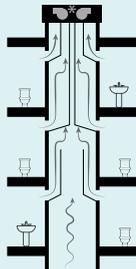


ADMISIÓN Y EXTRACCIÓN MECÁNICA

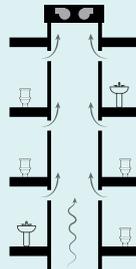
SISTEMAS DE EXTRACCIÓN SEGÚN NORMATIVA ESPAÑOLA



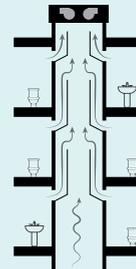
NTE-ISV 1975 (DEROGADA)



CTE DB-HS3 (HÍBRIDA)
* CON DETECCIÓN DE CAUDAL



CTE DB-HS3 (MECÁNICA)



CTE DB-HS3 (PROPUESTA DE MEJORA)

Calidad del aire por monitorización de CO₂ en centros educativos

PILAR REMACHA
ÁLVARO MUELAS
ANTONIO PINA
EDUARDO TIZNÉ

Laboratorio de Investigación en Fluidodinámica y Tecnologías de la Combustión (LIFTEC),
Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y
Universidad de Zaragoza (UNIZAR), Zaragoza, España

JAVIER PÉREZ
Prevención Docente, Málaga, España

JOSÉ MANUEL FELISI
Asociación Mesura, Valencia, España

JAVIER BALLESTER
Dpto. de Ciencia y Tecnología de Materiales y Fluidos,
Universidad de Zaragoza (UNIZAR), Zaragoza, España

Lista de acrónimos

ACH renovaciones por hora (acrónimo del inglés *air changes per hour*)

CEIP colegio de Educación Infantil y Primaria.

CO₂ dióxido de carbono.

IDA calidad del aire interior (acrónimo del inglés *indoor air quality*).

IES instituto de Educación Secundaria.

9.1. Introducción

La adecuada ventilación de espacios interiores cobra especial relevancia cuando en ellos conviven un número elevado de personas durante un perio-

do prolongado de tiempo. Un claro ejemplo son los centros educativos, donde alumnos y profesores comparten estancias durante varias horas al día. Según Allen *et al.* [1], un «aula estándar» en EE.UU consiste en una superficie de 46.4 m² con una ocupación de 15 alumnos. En España, la ocupación promedio asciende a los 22 estudiantes en Educación Primaria (25 en Secundaria) para una superficie de aula similar [2]. La elevada ocupación resultante hace crítica una correcta ventilación que permita renovar el aire interior, cargado de bioefluentes, por aire exterior. Como se detalla en capítulos anteriores [3], la exposición del cuerpo humano a niveles suficientemente elevados de estos gases (CO₂, compuestos orgánicos volátiles, etc.) tiene efectos nocivos sobre los ocupantes: fatiga, somnolencia, dolor de cabeza, aumento del tiempo de respuesta o dificultad para pensar claramente [4]. Por otra parte, la emisión de pequeñas gotas de fluido respiratorio procedentes de toda actividad humana supone un riesgo de transmisión de enfermedades, ya que se ha demostrado que diversas enfermedades infecciosas (como, por ejemplo, la COVID-19 [5, 6]) se transmiten por vía aérea.

Tal como se detalla en el capítulo 1, distintas normativas y códigos de buenas prácticas proponen la concentración de CO₂ como un buen indicador indirecto de la ventilación existente ante la presencia de actividad humana. El Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios [7] indica que el nivel de CO₂ en el interior de centros educativos debe permanecer siempre por debajo de 500 ppm sobre el nivel exterior (categoría IDA 2), limitando este diferencial a las 350 ppm en centros infantiles (categoría IDA 1). Este umbral da una clara indicación del nivel mínimo de ventilación necesaria en estos espacios bajo una situación de normalidad sanitaria. Por otro lado, en situaciones de emergencia donde prime minimizar el riesgo de contagio por vía aérea, este límite puede verse modificado significativamente. Por ejemplo, la plataforma Aireamos [8] propone un límite de CO₂ de 700 ppm (es decir, un exceso de 280 ppm sobre las 420 ppm exteriores [9]) para reducir a un nivel aceptable el riesgo de contagio de la COVID-19 en una situación de pandemia.

Suponiendo que el aire de un aula se encuentre perfectamente mezclado (lo cual resulta plausible dadas las reducidas dimensiones del espacio en estudio), un aula tipo de Educación Secundaria con 20 alumnos y 1 profesor presentaría la evolución de concentración de CO₂ mostrada en la figura 9.1 para diferentes niveles de tasa de ventilación. Como puede observarse, incluso si se parte de una situación inicial con un exceso de CO₂ nulo ($C_{CO_2n} = n420$ ppm), una ventilación insuficiente puede hacer que en cuestión de minutos se rebasen los límites marcados por la normativa, con los consiguientes riesgos para la salud de los ocupantes. De hecho, niveles muy bajos de ventilación, como el caso de 1 ACH (renovación de aire por hora), llevarían la calidad del aire a niveles ciertamente peligrosos, alcanzando rápidamente varios miles de ppm de CO₂.

Varios estudios han abordado la caracterización de la concentración de CO_2 en centros educativos, apuntando en muchos casos a niveles de ventilación insuficientes y, por tanto, a una calidad del aire interior mejorable. Un claro ejemplo de ello es el trabajo de Zemitis *et al.* [10], donde se registraron niveles promedio de 2.400 ppm de CO_2 , con picos de hasta 4.400 ppm en un aula de Secundaria en Letonia. Otros estudios corroboran la existencia de niveles de ventilación insuficientes en centros educativos de diversos países europeos. Almeida *et al.* [11] concluye que, en 6 de los 8 colegios estudiados, los niveles promedio de CO_2 excedían las 1.500 ppm. Resultados similares se desprenden de estudios en España [12] o Serbia [13], con concentraciones medias de CO_2 en aula considerablemente por encima de las 1.000 ppm. El análisis de más de 800 aulas danesas apunta, asimismo, a niveles de ventilación insuficientes, excediendo 1.000 ppm en la mayoría de las aulas. En este estudio también se concluyó que las aulas con ventilación mecánica presentaban niveles de CO_2 inferiores a aquellas que solo disponían de ventilación natural. Este resultado es en cierto modo esperable, ya que los sistemas de ventilación mecánicos permiten un control preciso y permanente de la tasa de ventilación con aire exterior (ACH en figura 9.1), tarea mucho más compleja si solo se dispone de ventilación natural. La gran influencia de variables no siempre controlables (dirección y velocidad del viento, temperatura interior y exterior, etc.) hace que la estimación de la tasa de ventilación sea

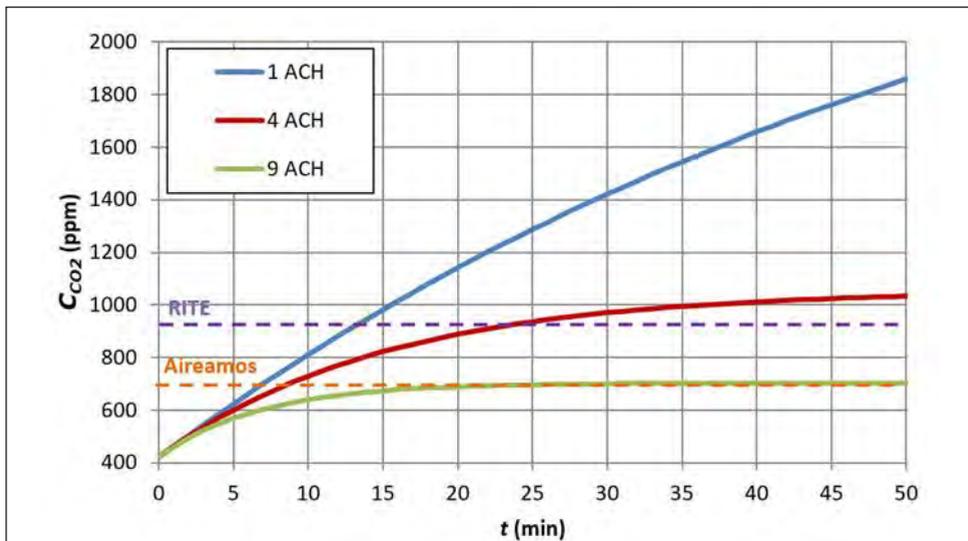


Figura 9.1. Estimación de la concentración de CO_2 en función del tiempo en un aula de 125 m^3 con 20 estudiantes de Secundaria y 1 profesor, partiendo de un valor inicial $C_{\text{CO}_2} = 420 \text{ ppm}$. En líneas horizontales, los umbrales absolutos marcados por el RITE para IDA 2 (920 ppm) [7] y Aireamos (700 ppm) [8].

extremadamente compleja para este tipo de aulas, por lo que la medida del nivel de CO₂ se convierte en una herramienta esencial para conocer el nivel de ventilación y de calidad del aire interior.

