



ORIGINAL

Descripción de la calidad del aire y características ambientales en aulas de primaria de la Comunidad de Madrid

Begoña Pérez-Moneo^{a,b,*}, María Aparicio Rodrigo^{a,c}, M.^a Dolores Redondas Marrero^d, Kevin Sabariego Moreno^e y María del Mar Barbero Barrera^e

^a Departamento de Salud Pública y Materno-infantil, Facultad de Medicina, Universidad Complutense, Madrid, España

^b Servicio de Pediatría, Hospital Universitario Infanta Leonor, Madrid, España

^c Centro de Salud Entrevías, Servicio Madrileño de Salud, Madrid, España

^d Departamento de Matemáticas, Escuela Técnica Superior de Edificación, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España

^e Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España

Recibido el 16 de julio de 2024; aceptado el 30 de enero de 2025

PALABRAS CLAVE

Niño;
Escuelas;
Calidad del aire de interiores;
Partículas en suspensión

Resumen

Introducción: La calidad del aire en las escuelas es motivo de preocupación a nivel europeo, con escasos datos publicados sobre la Comunidad de Madrid.

Material y métodos: Estudio descriptivo, longitudinal sobre la presencia y distribución de contaminantes en cuatro colegios de Madrid que se seleccionaron considerando su ubicación, su exposición al tráfico y su cercanía a zonas verdes. Se midieron contaminantes y características ambientales en aulas de primaria. La recogida de datos se realizó con sensores en 5 campañas de 2 semanas de duración. Los datos se analizaron con el programa R. Se calcularon medianas, rangos y porcentajes de superación de límites recomendados. Se estudiaron correlaciones entre contaminantes y condiciones ambientales.

Resultados: Se encontraron niveles de partículas en suspensión (PM) de 2,5 μm por encima del umbral recomendado en el 40 al 70% de las mediciones. Los compuestos orgánicos volátiles (COV) superaron el umbral recomendado en abril en el 41,52%. El CO₂ superó el límite recomendado en tres de las campañas. Las partículas ultrafinas mostraron gran variabilidad. Los niveles de temperatura, CO₂, COV, PM₁, PM_{0,3} y PM_{2,5} fueron más altos en las aulas ocupadas. La humedad se correlacionó positivamente con PM_{0,3}, PM₁ y PM_{2,5}, y negativamente con ultrafinas.

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: begona.perez@salud.madrid.org (B. Pérez-Moneo).

<https://doi.org/10.1016/j.anpedi.2025.503792>

1695-4033/© 2025 Asociación Española de Pediatría. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Conclusiones: Este es el primer estudio que evalúa los contaminantes que existen en el interior de colegios de la Comunidad de Madrid y su concentración. Se observan niveles de CO₂, PM_{2.5} y COV por encima de las recomendaciones actuales.

© 2025 Asociación Española de Pediatría. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

KEYWORDS

Child;
Schools;
Indoor air quality;
Particulate matter

Description of air quality and environmental characteristics in primary school classrooms in the Community of Madrid

Abstract

Introduction: Air quality in schools is a concern at the European level, and few data have been published on the subject in the Community of Madrid.

Material and methods: We conducted a longitudinal descriptive study on the presence and distribution of pollutants in four schools in Madrid selected on account of their location, exposure to traffic and proximity to green areas. We measured pollutants and assessed environmental characteristics in primary school classrooms. We measured pollutants with sensors over five data collection campaigns, each lasting two weeks. The obtained data were analyzed with the R software. We calculated the median, range and percentage of exceedance of recommended thresholds and assessed environmental conditions.

Results: We found levels of 2.5 µm particulate matter (PM) above the recommended threshold in 40% to 70% of the measurements. Volatile organic compounds (VOC) exceeded the recommended threshold in April in 41.52% of the measurements. The level of CO₂ exceeded the recommended threshold in three of the campaigns. There was broad variation in ultrafine particles. Temperature, CO₂, VOC, PM₁, PM_{0.3} and PM_{2.5} levels were higher in occupied classrooms. Humidity was positively correlated to PM_{0.3}, PM₁ and PM_{2.5} levels and negatively correlated to ultrafine particle levels.

Conclusions: This is the first study to assess indoor pollutants and their concentration in schools in the Madrid region. We found levels of CO₂, PM_{2.5} and VOC exceeding the currently recommended thresholds.

© 2025 Asociación Española de Pediatría. Published by Elsevier España, S.L.U. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Introducción

En 2022, Naciones Unidas reconoce el derecho a un medio ambiente limpio, saludable y sostenible como un derecho humano¹, incluyendo respirar un aire limpio. Esta declaración pone de relieve la gravedad del problema, evidenciada en el informe *Global Burden of Disease Study* de 2019², en el que se estiman 368.006 muertes en Europa relacionadas con la contaminación del aire, lo que representa un aumento del 42,4% con respecto al año 1990.

Se conoce que la calidad del aire influye en la salud³ y que los niños son especialmente vulnerables por cuestiones comportamentales (curiosidad natural, nula capacidad de decisión para evitar la exposición) y biológicas: menor altura que favorece la exposición a determinadas partículas, mayor superficie corporal relativa que los adultos, mayor esperanza de vida, mayor volumen respiratorio por minuto y mayor consumo energético⁴, por lo que, con el mismo nivel de contaminantes en el aire, su exposición a los mismos resulta mayor en términos absolutos, produciéndose, además, sobre un organismo sin todos los mecanismos de defensa desarrollados⁵. Por otra parte, en los países de alto nivel de renta es habitual que los niños asistan al cole-

gio entre 7 y 8 horas al día, donde realizan actividades en interior y exterior, estando en contacto con contaminantes en ambas localizaciones. Es importante caracterizarlos en ambos ambientes para tener una imagen global del nivel y del tipo de exposición⁶.

Por estos motivos, la calidad de aire en los centros escolares ha sido objeto de investigación por parte de las autoridades sanitarias desde hace más de 20 años⁷. A nivel europeo⁸⁻¹¹ se han realizado diversos estudios para conocer cuáles son los contaminantes que están presentes dentro de los colegios, sus fuentes y los efectos sobre la salud de los niños escolarizados. Algunos de los efectos relevantes descritos han sido: incremento de las consultas por patología respiratoria en atención primaria^{12,13}, aumento del riesgo de padecer obesidad¹⁴, reducción del rendimiento académico^{15,16} o alteraciones del desarrollo neurológico¹⁷, entre otros (tabla 1).

