



**UNIVERSIDAD
DE BURGOS**

**PROPUESTA DE UN MODELO
ADAPTATIVO PARA LA GESTIÓN DEL
RIESGO DE TRANSMISIÓN AÉREA DE
PATÓGENOS EN ESPACIOS DE PÚBLICA
CONCURRENCIA, BASADO EN EL TIPO DE
VENTILACIÓN, LA CALIDAD DEL AIRE Y
LA TASA DE INFECTIVIDAD**

**Tesis Doctoral
2026**

AUTOR: D. JESÚS MANUEL BALLESTEROS ÁLVAREZ

**DIRECTORES: DR. D. ÁNGEL RODRÍGUEZ SAIZ
DR. D. ÁLVARO ROMERO BARRIUSO**



UNIVERSIDAD DE BURGOS

Propuesta de un modelo adaptativo para la gestión del riesgo de transmisión aérea de patógenos en espacios de pública concurrencia, basado en el tipo de ventilación, la calidad del aire y la tasa de infectividad

Autor

D. JESÚS MANUEL BALLESTEROS ÁLVAREZ

Directores: **Dr. D. Ángel Rodríguez Saiz**
Dr. D. Álvaro Romero Barriuso

2026

Dedicatoria

A mis abuelos, por enseñarme a volar.

A mis padres, por ser mi ejemplo.

A mis hermanos, por estar siempre ahí.

A mi mujer, por su confianza ciega en mí.

A Héctor y Raúl, mis mayores motivos de orgullo.

Y a todos mis amigos, por acompañarme en cada paso del camino.

Agradecimientos

Me gustaría mostrar, en primer lugar, mi más sincero agradecimiento a mis Directores de Tesis, los profesores doctores D. Ángel Rodríguez Saiz y D. Álvaro Romero Barriuso, por compartir sus conocimientos, comprensión, paciencia y empatía durante todo el proceso, así como a la profesora doctora Dña. B. María Villena Escribano, por estar ahí siempre que la he necesitado.

A la Universidad de Burgos y, en especial, al Departamento de Construcciones Arquitectónicas e Ingeniería de la Construcción y del Terreno por la oportunidad que se me ha brindado.

Esta Tesis Doctoral no hubiera sido posible sin el apoyo del Ayuntamiento de Móstoles (Comunidad de Madrid, España), que me abrió las puertas de la institución, permitiéndome el acceso a todos sus centros de trabajo y facilitando los datos necesarios para el desarrollo de esta investigación, dado que, sin su apoyo, este estudio no se habría podido llevar a cabo.

Por último, pero no por ello menos importante, me gustaría expresar mi agradecimiento a mis abuelos, mis padres, mi pareja y mis hijos Héctor y Raúl, por la paciencia que me han brindado y que ha supuesto un apoyo incondicional para que esta tesis pueda ser hoy una realidad. A todos ellos, gracias.

Preámbulo

“Si he logrado ver más lejos es porque he subido a hombros de gigantes”.

Isaac Newton (1642-1727)

Esta célebre frase fue escrita por el gran físico y matemático inglés Isaac Newton, en una carta escrita a su colega Robert Hooke, en la que se menciona a Copérnico, Galileo y Kepler y que muestra la importancia de la divulgación científica.

Siguiendo este criterio, y asumiendo como objetivo fundamental de la actividad investigadora la responsabilidad de contribuir al desarrollo y mejora de la sociedad para con las generaciones futuras, el presente trabajo de investigación es el resultado del compendio del cuarteto de publicaciones científicas que vertebran el presente documento de Tesis Doctoral y que a continuación se muestran:

- Natural ventilation strategies to prevent airborne disease transmission in public buildings¹. *Eng.*, JCR Q2 (54/175), FI: 2,4.
- Enhancing indoor air quality through natural ventilation: insights from municipal building in Mostoles, Spain². *Dyna*, JCR Q3 (122/175), FI: 0,7.
- Occupancy and air quality model for outdoor events: a strategy for preventing disease transmission at mass events³. *Buildings*, JCR Q2 (60/183), FI: 3,1.
- Investigating the effectiveness of a new indoor ventilation model in reducing the spread of disease: A case of sports centres amid the COVID-19 pandemic⁴. *Heliyon*, JCR Q1 (29/135), FI: 3,6.