Pese a que el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios [7] exige que todos los edificios educativos de nueva construcción en España dispongan de sistemas de ventilación mecánica, es un hecho que una gran cantidad de centros no cuentan con estos sistemas por haber sido construidos con anterioridad a 2008. Por tanto, la apertura manual de ventanas sigue siendo la única forma de regular la tasa de ventilación en la mayoría de colegios e institutos de nuestro país [12, 15, 16]. A pesar de su mayor complejidad y de las obvias desventajas frente a sistemas de ventilación mecánica, se ha demostrado que es posible mantener condiciones de calidad de aire interior adecuadas en centros educativos que solo disponen de ventilación natural. Tras una campaña extensiva de medidas en varios centros educativos, donde se analizaron más de 130 espacios (aulas, pasillos, comedores, etc.), los autores pudieron comprobar que la apertura manual de puertas y ventanas fue suficiente para mantener niveles de ventilación y de calidad del aire interior adecuados (<700-800 ppm CO₂) en un 80-90% de los casos estudiados [17]. Esto se ilustra en la figura 9.2, donde se recogen los niveles

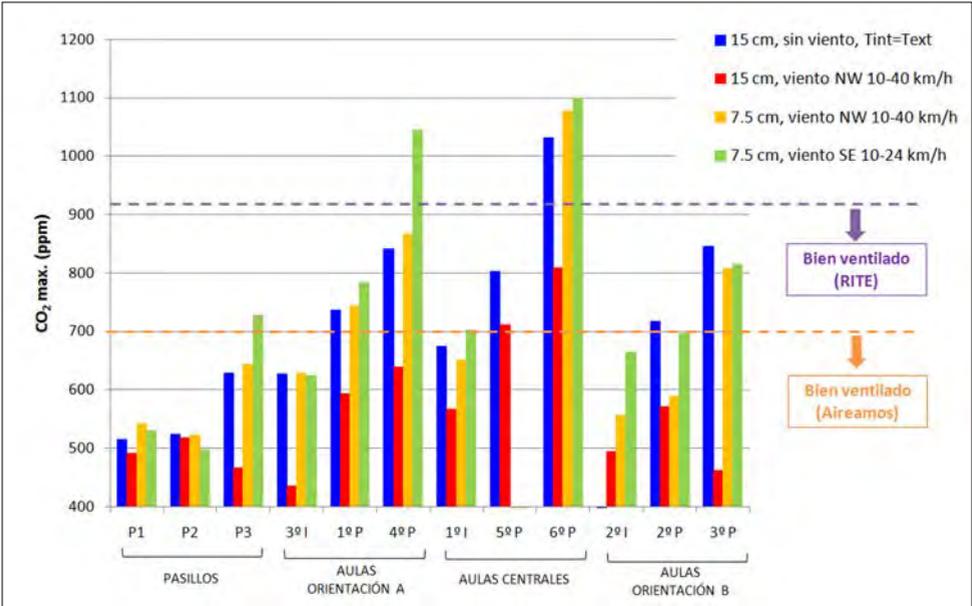


Figura 9.2. Niveles máximos de CO₂ registrados en distintos pasillos y aulas del CEIP Basilio Paraíso (Zaragoza) durante los días 9-20 de octubre de 2020 en horario escolar. Las principales variables modificadas son: apertura de las ventanas (7.5/15 cm por ventana) y condiciones ambientales (temperatura, dirección y velocidad del viento).

máximos de CO₂ registrados en varias aulas y pasillos de un colegio de Educación Primaria a lo largo de varios días de monitorización. Si bien la mayoría de los espacios pudieron mantener una adecuada ventilación con los niveles de apertura de ventanas utilizados (7.5/15 cm por ventana), se observa una gran variabilidad entre los niveles de CO₂ máximos registrados, con una influencia importante de las condiciones ambientales, así como de la ocupación, geometría y orientación del recinto estudiado. Cabe señalar que en todo caso los procedimientos de ventilación natural no suplen el filtrado del aire que realizan los sistemas de ventilación mecánica, permitiendo así la introducción de contaminantes y alérgenos en los espacios interiores.

Debido a esta importante variabilidad, los sistemas de monitorización de CO₂ se convierten en una herramienta imprescindible para ventilar adecuadamente en edificios que solo dispongan de ventilación natural. En los siguientes apartados se proporciona una serie de recomendaciones y pautas generales dirigidas a conseguir este objetivo, incidiendo en algunos aspectos particulares de especial importancia y presentando ejemplos prácticos ilustrativos encontrados a lo largo de esta campaña. Finalmente, se incluye un apartado en el que se discute la posibilidad de ventilar adecuadamente un centro educativo en caso de no disponer de sistemas de medida de CO₂.

9.2. Recomendaciones generales

Como se ha indicado anteriormente, con la ventilación natural en muchos casos es posible mantener condiciones de calidad de aire interior adecuadas en los centros educativos. Sin embargo, ajustar correctamente la apertura de las ventanas no resulta en absoluto trivial, ya que la ventilación natural depende de diversos factores, como son las características del aula, el tipo y situación de las ventanas, la configuración del edificio o la dirección e intensidad del viento. La medida de CO₂ resulta un aliado esencial para esta tarea, puesto que permite ajustar adecuadamente la apertura de las ventanas en cada momento, verificando que la tasa de ventilación es suficiente, así como evitar una circulación de aire exterior excesiva, que causaría un consumo innecesariamente elevado de energía y un empeoramiento del confort térmico.

Junto a la medida de CO₂ conviene tener presentes algunas recomendaciones generales para conseguir una ventilación eficaz. A continuación, se resumen algunas ideas en este sentido (en las referencias [18, 19] puede consultarse una explicación más detallada de estos aspectos):

1. **Ventilación cruzada y distribuida:** el objetivo final es desplazar el aire de todas las zonas del aula con aire fresco, sin dejar zonas muertas. No obstante, para una cierta apertura total de las ventanas, los flujos de aire en-

trantes pueden distribuirse de formas muy diversas por lo que resulta determinante conocer cómo se distribuyen las entradas de aire en el aula para elegir la manera de ventilar más efectiva. En la figura 9.3 se presentan varios esquemas de ventilación, ordenados de peor a mejor eficiencia de ventilación.

La mejor alternativa es la ventilación cruzada y distribuida (esquemas situados a la derecha de la imagen), es decir, situando las aberturas en paredes opuestas (cruzada) y repartiendo las entradas de aire entre el mayor número de puntos (distribuida). (En el apartado 9.3 se ilustra este aspecto con varios ejemplos).

2. Mantener la **ventilación de forma continua**, no solo entre clases.
3. Prestar **atención a los pasillos**: es fundamental que estén bien ventilados, ya que, influyen sobre en la ventilación de las aulas (más detalles en Apdo. 3).
4. Ajustar las **entradas de aire** en función de las condiciones particulares. Días sin viento y con temperatura exterior similar a la interior son los que exigirán aberturas más amplias en las ventanas del aula.
5. **Medir**: imprescindible utilizar un analizador de CO₂ para ajustar aberturas.
6. Volver a **comprobar** si cambian las **condiciones**: verificar los niveles de CO₂ periódicamente, sobre todo si cambia el nivel de ocupación del recinto, el viento, etc.

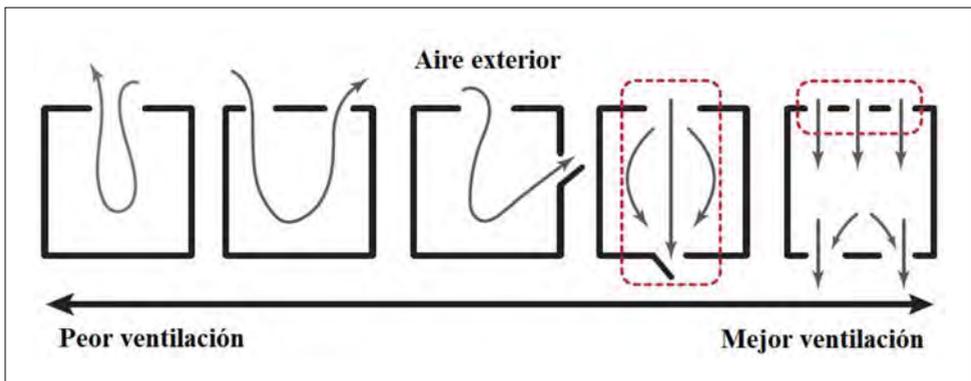


Figura 9.3. Esquemas de ventilación natural en función de las aberturas disponibles ordenados según su eficiencia de ventilación (peor: izquierda, mejor: derecha).