En España también ha existido preocupación por este tema, habiéndose publicado numerosos trabajos¹⁸⁻²⁴ referentes a la calidad de aire exterior e interior de los colegios, y las sociedades científicas pediátricas, conscientes de la trascendencia de este tema, también han contribuido a su difusión y estudio constituyendo diversos comités, como el

Tabla 1 Descripción de los contaminantes más habitualmente encontrados en el interior de las aulas escolares, fuentes de los mismos y efectos sobre la salud^{9-11,27,32,33}

Parámetro	Fuentes		Efectos en salud
	Exterior	Interior	
CO ₂	Tráfico, combustión, industria	Combustión: calefacción, tabaco, chimeneas Respiración de humanos	Crisis asmáticas Asma crónica Tos seca nocturna Rinitis Síntomas neurológicos Dificultades en el desempeño escolar
COV <i>Incluye entre otros:</i> <i>formaldehído</i> <i>limoneno</i> <i>tolueno</i> <i>benceno</i> <i>xyleno</i> <i>clorobenceno</i> <i>etilbenceno</i> <i>tricloroetileno</i>	Industria, tráfico	Spray, productos de limpieza, productos de aseo personal, ambientadores, insecticidas, vapor de la gasolina, libros y revistas nuevas, muebles, pinturas de pared, solados (maderas, baldosas, linóleo, PVC, alfombras), disolventes, pegamentos, barnices, humedades Aumentan al aumentar la temperatura	Relacionados principalmente con patología alérgica y respiratoria: • Aumento de riesgo de asma • Obstrucción crónica de vías respiratorias • Irritación ocular crónica
PM 2,5 μm	Incendios, erupciones volcánicas, industria, tráfico, calderas	Actividades de combustión (tabaco, calefacciones, cocina, incienso) Fibras de aislamiento, amianto	Asma inducida por el ejercicio Dermatitis en flexuras Asma alérgica <i>Pick test</i> positivos a alérgenos interiores Inflamación de vías aéreas en asmáticos y no asmáticos
PM 1,0 μm PM 0,3 μm			Asma Enfermedades respiratorias Reducción de la función pulmonar
Partículas ultrafinas < 0,1 μm			Inflamación sistémica Estrés oxidativo (afectando a varios órganos)

COV: compuestos orgánicos volátiles; PM partículas en suspensión.

Comité de Salud Medioambiental de la Asociación Española de Pediatría (AEP).

Con este contexto, se planifica un proyecto multidisciplinar, liderado por profesionales de arquitectura, para describir y analizar los factores relacionados con la presencia de contaminantes en el interior de colegios, prestando especial atención al estudio de partículas en suspensión (PM) de tamaño inferior a 2,5 μm. Se trata de comprender mejor su origen, las consecuencias en la salud de sus ocupantes y plantear posibles soluciones tanto estructurales como de hábitos de uso. El trabajo que aquí se presenta es la parte inicial del proyecto y tiene como objetivo describir la presencia y la distribución de distintos contaminantes, temperatura y humedad en el interior de las aulas de cuatro colegios de la Comunidad de Madrid, que pueden afectar a la salud de los niños en edad escolar.

Material y métodos

Se diseñó un estudio descriptivo, longitudinal, de medición de contaminantes y características ambientales en cuatro

colegios de la Comunidad de Madrid. Los centros escolares se seleccionaron a conveniencia, para que tuvieran diferente localización geográfica, exposición a tráfico y cercanía a zonas verdes, de tal forma que tres de ellos se encuentran en el municipio de Madrid (norte, este y centro) y uno en otro municipio de la periferia. Sus características y las de sus alrededores se exponen en la [tabla 2](#). Solo el colegio 3 disponía de un sistema de ventilación controlada, siendo el de los demás ventilación natural. En cada uno de los colegios se escogieron dos aulas correspondientes a primaria que fueran soleadas y en la primera planta del edificio. Buscando la mayor homogeneidad entre grupos y actividades en el interior, así como la correlación con otras investigaciones^{10,20}, se escogieron niños de entre 8 y 11 años.

El proyecto fue aprobado por el comité de ética del Hospital Gregorio Marañón (PID2021-123023OA-I00) y por las direcciones de los centros participantes, que firmaron un consentimiento informado. Las familias fueron informadas pertinentemente de las actividades a realizar y, al mismo tiempo, el equipo investigador se comprometió a no interferir en la actividad educativa. En esta fase del proyecto

Tabla 2 Descripción de la localización de los centros, características socioeconómicas del distrito y alumnado

	Localización	Tamaño aula m ² / N.º alumnos	m ² / alumno	Distancia a autovía (m)	Distancia a parque (m)	Distancia a la estación de medición de contaminantes municipal	Nivel medio de contaminantes en aire exterior en la estación más próxima año 2023 (µg/m ³)	Tasa de extranjeros (%)	Tasa de paro (%)	Estudios universitarios (%)	Renta media bruta (€)	
Colegio 1	Suroeste	Aula 1	59,8 23	2,60	145	150	2,6 km	NO _x = 24,02 NO ₂ = 15,72 PM ₁₀ = 15,69 PM _{2,5} = 7,68 O ₃ = 59,32	17,5	9,1	13,6	28 209
		Aula 2	59,8 25	2,39								
Colegio 2	Centro	Aula 1	56,6 26	1,89	285	79	1,4 km y 1,6 km	NO _x = 29,22 NO ₂ = 19,66 O ₃ = 58,24	8,8	5,7	76,6	54 340
		Aula 2	49,2 26	2,18								
		Aula 3	49,4 23	2,46								
Colegio 3	Sureste	Aula 1	45,1 25	1,80	692,5	45,5	10 km	NO _x = 37,17 NO ₂ = 21,71 PM 10 = 17,73 O ₃ = 64	9,4	6,9	19,0	34 787
		Aula 2	45,1 25	1,80								
Colegio 4	Norte	Aula 1	38,2 23	1,69	800	118,5	3,7 km 4 km	NO _x = 31,79 NO ₂ = 20,18 PM ₁₀ = 19,37 O ₃ = 60,78	9	6,1	28,8	49 150
		Aula 2	38,8 24	1,59								

PM: partículas en suspensión.