¹ Ballesteros-Álvarez, J. M., Romero-Barriuso, Á., Rodríguez-Sáiz, Á., Villena-Escribano, B. M. (2025). Natural ventilation strategies to prevent airborne disease transmission in public buildings. *Eng.*, 6 (8), 197. <https://doi.org/10.3390/eng6080197>

² Romero-Barriuso, Á., Ballesteros-Álvarez, J. M., Villena-Escribano, B. M., Rodríguez-Sáiz, Á., González-Gaya, C. (2025). Enhancing Indoor Air Quality Through Natural Ventilation: Insights from Municipal Building in Mostoles, Spain. *Dyna*, 100 (4). 371-377. <http://dx.doi.org/10.52152/D11406>

³ Romero-Barriuso, Á., Ballesteros-Álvarez, J. M., Villena-Escribano, B. M., Rodríguez-Saiz, Á., & González-Gaya, C. (2025). Occupancy and air quality model for outdoor events: A strategy for preventing disease transmission at mass events. *Buildings*, 15 (5), 677. <https://doi.org/10.3390/buildings15050677>

⁴ Ballesteros Álvarez, J. M., Romero Barriuso, A., Villena Escribano, B. M., Rodríguez Sáiz, A., González-Gaya, C. (2024). Investigating the effectiveness of a new indoor ventilation model in reducing the spread of disease: A case of sports centres amid the COVID-19 pandemic. *Heliyon*, 10 (6), e27877. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27877>

Además de las publicaciones anteriormente mostradas, la adaptabilidad en la formulación de la normativa de Atmósferas Explosivas (ATEX) se ha desarrollado en otros ámbitos de la ciencia y la tecnología, cuyos resultados se han materializado en las siguientes publicaciones científicas:

- Estimating maximum dwell time for firefighting teams based on ambient temperature and radiant heat exposure⁵. *Fire*, JCR Q1 (20/92), FI: 2,7.
- Safety conditions in battery rooms for renewable energy systems: dimensioning, ventilation, and classification of ATEX areas⁶. *Springer*, SJR Q4 (253/308), FI: 0,158.
- Estimated maximum time for intervention teams to remain in a fire: ambient temperature⁷. *Anales de Edificación*, Avery Index.

Igualmente, esta novedosa investigación ha sido presentada y defendida, mediante ponencias, en diversos Congresos de carácter tanto Nacional como Internacional:

- *Procedimiento para dimensionar y clasificar zonas ATEX en instalaciones de generación de biogás a partir de lodos de aguas residuales*. 29th International Congress on Project Management and Engineering. Ferrol, 16-17. July 2025. Escuela Politécnica de Ingeniería de Ferrol, Universidade da Coruña y AEIPRO (IPMA-Spain).
- *Analysis of safety distances for overhead flammable gas pipelines in buildings*. 6th Building and Management International Conference (BIMIC) 2024. Madrid, 12-13. December 2024. Universidad Politécnica de Madrid.
- *Learning to Interpret and Implement Design Standards in Special Risk Premises: Stationary Room and Traction Battery Charging Areas*. 8th

⁵ Romero-Barriuso, Á., Ballesteros-Álvarez, J. M., Villena-Escribano, B. M., Fuentes-Bargues, J. L., González-Gaya, C. (2025). Estimating maximum dwell time for firefighting teams based on ambient temperature and radiant heat exposure. *Fire* 8(3), 89. <https://doi.org/10.3390/fire8030089>