9.2.1. Consejos sobre el uso y localización del analizador

Aunque el manejo de la mayor parte de los equipos comerciales de monitorización de CO₂ es relativamente sencillo, es preciso tener en cuenta algunos aspectos para que las medidas sean precisas y representativas de la calidad del aire general del aula.

- **Calibración del analizador:** muchos analizadores tienen esta función y antes de empezar a usarlos deben calibrarse para verificar su correcto funcionamiento. Asimismo, es importante comprobar periódicamente que mantiene la calibración dentro de los parámetros adecuados (y de no ser así, realizar una recalibración del equipo). Esto se hace en la mayor parte de los equipos exponiendo al analizador al aire exterior, lejos de cualquier actividad humana, y activando la rutina de calibración propia del analizador.
- **Estabilización de la lectura:** generalmente el analizador necesita cierto tiempo para llegar a un valor correcto y estable (en algunos modelos, puede llegar hasta 5-10 minutos). Es importante respetar este punto, ya que, si se toma la lectura antes de tiempo, los errores en las medidas pueden ser elevados.
- **Situación del analizador:** debe situarse de manera que la medida no esté afectada por la ventilación ni por personas cercanas. La zona central del aula suele ser la mejor opción y se recomienda situarlo a una altura superior a 1.5 m [17]. En la figura 9.4 se han sombreado las zonas en las que no se debe instalar el analizador. Habría que tener especial cuidado de separarlos de posibles emisores en el caso de aulas taller o aulas de laboratorios.

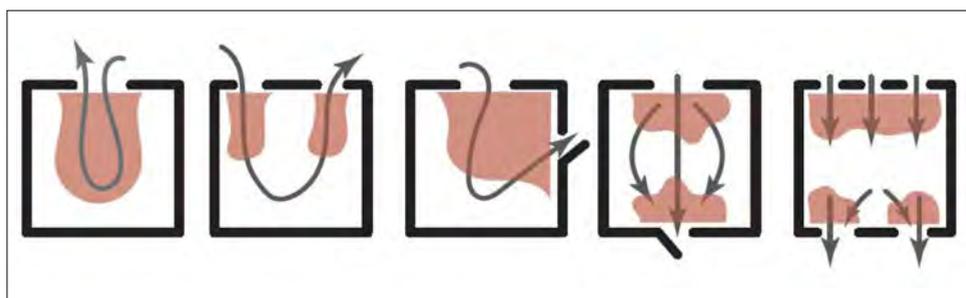


Figura 9.4. Zonas sombreadas en las que no se recomienda colocar el analizador de CO₂.

9.2.2. Protocolo de ventilación

El comportamiento de la ventilación natural puede ser muy complejo, por lo que se aconseja realizar las primeras pruebas de ajuste de la ventilación con rigor y especial atención a los detalles. En la mayoría de los casos, los resultados obtenidos son específicos de cada aula o recinto; así, para que los datos medidos sean realmente útiles es recomendable recopilar información individualizada para las distintas aulas y espacios del centro, prestando atención a aquellos detalles que puedan afectar a las condiciones de ventilación.

A continuación, se presenta un breve listado de los posibles pasos que hay que seguir para lograr una ventilación suficiente (en este caso, se considera el umbral de 700 ppm), pero no excesiva:

1. Mantener las **puertas abiertas**.
2. **Abrir las ventanas**, intentando una configuración de **ventilación cruzada distribuida** (figura 9.3).
3. Empezar con una apertura total de 80 cm (suponiendo que las ventanas tienen una altura de 1 m; si tienen menos altura, abrir proporcionalmente para que la sección total sea de 0.80 m²). Esta apertura total debe repartirse lo mejor posible entre las ventanas disponibles.
4. **Registrar** la evolución del CO₂. Si el analizador no permite un registro continuo, tomar lecturas al menos cada 15 minutos.
5. Una vez se alcanza una lectura de CO₂ estable, **valorar la calidad de la ventilación** y **reajustar** ventanas, según se indica en el diagrama de la figura 9.5.
6. **Repetir el proceso** hasta encontrar el mejor compromiso entre ventilación y confort térmico.



Figura 9.5. Diagrama con pasos para reajustar las condiciones de ventilación.

Las indicaciones anteriores y las pruebas realizadas en la extensa campaña de ensayos llevada a cabo en más de 130 espacios de centros educativos de la ciudad de Zaragoza durante el periodo de octubre de 2020 a mayo de 2021 confirman que, en muchos casos, es posible mantener una calidad del aire interior adecuada mediante la ventilación natural. A modo de ejemplo, la figura 9.6 presenta un gráfico con la evolución temporal de los registros de CO₂ tomados en dos aulas muy parecidas durante el mismo periodo de tiempo; estas curvas muestran de forma clara cuando la ventilación es correcta o no, así como las causas que provocan los cambios en la calidad del aire.

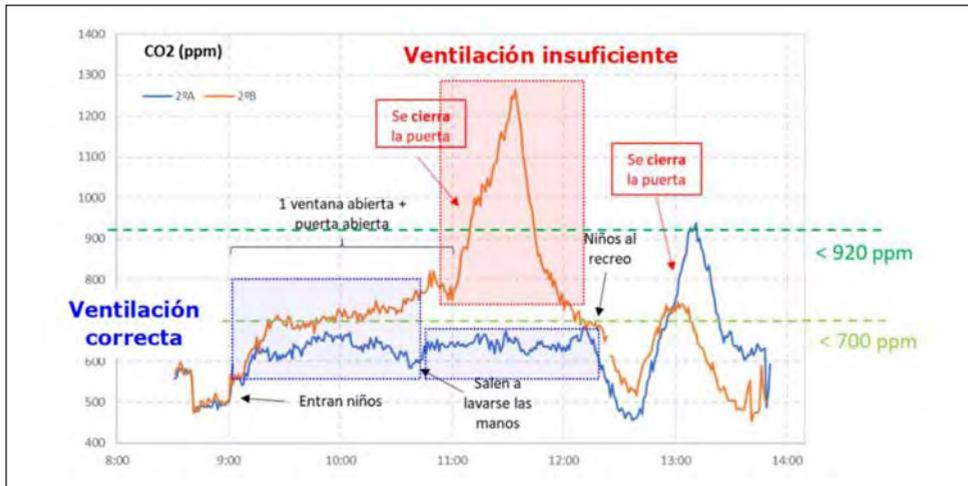


Figura 9.6. Evolución simultánea del CO₂ en dos aulas colindantes de Primaria: cambios en las condiciones de ventilación al cerrar la puerta de una de las clases. Las líneas de trazos en color verde indican los límites recomendados para mantener una calidad de aire adecuada en el aula (RITE: 920 ppm [7]; 700 ppm en situaciones especiales, como, por ejemplo, durante la pandemia del SARS-CoV-2 [8]).

9.3. Algunos aspectos particulares

En este apartado se presentan varios ejemplos que demuestran la relevancia de algunos de los puntos anteriormente comentados. Todos ellos corresponden a situaciones reales en las que se ha registrado la evolución del CO₂ en diferentes espacios y con condiciones de ventilación muy diversas.

9.3.1. Ventilación cruzada

La figura 9.7 ilustra la importancia de la ventilación cruzada para mantener una adecuada calidad del aire interior. La curva representa la evolución del CO₂ en un aula de Educación Primaria durante la jornada escolar de un día de diciembre, en la que se fueron modificando las condiciones de ventilación. Durante el periodo comprendido entre las 9h50 y 10h30, la ventilación en el aula era cruzada (abriendo las ventanas de la pared opuesta a la puerta) y la concentración de CO₂ se mantuvo por debajo de 700 ppm prácticamente todo el tiempo. Sin embargo, entre las 11h35 a 12h30 se ventiló desde las ventanas de la pared colindante a la puerta de la clase y el flujo de aire en el aula no se veía tan favorecido con el consiguiente aumento del CO₂ (800-1000 ppm).