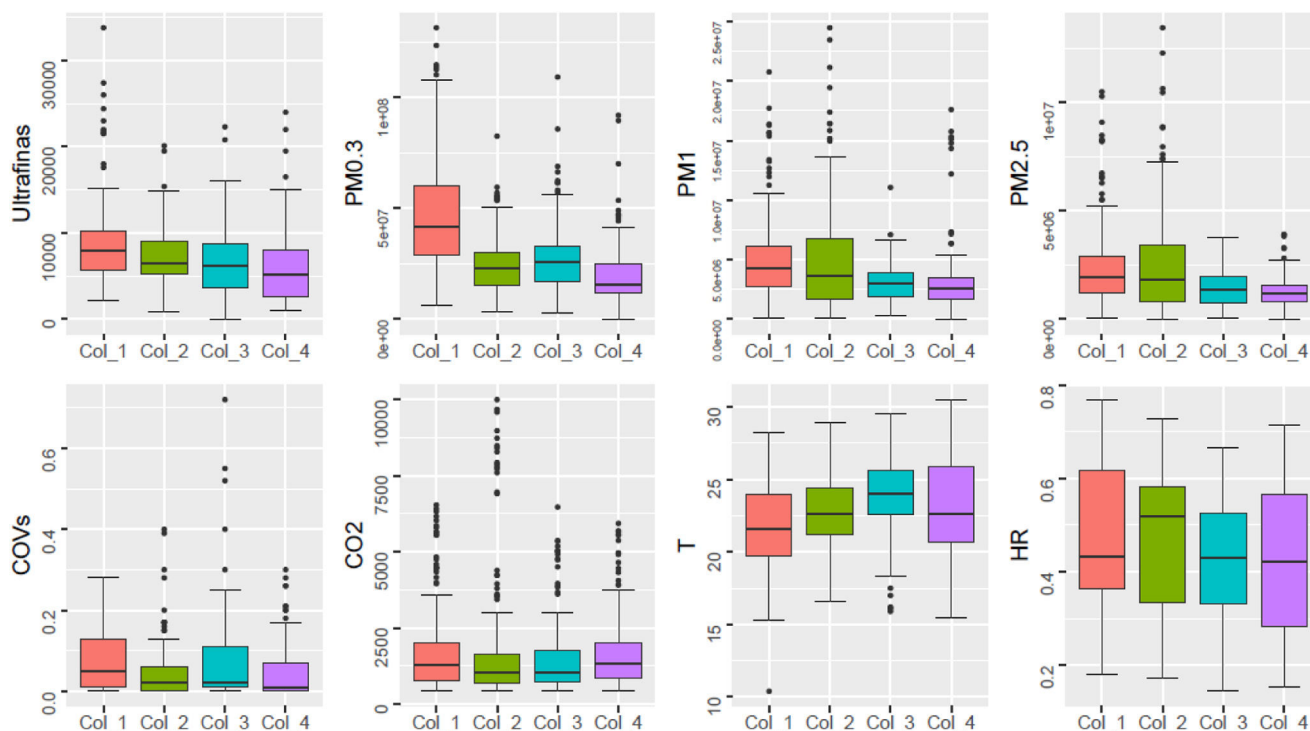


Figura 1 Resultados de la medición de contaminantes, temperatura y humedad en los cuatro colegios. Datos agrupados de las cinco campañas. PM representadas en part/m^3 y COV en ppm. Col: colegio; COV: compuestos orgánicos volátiles; HR: humedad relativa; part: partículas; PM: partículas en suspensión; ppm: partes por millón; T: temperatura.

no se realizó ninguna actividad con las familias ni con el profesorado, fuera de las reuniones informativas.

La recogida de datos se realizó con sensores localizados en el interior de las aulas, aproximadamente a un metro del suelo para que correspondiera con la altura a la que respiran los niños. Se realizaron cinco campañas tomando datos puntuales en cada aula en cinco momentos diferentes de la jornada escolar: antes de la entrada del alumnado, antes del recreo de media mañana, después de este, después del descanso de mediodía y, la última, tras la salida. Se dispuso de un equipo de medida portátil para cada tipo de contaminante. El investigador encargado de la recogida de datos se desplazó a cada uno de los centros con los equipos durante las dos semanas de cada campaña, realizando mediciones durante 2-3 días de lunes a viernes, obteniendo 10-15 medidas puntuales en cada aula por campaña. Se registraron los siguientes contaminantes y características ambientales: PM de $2,5 \mu\text{m}$ (PM_{2,5}), PM de $1 \mu\text{m}$ (PM₁), PM de $0,3 \mu\text{m}$ (PM_{0,3}), partículas ultrafinas de menos de $0,1 \mu\text{m}$ (UFP), compuestos orgánicos volátiles (COV), temperatura, humedad y CO₂ (tabla 3). Para las PM_{2,5} se dispone de datos en partículas (part/m^3) en todas las campañas, y en $\mu\text{m}/\text{m}^3$ en octubre y diciembre. Se anotaron las distintas actividades que se llevaban a cabo durante la jornada escolar monitorizada.

Los resultados expuestos corresponden a los recogidos en las campañas de febrero, abril, mayo, octubre y diciembre de 2023. Una vez que los datos fueron registrados, se analizaron utilizando el programa estadístico R, eliminando los datos anómalos. Se analiza la distribución de las variables: solo la temperatura muestra una distribución normal, siendo el resto de variables asimétricas a la derecha. A con-

tinuación se realizó un análisis descriptivo con mediana y percentiles, filtradas por campaña, por colegio y teniendo en cuenta si el aula estaba vacía u ocupada. Además, se calculó el porcentaje de veces que las medidas superan el umbral de los valores límite recomendados²³, que se describen en la tabla 3. Finalmente, se realizó un estudio de correlación entre los diferentes contaminantes entre sí y con las condiciones de humedad y temperatura. El valor de significación estadística se considera $p < 0,05$. No se ha realizado correlación con los contaminantes de aire exterior porque, en este momento, trasciende el objeto de la investigación.

Resultados

Respecto a las características ambientales, no hubo diferencia en la temperatura entre centros, siendo los valores más bajos los correspondientes a las campañas de febrero y diciembre, con una media de $21,01^\circ\text{C}$ (desviación estándar [DE]: 2,5) y $20,5^\circ\text{C}$ (DE: 1,91), respectivamente, y los más altos los de abril, con una media de $25,8^\circ\text{C}$ (DE: 2,37), coincidiendo con una ola de calor. Los valores de humedad oscilan entre el 29% (DE: 7) de la determinación correspondiente al mes de abril y el 60% (DE: 7) del mes de octubre.

En la figura 1 se muestra la distribución de los valores obtenidos para cada centro en el total de las 5 campañas. La tabla 4 recoge la mediana y los percentiles 10, 25, 75 y 90 de las variables, agrupadas de los cuatro centros, al no existir diferencias significativas entre ellos. Se puede observar que los valores de PM_{2,5} son más elevados durante los meses fríos, especialmente en diciembre. Las partículas de

Tabla 3 Variables registradas en cada campaña, equipos de medida y valores límite de referencia

Parámetro (unidades)	Equipo (rango detección)	Valor límite	Fuente
CO ₂ (ppm)	DIOXCARE DX750 (0 a 9 999)	1.200 (800 + CO ₂ aire exterior [300 a 400])	Calidad del ambiente interior en edificios de uso público. Comunidad de Madrid ¹⁴
		700	Recomendación Comité Salud Medioambiental AEP
		1.300 (valor medio con sala ocupada)	Legislación francesa ²³
		1.250 (valor medio con sala ocupada)	Legislación portuguesa ²³
COV (ppb) ^a	DRÄGER X-pid 9500 (rango depende de cada compuesto)	1.500 (valor medio con sala ocupada)	Legislación Reino Unido ²³
		120 ppb	Recomendación ^{15,16}
		600 ppb	Legislación portuguesa ²³
PM _{2,5} (µg/m ³ , part/m ³)	Particle counter PCE-PQC 12EU (0,3 a 25)	300 ppb (media de 8 h)	Legislación Reino Unido ²³
		15 µg/m ³ (media de 24 h)	OMS ³
		5 µg/m ³ (anual)	Legislación portuguesa ²³
PM _{1,0} (part/cm ³)		25 µg/m ³	ASHRAE Standard 62.1 (2010)
		35 µg/m ³	
PM _{0,3} (part/cm ³)		Sin valores de referencia	
Partículas ultrafinas < 0,1 µm (part/cm ³)	P-Track Ultrafine 8525 TSI (0 a 5 × 10 ⁵)	102.000 part./m ³	Clase 6 ISO. UNE EN ISO 14644-1:2016
Temperatura (°C)	DIOXCARE DX750 (-20 a 60)	Sin valores de referencia	
Humedad relativa (%)	DIOXCARE DX750 (0 a 100)	23 y 25 °C en verano	RD 178/2021, de 23 de marzo,
		21 y 23 °C en invierno	UNE EN 16798-1:2020
		45 al 60% en verano	RD 1027/2007 RITE
		40 al 50% en invierno	

ASHRAE: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers; COV: compuestos orgánicos volátiles; OMS: Organización Mundial de la Salud; part: partículas; PM: partículas en suspensión; ppb: partes por billón; ppm: partes por millón; RD: Real Decreto; RITE: Reglamento de las Instalaciones Térmicas en los Edificios; UNE: Asociación Española de Normalización.

^a COV determinados: acetato de butilo, acetato de etilo, acetato de vinilo, acetona, acroleína, benceno, bromometano, butadieno 1-3, butanona 2, butacrilato, butiraldehído, carbonato de dietilo, ciclohexano, clorobenceno, cloruro de vinilo, dicloroetano 1-1, dicloroetano cis 1-2, dicloroetano trans 1-2, dimetil carbonato, disulfuro de carbono, epiclorohidrina, estireno, etanol, eteno, etil metil carbonato, etil acrilato, etilbenceno, fosfina, heptano, hexano n, isobutileno, isopropanol, metacrilato de metilo, metilbutiraldehído 2, propanol 1, sulfuro de hidrógeno, tetracloroetano, tetrahidrofurano, tolueno, tricloroetileno, xileno m-o-p, óxido de etileno, óxido de propileno.

menor tamaño (PM₁ y PM_{0,3}) siguen una distribución similar; en cambio, las UFP no siguen el mismo patrón y presentan un rango de distribución amplio (mediana 6.585, con rango intercuartílico de 4.462,5 a 9.060,0). Respecto a los valores obtenidos para COV, en la [figura 1](#) se observa la dispersión existente en los valores más superiores, pero con un rango intercuartílico sin diferencias entre centros. Los datos de COV corresponden a abril, mayo y diciembre, por fallo del equipo de medida en las otras dos campañas.

La [tabla 5](#) presenta el porcentaje de medidas de cada campaña en que se superan los valores fijados para PM_{2,5}, CO₂ y COV, teniendo en cuenta la ocupación de las aulas. No se incluyen las PM de menor tamaño por no tener valores de referencia descritos. Analizando los datos, se observa que se supera el valor recomendado por la OMS para PM_{2,5} en el 40% de las medidas del mes de octubre y en el 70% de las de diciembre. Para los COV se supera el umbral en el mayor número de determinaciones (41,52%) en el mes de abril. Los niveles de CO₂ se encuentran por encima del límite recomendado de 1.200 ppm en todas las campañas menos abril, y por encima de 700 ppm en todas las campañas. En la campaña

del mes de mayo se supera el valor de 5.000 ppm en el 31,4% de las tomas en las aulas ocupadas. La [tabla 6](#) muestra la relación de niveles de CO₂ con el nivel de ocupación de las aulas.

En la [figura 2](#) se muestra la relación de los niveles de contaminantes con la ocupación de las aulas. Para las PM₁ y PM_{0,3} los niveles son superiores en el caso de ocupación de las aulas, al igual que para las PM_{2,5}, siendo las diferencias estadísticamente significativas. En el caso de los COV se observa una diferencia respecto al aula vacía, con una diferencia de medias (DM) de 36,21 ppb, intervalo de confianza al 95% [IC 95] de 21,87 a 50,55. Ocurre de forma similar con la temperatura, ya que los valores son más elevados cuando las aulas están ocupadas, con una DM de 1,28 °C (IC 95: 0,76 a 1,80), y con los niveles de CO₂, con una DM de los datos agrupados de 623,39 ppm (IC 95: 378,70 a 868,08).