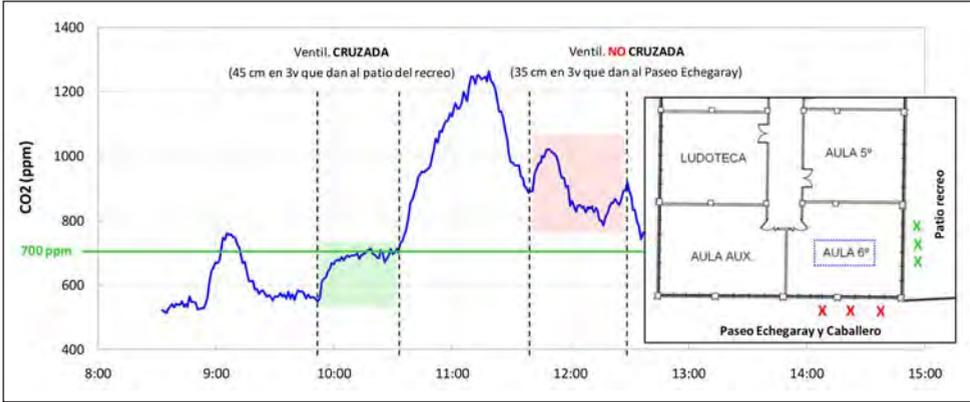


Figura 9.7. Evolución temporal del CO₂ durante una jornada escolar en un aula de Primaria cambiando la configuración de la ventilación. 9h50 a 10h30: ventilación cruzada (ventanas señaladas con cruces verdes); 11h35 a 12h30: ventilación no cruzada (cruces rojas).

9.3.2. Ventilación distribuida

En la figura 9.8 se muestra cómo cambia la ventilación en un aula al modificar la distribución de las aberturas de aire. Para la misma clase mostrada en la figura 9.7, en este caso se probó a ventilar abriendo seis ventanas del aula un total de 80 cm (es decir, entre 10 y 15 cm por ventana) y después utilizando también una abertura de 80 cm, pero en una única ventana. Los cambios son evidentes: con ventilación distribuida la calidad del aire es excelente (550-600 ppm), mientras que, al utilizar un solo punto de entrada de aire, los niveles de CO₂ aumentan más de un 50% (850-900 ppm).

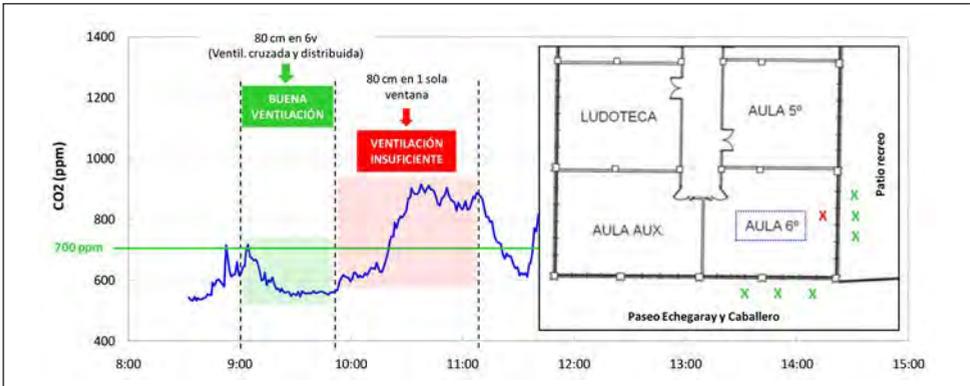


Figura 9.8. Evolución temporal del CO₂ durante una jornada escolar en un aula de Primaria cambiando la configuración de la ventilación. 9h00 a 9h50: ventilación distribuida (80 cm repartidos en seis ventanas, cruces verdes); 9h50 a 11h15: una ventana abierta 80 cm (cruz roja).

9.3.3. Espacios con requisitos especiales

Ventilación en los pasillos

Como se ha indicado antes, las zonas de paso (generalmente pasillos) tienen un papel importante en la ventilación de las aulas, puesto que en muchas ocasiones actúan como vías de comunicación entre los flujos de aire que se pueden establecer entre los espacios, de manera que una parte de las aulas se ventila con aire que sale de otras. Por eso, se recomienda que, en pasillos y zonas comunes que comunican con las aulas, el valor de referencia para la concentración de CO₂ sea inferior al utilizado para las aulas.

En la figura 9.9 se representan dos ejemplos que ilustran este punto. Si el pasillo está mal ventilado (figura 9.9 izqda.), las aulas a las que llega el aire desde el pasillo (A2 y A4) excederán los límites de CO₂ recomendados, independientemente de cómo se ajusten sus ventanas. En cambio, si está bien ventilado (figura 9.9 dcha.), también en esas aulas está entrando aire (casi) limpio.

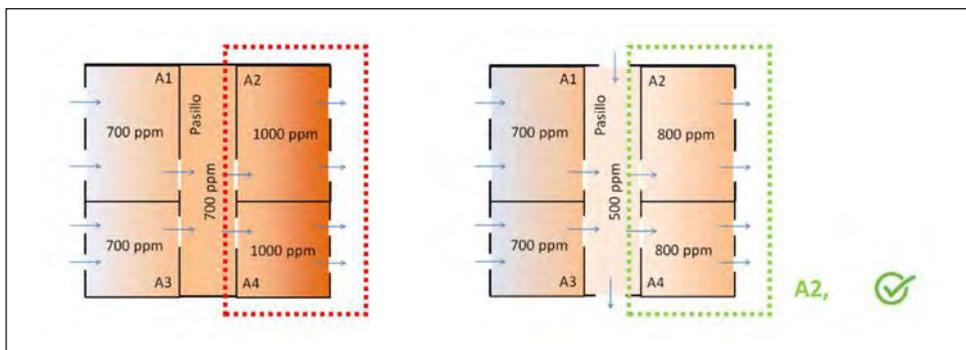


Figura 9.9. Efecto de la ventilación del pasillo sobre las aulas: ventilación insuficiente (izquierda) y ventilación adecuada (derecha).

Ventilación en comedores

Otros recintos que pueden tener unos requisitos de ventilación especiales son los comedores de los colegios, especialmente en situaciones excepcionales, como, por ejemplo, para prevención de contagio de SARS-CoV-2, ya que son espacios en los que los alumnos no llevan mascarilla y charlan animadamente y, por tanto, el riesgo de contagio de enfermedades respiratorias por aerosoles es mayor. En estos casos también se recomienda aumentar las tasas de ventilación manteniendo unos límites de CO₂ más restrictivos con el objetivo de reducir el riesgo de contagio (p. ej., <550 ppm). La figura 9.10 muestra los registros de CO₂ medidos en el comedor de un colegio en diferentes días, las curvas obtenidas demuestran que con las ventanas abiertas

fue posible mantener una buena calidad del aire ($\text{CO}_2 < 550 \text{ ppm}$), mientras que, si se cerraban, en poco tiempo empeoraba notablemente.

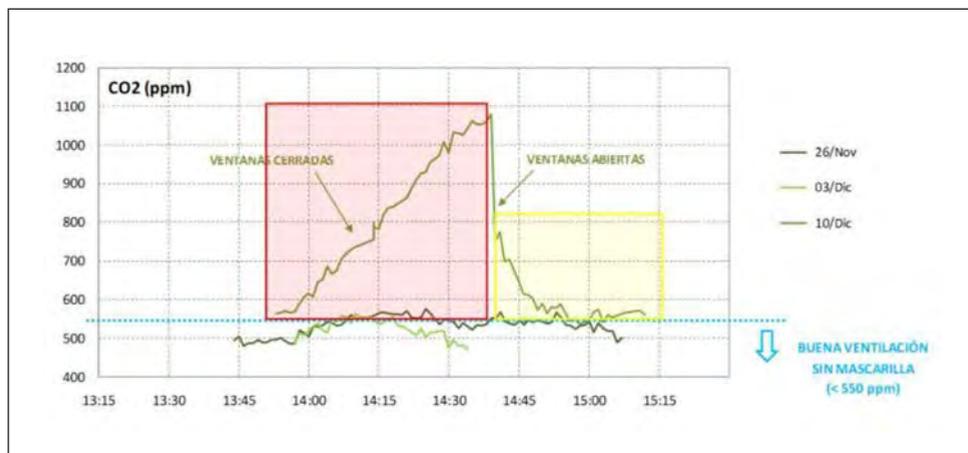


Figura 9.10. Evolución temporal del CO_2 durante la hora de la comida en el comedor de un colegio. Medidas tomadas en varios días con diferentes condiciones de ventilación.