En el estudio de correlación entre partículas en suspensión y condiciones ambientales se encuentra que los valores de PM_{2,5} tienen una correlación positiva con los detectados de PM₁ (coeficiente de correlación [CC]: 0,983; p < 0,05) y en PM_{0,3} (CC: 0,439; p < 0,05). Asimismo, se observa que

Tabla 4 Resumen numérico de los datos promedios por campaña de COV, CO₂, PM, ultrafinas, humedad relativa y temperatura

Temperatura (°C)		Feb-23	Abr-23	May-23	Oct-23	Dic-23	Global
	Media (DE)	21,01 (2,5)	25,79 (2,37)	24,26 (2,06)	22,29 (2,2)	20,50 (1,91)	22,9 (3)
HR (%)	P10	24	20	35	52	46	26
	P25	29	24	44	55	51	33
	P50	36	29	51	58	57	44
	P75	39	34	56	63	65	57
	P90	42	38	59	71	68	63
CO ₂ (ppm)	P10	598,4	519,0	567,0	601,0	827,8	587,0
	P25	828,5	635,0	823,0	726,0	1.323,7	754,5
	P50	1.055,5	940,0	2.835,0	921,0	1.889,0	1150,0
	P75	1.661,8	1.275,0	5.022,5	1.528,0	2.580,7	1.862,5
	P90	2.251,0	1.632,0	6.538,0	1.977,0	3.047,1	3.589,0
CO ₂ (ppm) estandarizado por ocupación	P10	255,9	267,3	258,7	288,3	441,0	275,5
	P25	417,0	342,9	415,8	353,3	683,1	392,2
	P50	549,4	482,4	1.186,2	503,3	1.002,0	582,4
	P75	806,0	666,7	2.639,5	772,7	1.275,6	996,7
	P90	1.223,3	816,0	3.656,6	1.096,6	1.630,9	1.714,6
PM _{2,5} (µg/m ³)	P10	^a	^a	^a	5,46	5,97	5,49
	P25				9,55	12,74	10,78
	P50				16,53	19,32	17,84
	P75				25,95	43,38	28,58
	P90				34,53	80,67	46,15
PM _{2,5} (part/cm ³)	P10	0,42	0,27	0,23	0,20	0,38	0,24
	P25	1,23	0,50	0,81	0,61	1,18	0,87
	P50	1,67	1,18	1,44	1,35	1,75	1,50
	P75	2,38	1,84	2,21	2,19	4,15	2,35
	P90	3,16	2,69	2,82	3,85	8,30	3,78
PM ₁ (part/cm ³)	P10	0,00	0,61	0,64	0,54	0,53	0,46
	P25	0,52	1,05	1,49	1,35	1,86	1,20
	P50	3,08	2,38	3,04	2,63	3,33	2,86
	P75	4,84	3,57	4,32	4,23	7,32	4,57
	P90	6,68	5,01	5,38	7,30	15,66	7,22
PM _{0,3} (part/cm ³)	P10	0,00	8,93	23,11	7,02	8,30	7,38
	P25	12,91	12,76	29,46	10,26	12,73	13,25
	P50	26,72	16,81	35,07	14,35	20,89	22,78
	P75	38,34	24,92	45,97	23,50	45,98	35,79
	P90	55,53	33,24	63,01	40,78	103,15	54,14
Ultrafinas (part/cm ³)	P10	3.587	3.050	3.150	1.994	2.546	2.420
	P25	5.135	6.080	5.285	2.500	4.492	4.400
	P50	7.575	8.290	7.650	4.250	5.935	6.740
	P75	9.945	10.000	10.300	5.760	7.795	8.980
	P90	13.880	11.400	13.000	7.008	10.110	11.600
COV (ppb)	P10	^b	10	1	^b	0	0
	P25		30	10		0	1
	P50		60	20		0	20
	P75		140	80		0	90
	P90		210	150		10	170

HR: humedad relativa; COV: compuestos orgánicos volátiles; DE: desviación estándar; P: percentil. part: partículas; PM: partículas en suspensión; ppb: partículas por billón; ppm: partes por millón;

^a Sin mediciones en (µg/m³), ver datos en part/cm³ en la fila siguiente.

^b Falta medida por fallo técnico del equipo.

hay una correlación positiva entre los niveles de humedad y los niveles de PM_{0,3} (CC: 0,149; p < 0,05), PM₁ (CC: 0,258; p < 0,05) y PM_{2,5} (CC: 0,259; p < 0,05), mientras que es negativa para las UFP (CC: -0,216; p < 0,05).

Discusión

En este estudio se describe la presencia y los niveles de diferentes contaminantes, la temperatura y la humedad en el

Tabla 5 Porcentaje de mediciones en cada campaña en que se supera el límite recomendado

Parámetro (límite)	Ocupación aulas	Feb-23	Abr-23	May-23	Oct-23	Dic-23
PM2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Vacía	a	a	a	40,32	55,00
	Ocupada	a	a	a	62,07	72,22
CO ₂ (ppm) (1.200 ppm)	Vacía	13,89	4,60	46,5	13,04	46,42
	Ocupada	52,17	4,15	70,37	44,53	90,27
CO ₂ (ppm) (700 ppm) ^b	Vacía	30,55	18,60	51,16	36,96	67,86
	Ocupada	84,06	75,42	80,56	86,55	97,22
COV (ppb) (120 ppb)	Vacía	a	13,95	9,30	a	0,29
	Ocupada	a	41,52	19,44	a	0,47

COV: compuestos orgánicos volátiles; PM: partículas en suspensión; ppb: partículas por billón; ppm: partículas por millón.

^a Datos faltantes por medición en unidades sin valores de referencia descritos.

^b Recomendación del Comité de Salud Medioambiental de la AEP.

^c Datos faltantes por fallo técnico del equipo de medida.

Tabla 6 Niveles de CO₂ por aula

		m ² /alumno	Niveles CO ₂ ppm (mediana global)
Colegio 1	Aula 1	2,60	1.159,0
	Aula 2	2,39	1.522,0
Colegio 2	Aula 1	1,89	985,0
	Aula 2	2,18	1.228,5
	Aula 3	2,46	623,5
Colegio 3	Aula 1	1,80	1.001,0
	Aula 2	1,80	1.117,0
Colegio 4	Aula 1	1,69	991,0
	Aula 2	1,59	1.600,0

interior de las aulas de primaria de cuatro colegios de la Comunidad de Madrid. Se observan niveles por encima de los límites recomendados por diferentes agentes reguladores en varios de los parámetros analizados: PM2,5, COV y CO₂. Estos valores son similares a los descritos previamente en la literatura, por lo que se esperaría que produjeran síntomas similares en los niños ocupantes de las aulas¹⁰.

Un aspecto de gran interés es la ausencia de niveles de referencia para partículas pequeñas, así como la falta de un marco regulador en el interior de las aulas. Considerando las PM menores de 2,5 μm , la OMS distingue, en aire exterior, bajas y altas concentraciones de UFP (entre 1.000 y 10.000 part/cm³ en media de 24 horas). Para aire interior no hay valores de referencia, y los valores de UFP que se describen oscilan entre 5.700 y 9.000 part/cm³ en colegios de Portugal²⁵ o de Australia²⁶, y entre 12.000 y 18.000 part/cm³ en colegios de Barcelona²⁰. En nuestro estudio se encuentran entre 4.417,88 part/cm³ en el mes de octubre, cuando la humedad relativa es más elevada, y 8.290,80 part/cm³ en el mes de febrero, con humedad y temperaturas más bajas, con valores similares en todos los colegios a pesar de la diferente ubicación y más parecidos a los de Portugal o Australia. En cuanto a las partículas entre 0,1 μm y 2,5 μm , no se han encontrado estudios publicados que las relacionen con problemas de salud, por lo que es importante investigar su posible vínculo para comprender mejor el papel de la exposición a las PM en aire interior. Este es uno de los objetivos de la investigación actual.

Respecto a la presencia de COV en las aulas, se ve un aumento de niveles, estadísticamente significativo, cuando las aulas están ocupadas. Esto puede ser explicado por el propio origen de estos compuestos, material escolar entre ellos, y por el aumento de temperatura de las clases por su ocupación. Los datos recogidos son similares en los cuatro centros, por lo que la ubicación de los mismos, probablemente, no influya.

Los niveles de CO₂ rara vez producen síntomas, pero son un marcador indirecto de la calidad del aire interior, muy relacionado con la ventilación de las aulas y su nivel de ocupación. Según el uso que se dé a los edificios públicos, la Comunidad de Madrid²⁷ establece unos límites objetivos, y define que valores por encima de 1.200 ppm indican una calidad de aire interior pobre, especialmente en lugares en los que el origen del compuesto es la respiración humana. La AEP²⁸ recomienda como valor óptimo en las aulas un nivel de 500 ppm e intervenir por encima de 700 ppm. Nuestro estudio refleja que existe un mayor nivel de CO₂ cuando las aulas están ocupadas. Esto es importante para el desempeño académico de los niños. Un estudio americano muestra que valores de 1.000 ppm por encima del valor exterior conducen a un 0,5-0,9% de absentismo escolar, lo que supone un incremento del 10-20% sobre colegios mejor ventilados²⁹. Otro estudio de 2011³⁰ sugiere que, con el aumento de la tasa de ventilación de las aulas, la calificación en exámenes estandarizados de lectura y matemáticas aumentaría de forma significativa. Nuestro estudio muestra aulas de dife-

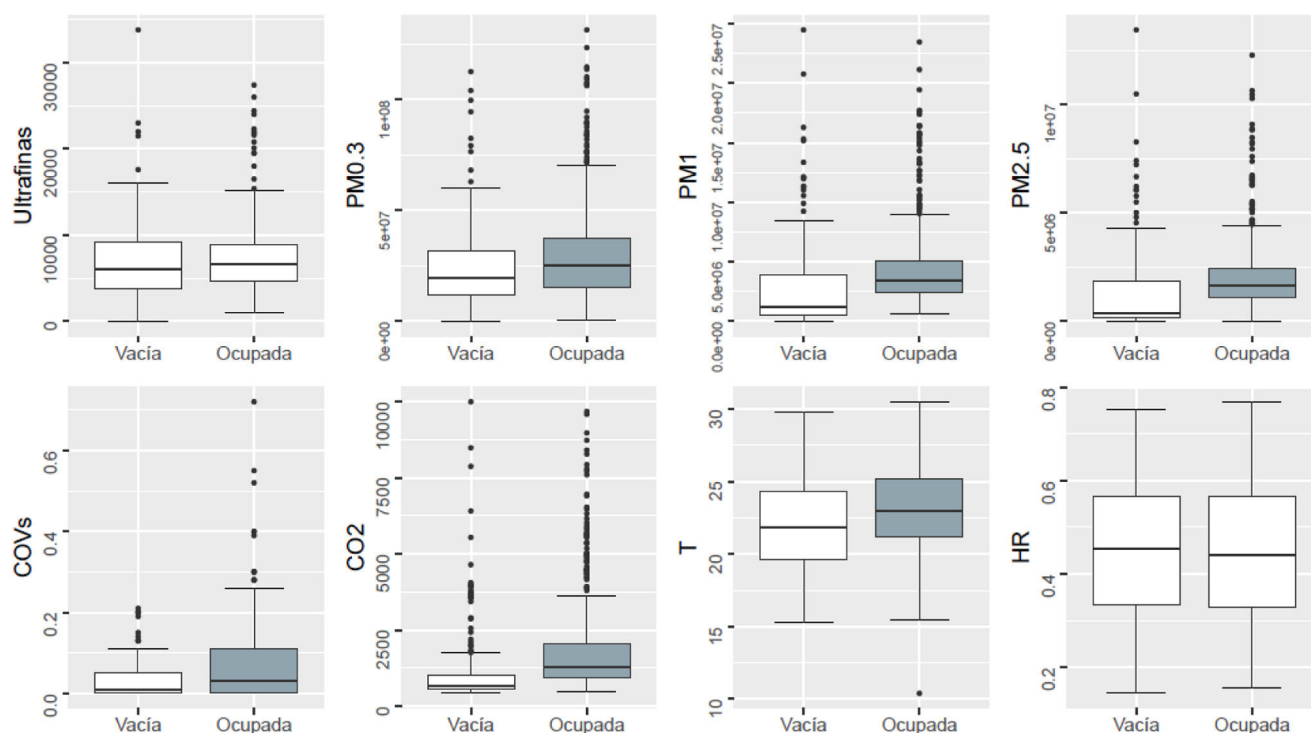


Figura 2 Diferencia en el nivel de contaminantes entre aulas vacías u ocupadas. Datos agrupados para todas las campañas, medidas y colegios. PM representadas en part/m^3 y COV en ppm. Es significativo si la caja está coloreada (contraste t con el ajuste Holm-Bonferroni).

COV: compuestos orgánicos volátiles; HR: humedad relativa; part: partículas; PM: partículas en suspensión; ppm: partes por millón; T: temperatura.

rente tamaño y ocupación con diferente nivel de CO_2 , lo que probablemente se relacione con su tasa de ventilación.