9.4. Ventilación continua o intermitente

La eficacia de la ventilación viene determinada por la cantidad de aire exterior que se introduce en la sala, pero también por la forma en la que se dosifica a lo largo del tiempo. Durante la pandemia se ha generado cierto debate, además de indicaciones contradictorias, acerca de si la ventilación debe realizarse permanentemente o si es suficiente, o incluso preferible, abrir las ventanas solamente en ciertos momentos (p. ej., entre clases o antes y después de la ocupación del aula). En este apartado se analiza la eficacia real de la ventilación continua frente a distintas opciones de ventilación intermitente. Conviene aclarar que, aunque el debate se ha centrado normalmente en la ventilación natural (apertura de ventanas), las mismas conclusiones serían válidas para los sistemas de ventilación mecánica.

Para ilustrar las diferencias entre las distintas opciones, se considerarán los siguientes casos (extraídos de la guía divulgativa de Muelas *et al.* [20]):

- A. Ventilación continua, ajustada para alcanzar un nivel de CO_2 de 700 ppm.
- B. Ventilación intermitente, abriendo ventanas una vez cada hora durante 10 minutos. En este caso se supone que la cantidad de aire en esos 10 minutos es la misma que en el caso A durante toda la hora. Para eso, deberán abrirse más las ventanas que en A (p. ej., como se suele recomendar, apertura total).

C. Como el caso B, pero suponiendo que la ventilación se mantiene 15 minutos en lugar de 10, ajustando para lograr la misma cantidad de aire que en los otros casos (es decir, aperturas más amplias que en A, pero menos que en B, de forma que el volumen total de aire exterior que entra al aula por hora se mantenga constante).

Los cálculos se han llevado a cabo para una situación representativa de un aula de Secundaria: aula de 50 m² y 2.5 m de altura, con 20 adolescentes y 1 profesor. En los tres casos, se supondrá que por las ventanas entra un total de 1.000 m³ de aire exterior en cada hora (equivalente a 8 ACH). Además, se añade 1 ACH debido a infiltraciones, aperturas esporádicas de puertas, etc., con lo que la tasa de ventilación se sitúa en 9 ACH.

La figura 9.11 muestra la evolución calculada de la concentración de CO₂ a lo largo de dos horas, para los tres casos considerados. Las diferencias entre ellos son claras y significativas. Si se mantienen las ventanas abiertas, con la apertura ajustada para mantener un caudal de 1.000 m³/h (más 125 m³/h debidos a infiltraciones), tras un transitorio inicial, el nivel de CO₂ se estabiliza en 700 ppm, que sería el límite recomendado para situaciones de emergencia (como en la COVID-19). En cambio, si la misma cantidad de aire se introduce en intervalos de 10 minutos cada hora abriendo más las ventanas (el caudal es seis veces superior en ese intervalo), la mayor parte del tiempo el nivel de CO₂ supera ampliamente los límites recomendados. Los valores únicamente se mantienen por debajo de 700 ppm durante los 10 minutos de apertura y, aproximadamente, otros 6 minutos más. A partir de ahí, la concentración sube continuamente hasta superar 1.900 ppm al final de la hora (cerca del 2% de aire ya ha sido respirado). Si se opta por abrir 15 minutos, con el mismo volumen total de aire, las diferencias son escasas: la atmósfera del aula solamente se mantiene bien ventilada durante 5 minutos más (que coinciden con la ampliación del tiempo de apertura de la ventilación natural).

Si se toma como referencia el umbral de 920 ppm (IDA 2 del RITE), se alarga un poco el tiempo hasta rebasarlo, pero la ventilación intermitente también da resultados insuficientes, con la mayor parte de la hora por encima de este valor.

Estos resultados demuestran que la estrategia óptima consiste en ventilar con aire exterior (y evacuar aire contaminado) al mismo tiempo que se están generando los bioefluentes, es decir, durante todo el periodo de ocupación de la sala. Aunque se utilice la misma cantidad de aire, si se concentra en un tiempo corto, el aula queda bien ventilada en ese momento (incluso demasiado, si el aire exterior está o muy frío, o muy caliente), pero el aire viciado se acumula rápidamente tras cerrar las ventanas.

Este mismo razonamiento sirve para valorar la utilidad de abrir ventanas antes o después de la jornada lectiva. Tras varias horas con el aula desocupa-

da, incluso pequeñas infiltraciones aseguran la renovación del aire interior. Por eso, no tiene sentido abrir ventanas antes de empezar la jornada, con el inconveniente de bajar mucho la temperatura del aula (en periodos fríos) y aumentar el consumo de energía. Algo similar ocurre si se abre después de que los estudiantes abandonan el aula: no aporta ningún beneficio, pero, en cambio, enfría el aire interior y disminuye la capacidad térmica de paredes, suelos y techos, causando un incremento innecesario del consumo en calefacción o refrigeración. Si el aula se mantiene bien ventilada permanentemente, incluso carece de sentido mantener la ventilación en los recreos o en periodos en los que no hay alumnos: si se ha mantenido la calidad del aire dentro de los límites recomendados, puesto que cesa la generación de bioefluentes, pueden cerrarse las ventanas cuando salgan los alumnos, ahorrando energía y mejorando el confort térmico del aula antes de que vuelva a ocuparse.

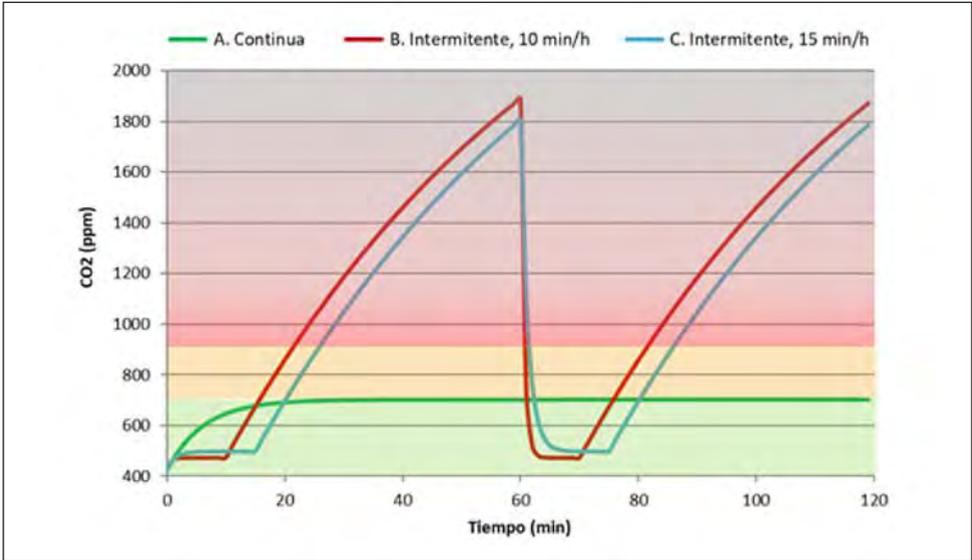


Figura 9.11. Evolución de la concentración de CO₂ en una clase con 20 alumnos de Secundaria y un profesor, para tres casos distintos: ventilación continua y ventilación intermitente de 10 y 15 minutos cada hora, respectivamente. En todos los casos entra la misma cantidad de aire interior: 1.000 m³/h (8 ACH), más 1 ACH debida a infiltraciones. Los colores indican los umbrales de 700 y 920 ppm.

Como se ha indicado, aunque esta discusión normalmente se ha planteado para la ventilación natural (la única disponible en la mayor parte de los centros), exactamente el mismo razonamiento sirve para los edificios que tengan ventilación mecánica. La aportación de aire exterior, en la tasa recomendada, debería dosificarse de forma continua, evitando concentrarla en

ciertos intervalos de tiempo, dado que la calidad del aire interior se degrada rápidamente en los periodos en los que no hay aportación de aire fresco.

9.5. Cómo ventilar si no hay medidor de CO₂

Uno de los principales problemas a los que se enfrentan los centros educativos a la hora de ventilar, es cuando no se dispone en el aula de medidores de CO₂ que permitan indicar –en función de sus niveles– cuáles son las pautas de ventilación más apropiadas en cada momento, y en base a ello, poder abrir más o menos las ventanas para tratar de no superar los 700 ppm recomendados por Aireamos [8] y por la Escuela de Salud Pública de Harvard [21]. Para intentar conseguir el mayor equilibrio posible entre seguridad y confort térmico, el sensor de CO₂ es fundamental. El no poder utilizarlo para conocer las condiciones del aire interior va a dificultar en exceso una correcta ventilación, ya que dicho proceso se va a realizar «a ciegas».

Si no se dispone de medidor de CO₂, la estrategia es clara: abrir todas las ventanas del aula lo máximo posible durante el mayor tiempo que se pueda. En el caso de que las condiciones meteorológicas lo permitieran, la apertura total de ventanas continuamente podría ser la solución si el aula ventila bien. El problema surge cuando dichas condiciones no permiten la adopción de esta medida. En este caso, la estrategia debería consistir en tratar de mantener entreabierta una parte de cada una de las ventanas de manera permanente, y realizar aperturas totales frecuentes que eviten que los niveles de CO₂ se disparen. Pero si no se tienen medidores de CO₂, es imposible determinar qué proporción de ventana debe quedar abierta. A medida que se reduce la cantidad de la hoja entreabierta, los valores de CO₂ van siendo mayores (figura 9.12), alejándose de manera progresiva de los niveles recomendados y, en consecuencia, aumentando la probabilidad de contagio de los distintos virus respiratorios (que tradicionalmente circulan por los centros educativos), ya que estos quedan retenidos en los aerosoles suspendidos en el aire.

Por lo tanto, si las condiciones meteorológicas no permiten la apertura total de ventanas (y además, no se dispone de medidor), resulta pertinente plantearse cuál es la cantidad mínima de superficie de ventana abierta que permite una adecuada calidad del aire en el aula. Aunque no es posible dar una respuesta general, porque depende de muchos factores, ante dicha situación se recomienda mantener la máxima apertura posible en todas las ventanas y realizar cuantas más aperturas completas sean viables mientras los niveles de CO₂ no se hayan disparado todavía (situación que suele ocurrir a partir de los 10 o 15 minutos según la gráfica anterior). En este contexto se propone la siguiente alternativa (avalada por el LIFTEC [20]), denominada

15-5-15-5-15-5: dejar las ventanas semiabiertas durante 15 minutos (a veces, con media ventana es suficiente), para luego abrir las ventanas de par en par 5 minutos, volviendo a poner las ventanas en la posición de semiapertura 15 minutos y repetir la secuencia durante el resto de la hora lectiva. Como se puede observar en el recuadro de la gráfica anterior, esta opción proporciona los mejores resultados (independientemente del porcentaje de ventana entreabierta), dando lugar a un aire más limpio y, por tanto, más seguro [22].

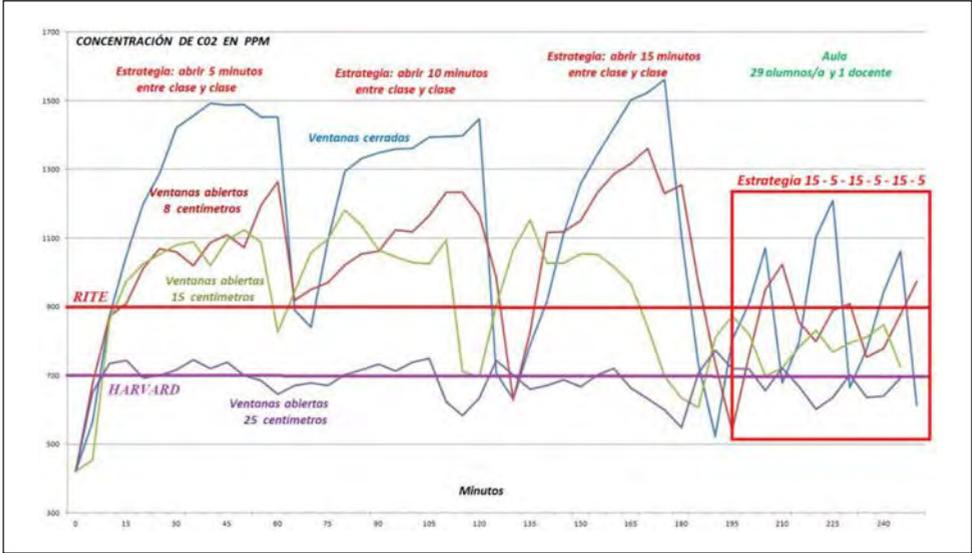


Figura 9.12. Niveles de CO₂ que se alcanzan en función del grado de apertura de ventanas en un aula tipo del IES Poetas Andaluces de Benalmádena (Málaga). Umbrales absolutos de CO₂ obtenidos a partir de considerar el valor exterior de CO₂ como 400 ppm.

Aunque, desde un punto de vista pedagógico, esta estrategia presenta sus inconvenientes (ya que va a dificultar la dinámica de la clase), es la que garantiza los mejores niveles de CO₂ –independientemente del grado de apertura de la ventana– cuando no se dispone de analizador para medirlos. Por lo tanto, se considera recomendable tener en cuenta esta pauta de ventilación, especialmente en ciertas épocas del año cuando aumenta la incidencia de virus respiratorios.

Una medida complementaria para pasar solo el frío estrictamente necesario –o que vale la pena tener en cuenta incluso cuando, con ventanas totalmente abiertas, un aula no tenga una buena ventilación– consiste en combinar la ventilación natural con el uso de filtros de aire, como se explica en otros capítulos del libro.

Referencias

- [1] J. Allen, J. Spengler, E. Jones y J. Cedeno-Laurent, *5-step guide to checking ventilation rates in classrooms*, Cambridge (EE.UU), 2020. <https://schools.forhealth.org/wp-content/uploads/sites/19/2020/08/Harvard-Healthy-Buildings-program-How-to-assess-classroom-ventilation-08-28-2020.pdf>
- [2] O. for E. C. and Development, *Education at a glance: OECD indicators*, 2015. <https://www.educacionyfp.gob.es/inee/dam/jcr:b18d65e5-31d1-4e55-bf62-28039bbf5eb4/eag-2015-cn-eng.pdf>
- [3] M. Á. Campano, J. Fernández-Agüera, M. Sánchez-Muñoz y J. J. Sendra, «Ventilación y CO₂, contaminante e indicador indirecto de la degradación ambiental», en J. Fernández-Agüera, M. Á. Campano y J. J. Sendra (eds.), *Calidad del aire interior en los edificios para el bienestar en los edificios: estrategias de aplicación práctica*. Barcelona, Octaedro, 2023, p. 180.
- [4] X. Zhang, P. Wargocki, Z. Lian y C. Thyregod, «Effects of exposure to carbon dioxide and bioeffluents on perceived air quality, self-assessed acute health symptoms y cognitive performance», *Indoor Air*, 2017, doi: 10.1111/ina.12284.
- [5] T. Greenhalgh, J. L. Jimenez, K. A. Prather, Z. Tufekci, D. Fisman y R. Schooley, «Ten scientific reasons in support of airborne transmission of SARS-CoV-2», *Lancet*, vol. 397, n.º 10285, pp. 1603-1605, 2021, doi: 10.1016/S0140-6736(21)00869-2.
- [6] Z. Noorimotlagh, N. Jaafarzadeh, S. S. Martínez y S. A. Mirzaee, «A systematic review of possible airborne transmission of the COVID-19 virus (SARS-CoV-2) in the indoor air environment», *Environ. Res.*, vol. 193, 2020, p. 110612, 2021, doi: 10.1016/j.envres.2020.110612.
- [7] Ministerio de la Presidencia del Gobierno de España, «Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios», BOE n.º 207, 2007, Madrid, Ministerio de la Presidencia del Gobierno de España, 2021, p. 97. <https://www.boe.es/buscar/pdf/2007/BOE-A-2007-15820-consolidado.pdf>
- [8] Plataforma Aireamos, *Ventilación en aulas para prevención de COVID-19: Límites de CO₂ recomendados en periodo de emergencia*. Plataforma Aireamos, 2021. https://drive.google.com/file/d/1jFavucO98vMz5_LpKtnDXBfDZvWMLcL/view
- [9] AEMET, *El observatorio de Izaña vuelve a registrar en mayo de 2021 un máximo histórico en la concentración de dióxido de carbono (CO₂)*, 2021. <https://aemetblog.es/2021/06/21/el-observatorio-de-izana-vuelve-a-registrar-en-mayo-de-2021-un-maximo-historico-en-la-concentracion-de-dioxido-de-carbono-co2/>
- [10] J. Zemitis, R. Bogdanovics y S. Bogdanovica, «The study of CO₂ concentration in a classroom during the COVID-19 safety measures», *E3S Web*

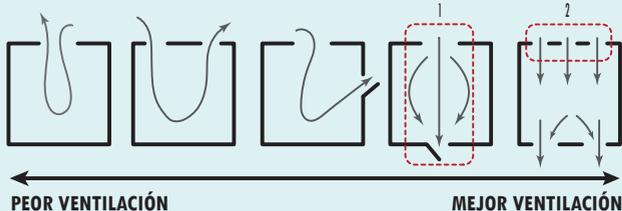
of Conferences, 2021, vol. 246, p. 01004. doi: 10.1051/e3sconf/202124601004.