La correlación de los niveles de partículas en suspensión y la humedad ya ha sido descrita en la literatura, poniendo de relieve la influencia que puede tener la climatología en los niveles de contaminantes³¹. El aumento de temperatura en las aulas, como se ve en campañas de primavera, debe ser tomado en consideración, ya que se ha relacionado con absentismo escolar¹¹ y con un peor desempeño académico: Goodman et al.³² apuntan que por $0,55\text{ }^\circ\text{C}$ de incremento de temperatura se disminuye el aprendizaje de ese año en un 1%.

Como se ha comentado, la climatología influye en parámetros como las PM, y el aumento de temperatura y el nivel de ocupación de las aulas se relacionan con mayores niveles de COV y de CO_2 . Por estos motivos, se plantea que un diseño arquitectónico adecuado puede contribuir a disminuir la exposición a contaminantes en el interior de las aulas controlando factores como el tamaño de las aulas o su orientación, la disposición y la forma de puertas y ventanas, la elección de los materiales de construcción y del mobiliario, la localización en el área urbana, etc. En situaciones en que los edificios escolares ya están construidos, sugerir o cambiar pautas de uso de la edificación puede contribuir a mejorar la calidad del aire interior.

Como fortalezas de nuestro trabajo destacamos el estudio de diferentes tipos arquitectónicos de colegios y emplazamientos. Esto permite un enfoque más completo en la identificación de los contaminantes y sus fuentes, con-

siderando tanto aspectos estructurales como de uso de las edificaciones. El uso de sensores específicos, junto con el análisis estadístico detallado, asegura la calidad y la fiabilidad de los datos. Al realizar campañas a lo largo de diferentes estaciones, con mediciones en distintos momentos del día, se proporciona una visión más completa de las posibles variaciones en la calidad del aire interior. Se han incluido contaminantes de los que hay datos más escasos en la literatura, como son las PM1, PM0,3 y UFP. Estas partículas, por su tamaño, penetran hasta vías respiratorias de pequeño calibre e incluso en el torrente sanguíneo y podrían ser responsables de patología en la infancia³³. La buena relación con el profesorado de cada colegio y la continua comunicación con las familias han permitido optimizar los datos obtenidos.

Este estudio tiene algunas limitaciones, entre las que cabría destacar una representatividad limitada, dado que la muestra es de cuatro colegios y puede no incluir centros con diferencias socioeconómicas y geográficas. La falta de estándares normativos para partículas de pequeño tamaño impide conocer el impacto de los niveles que se presentan. La pérdida de datos de PM2,5 o COV en algunos momentos limita la consistencia de las conclusiones. Aunque se hace un análisis longitudinal, el período de medición puede no capturar fenómenos excepcionales o variaciones a largo plazo. Pese a que se valoraron las actividades específicas dentro del aula, incluida la ventilación, el registro por parte de los profesores no fue exhaustivo, lo que dificulta el análisis del impacto de las mismas sobre los contaminantes.

Actualmente el proyecto continúa en marcha, y se está trabajando en valorar el estado de salud de los ocupantes de las aulas. Se están estudiando las fuentes de los contaminantes para poder hacer recomendaciones de uso, tales como pautas de ventilación, limpieza o cambio de determinados materiales en mobiliario o fungibles. Uno de los objetivos finales es elaborar y difundir un documento que pudiera servir como Guía para la mejora de la calidad del aire interior en colegios.

En conclusión, este estudio evalúa qué contaminantes existen en el interior de colegios de primaria de la Comunidad de Madrid y cuál es su concentración. Los colegios analizados presentan niveles de CO₂, PM_{2,5} y COV por encima de las recomendaciones actuales. Parece necesario determinar los valores de normalidad para las partículas en suspensión de tamaño inferior a 2,5 μm y seguir midiendo e identificando fuentes de emisión para, una vez identificadas, diseñar medidas para su control. Mientras se alcanzan las evidencias, nuestros resultados sugieren la necesidad de poner en marcha medidas para mejorar la calidad del aire interior en las aulas.

Financiación

Este trabajo ha sido financiado mediante el Proyecto «Lime4Health» de la convocatoria de Generación de conocimiento del Ministerio de Ciencia e Innovación 2021 (referencia PID2021-1230230A-I00).

Conflicto de intereses

Los autores del manuscrito declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Bibliografía

1. The human right to a clean, healthy and sustainable environment: draft resolution / Andorra, Angola, Antigua and Barbuda, Armenia, Bahamas, Bhutan, Bosnia and Herzegovina, Bulgaria, Burkina Faso, Cabo Verde, Chile, Colombia, Congo, Costa Rica, Croatia, Cyprus, Czechia, Djibouti, Dominican Republic, Ecuador, Equatorial Guinea, Fiji, Finland, France, Georgia, Germany, Greece, Guatemala, Honduras, Jordan, Kenya, Latvia, Lebanon, Luxembourg, Maldives, Mali, Malta, Marshall Islands, Micronesia (Federated States of), Monaco, Montenegro, Morocco, Netherlands, Nigeria, North Macedonia, Palau, Panama, Peru, Portugal, Qatar, Republic of Korea, Romania, Samoa, Senegal, Slovakia, Slovenia, Spain, Switzerland, Togo, Ukraine, Uruguay and Vanuatu. 2022 [consultado 9 Dic 2024]. Disponible en: <https://digitallibrary.un.org/record/3982508>
2. Juginović A, Vuković M, Aranza I, Biloš V. Health impacts of air pollution exposure from 1990 to 2019 in 43 European countries. *Sci Rep*. 2021;11:22516.
3. WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide [consultado 1 Nov 2022]. Disponible en: <https://www.who.int/publications-detail-redirect/9789240034228>
4. Ortega-García JA, Tellerías L, Ferrís-Tortajada J, Boldo E, Campillo-López F, van den Hazel P, et al. [Threats, challenges and opportunities for paediatric environmental health in Europe, Latin America and the Caribbean]. *An Pediatr (Engl Ed)*. 2019;90:124e1-11.