- [11] R. M. S. F. Almeida, M. Pinto, P. G. Pinho y L. T. de Lemos, «Natural ventilation and indoor air quality in educational buildings: experimental assessment and improvement strategies», *Energy Effic.*, vol. 10, n.º 4, pp. 839-854, 2017, doi: 10.1007/s12053-016-9485-0.
- [12] J. Fernández-Agüera, M. Á. Campano, S. Domínguez-Amarillo, I. Acosta y J. J. Sendra, «CO2 concentration and occupants' symptoms in naturally ventilated schools in Mediterranean climate», *Buildings*, vol. 9, n.º 9, p. 197, 2019, doi: 10.3390/buildings9090197.
- [13] V. Turanjanin, B. Vučićević, M. Jovanović, N. Mirković e I. Lazović, «Indoor CO2 measurements in Serbian schools and ventilation rate calculation», *Energy*, vol. 77, pp. 290-296, 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.10.028.
- [14] J. Toftum, B. U. Kjeldsen, P. Wargocki, H. R. Menå, E. M. N. Hansen y G. Clausen, «Association between classroom ventilation mode and learning outcome in Danish schools», *Build. Environ.*, vol. 92, pp. 494-503, 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.05.017.
- [15] D. Rodríguez, I. R. Urbieto, Á. Velasco, M. Á. Campano-Laborda y E. Jiménez, «Assessment of indoor air quality and risk of COVID-19 infection in Spanish secondary school and university classrooms», *Build. Environ.*, vol. 226, p. 109717, 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109717.
- [16] F. Villanueva, A. Notario, B. Cabañas, P. Martín, S. Salgado y M. F. Gabriel, «Assessment of CO2 and aerosol (PM2.5, PM10, UFP) concentrations during the reopening of schools in the COVID-19 pandemic: the case of a metropolitan area in Central-Southern Spain», *Environ. Res.*, vol. 197, 2021, doi: 10.1016/j.envres.2021.111092.
- [17] Á. Muelas, P. Remacha, A. Pina, E. Tizné, S. El-Kadmiri, A. Ruiz, D. Aranda y J. Ballester, «Analysis of different ventilation strategies and CO2 distribution in a naturally ventilated classroom», *Atmos. Environ.*, vol. 283, 2022, doi: 10.1016/j.atmosenv.2022.119176.
- [18] Á. Muelas, A. Pina, P. Remacha, E. Tizné, D. Aranda, A. Ruiz y J. Ballester, *Guía práctica de ventilación en aulas: ya tengo el analizador de CO2... ¿Y ahora qué?* Zaragoza, Grupo de Fluidodinámica/LIFTEC, Universidad de Zaragoza, 2020. <https://drive.google.com/file/d/1VG03H9UPqsTBBw3qNKNmZ2PtUbfSsc6f/view>
- [19] M. de la C. Minguillón, X. Querol, J. M. Felisi y T. Garrido, *Guía para ventilación en aulas*, 2020, doi: 10.20350/digitalCSIC/12677.
- [20] Á. Muelas, A. Pina, P. Remacha, E. Tizné y J. Ballester, *Ventilación continua vs. intermitente: ¿qué ocurre si se ventila solo una o unas pocas veces cada hora?* Zaragoza, Grupo de Fluidodinámica/LIFTEC, Universidad de Zaragoza, 2021. <https://drive.google.com/file/d/1rQBUW5Beca01LjAOF A1dWj2M5FWWXrUd/view>

- [21] E. Jones, A. Young, K. Clevenger, P. Salimifard, E. Wu, M. L. Luna, M. Lahvis, J. Lang, M. Bliss, P. Azimi, J. Cedeno-Laurent, C. Wilson y J. Allen, *Healthy schools: risk reduction strategies for reopening schools*. Harvard T.H., Chan School of Public Health Healthy Buildings Program, 2020, doi: 10.13140/RG.2.2.22333.49127.
- [22] J. Pérez Soriano, *Documento de apoyo al profesorado para evitar la propagación del coronavirus SARS-CoV-2 en un centro educativo. Curso 2021-2022*. Málaga, Prevención Docente, 2021. https://drive.google.com/file/d/1KqmqCvyK_eMAhutWjNBM6iClRrHi2kHa/view

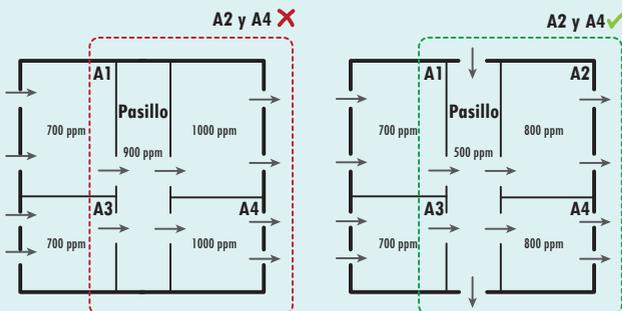
CAPÍTULO 9

VENTILACIÓN CRUZADA Y DISTRIBUIDA



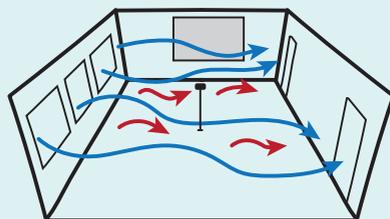
1. Ventilación cruzada: aberturas en paredes opuestas.

2. Ventilación distribuida: cuantos más puntos de entrada de aire, mejor.



Pasillos bien ventilados. ➡ Mejor calidad del aire en aulas. ✓ < 550 ppm CO₂ (absolutos).

¿DÓNDE MEDIR?



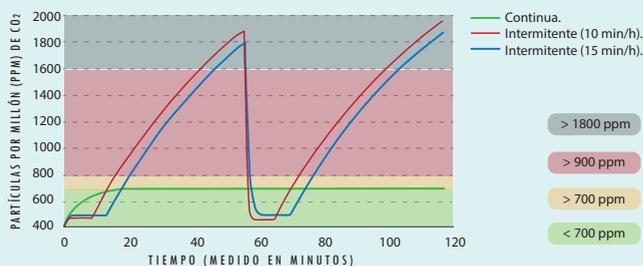
RECOMENDACIONES:

- En la zona central del aula.
- En un lugar alejado de ocupantes.
- A una altura > 1,5 metros.
- Alejar de entradas de aire (evitar zonas sombreadas).



Corriente de aire.

VENTILACIÓN CONTINUA MEJOR QUE INTERMITENTE



CONCLUSIONES:

Ventilación continua



Ventilación correcta todo el tiempo

Ventilación intermitente



Ventilación deficiente

PROTOCOLO DE VENTILACIÓN



1. Mantener las puertas abiertas.
2. Abrir las ventanas y dejarlas fijas todo el tiempo.
3. Empezar con una apertura total de 80 cm.
4. Registrar la evolución de CO₂.
5. Mantener condiciones fijas (ventanas, ocupación, etc.).
6. Al final de la prueba, valorar la calidad de la ventilación.
7. Repetir el proceso hasta ajustar la ventilación.

Índice

Agradecimientos	9
Introducción	11
Objetivos	13
Usuarios del libro	14
Contenido y organización	14
1. Ventilación y CO ₂ , contaminante e indicador indirecto de la degradación ambiental	15
Lista de acrónimos	15
1.1. Introducción	16
1.2. Ventilación contra la degradación ambiental	16
1.2.1. ¿Cómo se realiza la ventilación?	16
1.2.2. ¿Cómo se cuantifica y evalúa la ventilación?	18
1.3. ¿Qué es el dióxido de carbono?	19
1.3.1. Monitorización del nivel de CO ₂	19
1.3.2. Porcentaje de aire previamente respirado	20
1.4. Impacto directo del nivel de CO ₂ en la salud	20
1.4.1. Efectos adversos para la salud asociados a la exposición al CO ₂	20
Efectos en la química de la sangre	21
Efectos respiratorios y de las membranas mucosas	21
Efectos cardiovasculares	22
1.4.2. Deterioro de funciones cognitivas	22
1.5. Transmisión de enfermedades aéreas	23
1.6. Normativas, directrices y guías para la regulación de los niveles de CO ₂ en espacios interiores	24
Referencias	26
2. Estimación del riesgo relativo de transmisión de enfermedades aéreas mediante el modelo de Wells-Riley	31

Lista de acrónimos	31
2.1. Introducción	33
2.2. Modelo de Wells-Riley para propagación aérea de enfermedades	34
2.2.1. ¿Qué es un <i>quantum</i> ?	34
2.2.2. ¿Pueden contagiarse todos los ocupantes durante un evento?	34
2.2.3. ¿Qué es la tasa de emisión de <i>quanta</i> ?	34
2.2.4. ¿Cómo afectan las variantes al riesgo de contagio?	35
2.2.5. ¿Qué variables influyen en la transmisión aérea?	36
2.3. Aplicación del modelo a enfermedades de transmisión aérea	38
2.3.1. Indicadores de riesgo de infección a partir del modelo	38
2.3.2. Limitaciones del modelo de Wells-Riley	41
2.4. Nivel de CO ₂ como <i>proxy</i> de riesgo en el modelo de Wells-Riley	41
2.4.1. Limitaciones del uso del CO ₂ como <i>proxy</i> de riesgo de transmisión de enfermedades	42
Referencias	43
Anexos	46
3. CO ₂ y transmisión aérea de enfermedades	53
Lista de acrónimos	53
3.1. Introducción	54
3.2. Aplicación al SARS-CoV-2: COVID Risk ^{airborne}	54
3.3. Ejemplo de estimación del riesgo de infección: aula de educación infantil	57
3.3.1. Muestra de estudio	57
3.3.2. Condiciones de contorno	59
3.3.3. Hipótesis estudiadas	60
3.3.4. Resultados	61
3.3.5. Conclusiones	64
Referencias	64
4. Material particulado y ozono en espacios interiores	69
Lista de acrónimos	69
4.1. Introducción	70
4.2. ¿Qué es la materia particulada?	71
4.3. ¿Qué es el ozono?	72
4.4. Efectos de partículas inhalables y ozono sobre la salud	73
4.4.1. Efectos adversos de las partículas inhalables	74
4.4.2. Efectos adversos del ozono	74
4.5. Valores límite legislados de la concentración de partículas y ozono	75
4.6. Monitorización de PM y ozono en espacios interiores	76
4.7. Cómo reducir la concentración de partículas y ozono en el aire interior	78
Referencias	79

5. Compuestos orgánicos volátiles en ambientes interiores.....	85
Lista de acrónimos	85
5.1. Introducción: calidad del aire interior y VOC	85
5.1.1. Fuentes de emisión de VOC.....	86
5.1.2. Efectos sobre la salud y valores guía.....	88
5.2. Métodos para la determinación de VOC en ambientes interiores	90
5.3. Concentraciones de VOC en ambientes interiores y evaluación de su origen.....	91
5.3.1. Viviendas	93
5.3.2. Centros de Educación Infantil y Primaria	94
5.3.3. Centros deportivos	95
5.3.4. Peluquerías.....	96
5.4. Conclusiones	97
Referencias	97
6. Las partículas biológicas en el aire: la atmósfera como vector de las partículas biológicas y su acción sobre los seres vivos	103
Lista de acrónimos	103
6.1. Introducción.....	103
6.2. Historia de la aerobiología.....	104
6.3. Metodología aerobiológica	105
6.4. Algunas aplicaciones de la aerobiología.....	105
6.4.1. Aeropatología.....	105
6.4.2. Aeroalergología	107
6.5. Procesos aerobiológicos.....	108
6.6. Salud ambiental: esporopolinosis	108
6.7. Partículas biológicas presentes en las atmósferas de interiores	111
6.8. La importancia aerobiológica del polvo doméstico	111
6.9. El cambio climático y las alergias respiratorias	113
6.10. La capacidad alergénica e infectiva de las partículas biológicas presentes en el aire.....	114
6.11. ¿Nuevas causas de la prevalencia de la atopia?	116
6.12. Conclusión.....	118
Referencias	118
7. Filtración de aire en espacios interiores	123
Lista de acrónimos	123
7.1. Introducción.....	124
7.2. Tipos de filtro	124
7.3. Caudal necesario	129
7.4. Mantenimiento de un equipo	134
7.5. Verdades y mentiras de los filtros HEPA portátiles	135
Referencias	138

8. Ventilación e infiltraciones en viviendas	141
Lista de acrónimos	141
8.1. Introducción	142
8.2. Formas de ventilación más comunes en viviendas	142
8.2.1. Ventilación natural	143
Ventilación por infiltraciones a través de la envolvente	144
Estanqueidad al aire	144
Evaluación de la estanqueidad	145
Análisis mediante modelos predictivos estadísticos	145
Ventilación mediante apertura de ventanas	147
Ventilación por tiro inducido (efecto chimenea)	149
8.2.2. Ventilación mecánica controlada	149
Extracción mecánica por núcleos húmedos (flujo simple)	150
Admisión y extracción mecánica (doble flujo)	151
8.4. Normas y guías de aplicación	152
8.4.1. Norma española	152
8.4.2. Regulaciones en Europa, Canadá y Estados Unidos	154
8.5. Modelo predictivo para viviendas plurifamiliares en área mediterránea	156
8.5.1. Modelo predictivo para viviendas plurifamiliares desde 1980 hasta el presente	157
8.5.2. Modelo predictivo para viviendas plurifamiliares desde 1954 hasta 1979	159
Referencias	160
9. Calidad del aire por monitorización de CO ₂ en centros educativos ..	165
Lista de acrónimos	165
9.1. Introducción	165
9.2. Recomendaciones generales	169
9.2.1. Consejos sobre el uso y localización del analizador	170
9.2.2. Protocolo de ventilación	171
9.3. Algunos aspectos particulares	173
9.3.1. Ventilación cruzada	173
9.3.2. Ventilación distribuida	174
9.3.3. Espacios con requisitos especiales	175
Ventilación en los pasillos	175
Ventilación en comedores	175
9.4. Ventilación continua o intermitente	176
9.5. Cómo ventilar si no hay medidor de CO ₂	179
Referencias	181

Calidad del aire interior en los edificios para el bienestar: estrategias de aplicación práctica

El libro profundiza en los beneficios de la adecuada ventilación de los espacios interiores que aseguran la aportación de aire exterior y remoción de los contaminantes mediante una gestión basada en la monitorización ambiental. Adopta como elemento central la medición de la concentración de CO₂ en el aire de los locales, como estrategia más asequible y de suficiente fiabilidad —a efectos operativos— para conocer la degradación del ambiente interior en locales de densidad media o elevada. Este indicador permite evaluar indirectamente el riesgo de contagio de enfermedades de transmisión aérea. Igualmente, profundiza en las partículas biológicas en el aire y en una serie de contaminantes comunes en el interior de los edificios, como son el material particulado, los compuestos orgánicos volátiles y el ozono. Finalmente, incluye claves en materia de autoprotección frente a la transmisión de enfermedades aéreas y purificación del aire, así como la importancia de la divulgación científica, la educación y la concienciación ciudadana sobre los beneficios de la ventilación.

Va dirigido a entidades, organismos, comunidades, asociaciones y personas preocupadas por la calidad del aire de los espacios habitables.

Miguel Ángel Campano. Doctor arquitecto y profesor titular de Acondicionamiento e Instalaciones de la Universidad de Sevilla. Miembro de las plataformas técnico-científicas Aireamos y VentilANDO. Experto en confort ambiental, calidad del aire e iluminación, aplicadas a arquitectura, eficiencia, bienestar y salud.

Jessica Fernández-Agüera Escudero. Doctora arquitecta e investigadora del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Universidad de Sevilla. Directora de Sostenibilidad del proyecto europeo EDIAQI «Evidence driven indoor air quality improvement». Forma parte de la Red de Investigación Europea IDEAL, clúster para mejorar y salvaguardar la salud y el bienestar de los ciudadanos en ambientes interiores.

Juan José Sendra Salas. Catedrático de Construcciones Arquitectónicas de la Universidad de Sevilla. Investigador responsable del Grupo de Investigación de Excelencia TEP130 «Arquitectura, patrimonio y sostenibilidad: acústica, iluminación, óptica y energía» del Plan Andaluz de Investigación Desarrollo e Innovación. Premio Fama de Investigación de la Universidad de Sevilla en 2019 en el Área de Ingeniería y Arquitectura.