5. Salvi S. Health effects of ambient air pollution in children. *Paediatr Respir Rev*. 2007;8:275-80.
6. Vilcins D, Christofferson RC, Yoon JH, Nazli SN, Sly PD, Cormier SA, et al. Updates in air pollution: Current research and future challenges. *Ann Glob Health*. 2024;90:9.
7. European Commission. Health Effects of School Environment (HESE) — Final Scientific Report. 2006. Disponible en: http://ec.europa.eu/health/ph_projects/2002/pollution/fp_pollution_2002_frep_04.pdf.:79
8. Geiss O, Giannopoulos G, Tirendi S, Barrero-Moreno J, Larsen BR, Kotzias D. The AIRMEX study — VOC measurements in public buildings and schools/kindergartens in eleven European cities: Statistical analysis of the data. *Atmos Environ*. 2011;45:3676-84.
9. Csobod E, Rudnai P, Vaskovi E. School Environment and Respiratory Health of Children (Search). School Environment and Respiratory Health of Children (SEARCH). The Regional Environmental Center for Central and Eastern Europe Country Office Hungary Budapest, Hungary. 2010. Disponible en: <http://www.rec.org/search.php>.
10. Csobod E, Annesi-Maesano I, Carrer P, Kephelopoulou S, Madureira J, Rudnai P, et al. SINPHONIE — Schools Indoor Pollution and Health Observatory Network in Europe — Final Report. JRC Publications Repository. 2015 [consultado 7 Nov 2022]. Disponible en: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC91160>
11. Annesi-Maesano I, Baiz N, Banerjee S, Rudnai P, Rive S, SINPHONIE Group. Indoor air quality and sources in schools and related health effects. *J Toxicol Environ Health B Crit Rev*. 2013;16:491-550.
12. Fonderson MS, van Meel ER, Bindels P, Bohnen A, Burdorf A, de Schepper E. Air pollution and childhood respiratory consultations in primary care: A systematic review. *Arch Dis Child*. 2024;109:297-303.
13. Jalaludin B, Khalaj B, Sheppard V, Morgan G. Air pollution and ED visits for asthma in Australian children: A case-crossover analysis. *Int Arch Occup Environ Health*. 2008;81:967-74.
14. Zheng J, Zhang H, Shi J, Li X, Zhang J, Zhang K, et al. Association of air pollution exposure with overweight or obesity in children and adolescents: A systematic review and meta-analysis. *Sci Total Environ*. 2024;910:168589.
15. Chandra M, Rai CB, Kumari N, Sandhu VK, Chandra K, Krishna M, et al. Air pollution and cognitive impairment across the life course in humans: A systematic review with specific focus on income level of study area. *Int J Environ Res Public Health*. 2022;19:1405.
16. Lopuszanska U, Samardakiewicz M. The relationship between air pollution and cognitive functions in children and adolescents: A systematic review. *Cogn Behav Neurol*. 2020;33:157-78.
17. Amnuaylojaroen T, Parasin N, Saokaew S. Exploring the association between early-life air pollution exposure and autism spectrum disorders in children: A systematic review and meta-analysis. *Reprod Toxicol*. 2024;125:108582.
18. La calidad del aire en la ciudad de Madrid durante 2022 [consultado 13 Ene 2023]. Disponible en: <https://www.ecologistasenaccion.org/wp-content/uploads/2023/01/informe-calidad-aire-madrid-2022.pdf>
19. Calidad del aire urbano en los entornos educativos de Castilla y León [consultado 13 Ene 2023]. Disponible en: <https://www.ecologistasenaccion.org/wp-content/uploads/2022/05/informe-calidad-aire-entornos-educativos-CyL.pdf>
20. Rivas I, Viana M, Moreno T, Pandolfi M, Amato F, Reche C, et al. Child exposure to indoor and outdoor air pollutants in schools in Barcelona, Spain. *Environ Int*. 2014;69:200-12.
21. Sunyer J, Esnaola M, Alvarez-Pedrerol M, Fors J, Rivas I, López-Vicente M, et al. Association between traffic-related air pollution in schools and cognitive development in pri-

- mary school children: A prospective cohort study. *PLOS Med.* 2015;12:e1001792.
22. Villanueva F, Tapia A, Lara S, Amo-Salas M. 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.* 2018;622-623:222–35.
 23. Becerra JA, Lizana J, Gil M, Barrios-Padura A, Blondeau P, Chacartegui R. Identification of potential indoor air pollutants in schools. *J Clean Prod.* 2020;242:118420.
 24. Fuentes-Ferragud E, Miralles P, López A, Ibáñez M, Piera JM, Lopez-Labrador FX, et al. Comprehensive air quality assessment including non-targeted approaches in primary schools from Spain. *Chemosphere.* 2024;372:144022.
 25. Cavaleiro Rufo J, Madureira J, Paciência I, Slezakova K, Pereira MC, Aguiar L, et al. Children exposure to indoor ultrafine particles in urban and rural school environments. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2016;23:13877–85.
 26. Mazaheri M, Reche C, Rivas I, Crilley LR, Álvarez-Pedrerol M, Viana M, et al. Variability in exposure to ambient ultrafine particles in urban schools: Comparative assessment between Australia and Spain. *Environ Int.* 2016;88:142–9.
 27. Calidad del ambiente interior en edificios de uso público [consultado 21 May 2024]. Disponible en: <https://www.madrid.org/bvirtual/BVCM020191.pdf>
 28. Comité de Salud Medioambiental, Asociación Española de Pediatría. Ventilación y confort térmico en las aulas. COVID-19: Optamos por la sostenibilidad y resiliencia. 2020. Asociación Española de Pediatría [consultado 20 Ene 2025]. Disponible en: https://www.aeped.es/sites/default/files/salud_medioambiental_escolar_confort_termico_ventilacionv2.pdf
 29. Shendell DG, Prill R, Fisk WJ, Apte MG, Blake D, Faulkner D. Associations between classroom CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho. *Indoor Air.* 2004;14:333–41.
 30. Haverinen-Shaughnessy U, Moschandreas DJ, Shaughnessy RJ. Association between substandard classroom ventilation rates and students' academic achievement. *Indoor Air.* 2011;21:121–31.
 31. Yuhe Z, Guangfei Y, Xianneng L. Indoor PM_{2.5} concentrations and students' behavior in primary school classrooms. *J Clean Prod.* 2021;318:128460.
 32. Goodman J, Hurwitz M, Park J, Smith J. Heat and Learning. En: Working Paper 24639. National Bureau of Economic Research; 2019 [consultado 24 Sep 2024]. Disponible en: https://www.nber.org/system/files/working_papers/w24639/w24639.pdf
 33. Dda Costa e Oliveira JR, Base LH, de Abreu LC, Filho CF, Ferreira C, Morawska L. Ultrafine particles and children's health: Literature review. *Paediatr Respir Rev.* 2019;32:73–81.