⁶ Ballesteros Álvarez, J. M., Romero Barriuso, Á., Villena Escribano, B. M., Rodríguez Sáiz, Á., González Gaya, C. (2024). Safety conditions in battery rooms for renewable energy systems: dimensioning, ventilation, and classification of ATEX areas. In: Torres González, M., Rubio Bellido, C. (eds.) Towards Low and Positive Energy Buildings. Green Energy and Technology. *Springer, Cham*. 59-71. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70851-0_4

⁷ Ballesteros Álvarez, J. M., Romero-Barriuso, Á., Villena Escribano, B. M., Rodríguez Sáiz, Á. (2024). Estimación del tiempo máximo de permanencia de los equipos de intervención en un incendio: temperatura ambiental [Estimation of the maximum time spent by fire intervention teams: room temperature]. *Anales de Edificación*, 10 (3), 21-26. <http://dx.doi.org/10.20868/ade.2024.5485>

International Conference of Educational Innovation in Building (CINIE). Madrid, 13-15 de marzo de 2024. Universidad Politécnica de Madrid.

- *Safety in the Use of Chemicals for the Curing of Concentrate and Mortar*. 9th International Conference on Technological Innovation in Building (CITE). Madrid, 13-15 de marzo de 2024. Universidad Politécnica de Madrid.
- *Safety Conditions in the Application of Acrylic Resins and Solvents*. 5th Building and Management International Conference (BIMIC). Madrid, 22-24 de noviembre de 2023. Instituto Politécnico da Guarda (Portugal) y Universidad Politécnica de Madrid.
- *UNE Standards Comparative Analysis of ATEX applied to machine Rooms and Autonomous Heat or Cold Cogeneration Equipment*. 7th International Conference of Educational Innovation in Building (CINIE). Madrid, 22-24 de marzo de 2023. Universidad Politécnica de Madrid.
- *Estimate of the Maximum Dwell Time for the Intervention Teams in a Fire: Ambient Temperature*. 8th International Conference on Technological Innovation in Building (CITE). Madrid, 22-24 de marzo de 2023. Universidad Politécnica de Madrid.

Resumen

Este trabajo de investigación surge como respuesta a la necesidad de disponer de valores de referencia para la ventilación, entre marzo de 2020 y febrero de 2022, periodo en el que produce la reincorporación al trabajo en plena crisis sanitaria por COVID-19. Si bien en el año 2020 se publica el método *Steady State CO₂*, que posteriormente fue adaptado por el Centro Superior de Investigaciones Científicas, únicamente se contempla doblar los valores de ventilación requeridos en la Directriz ASHRAE 62.1. Estas referencias en ningún caso se vinculan a la infectividad del SARS-CoV-2, el cual desarrolló múltiples variantes con diferentes Tasas de Infectividad, por lo que la presente Tesis Doctoral establece el objetivo de desarrollar una herramienta que permita controlar la transmisión de enfermedades a través del aire mediante restricciones en la ocupación de los recintos, en aras de poder adaptarla tanto a la infectividad del patógeno como actividad física que se esté desarrollando en su interior, considerando situaciones de ventilación controlada y ventilación natural, en ambientes tanto interiores como exteriores. El método se basa en determinar los caudales de ventilación que, por comparación con el aire limpio disponible, permiten determinar la ocupación máxima de un recinto en función de la actividad desarrollada. Para ambientes interiores, los resultados se comparan con las condiciones de ventilación en los centros municipales del Ayuntamiento de Móstoles, considerando la exposición de los trabajadores al SARS-CoV-2. Para los ambientes exteriores, se analizan los valores de CO₂ estimados y medidos durante las fiestas patronales de Móstoles de septiembre del 2022.

Palabras clave: *concentración de CO₂, calidad del aire, ventilación natural, ventilación cenital, ventilación cruzada, prevención de la propagación del coronavirus, control de las enfermedades transmitidas por el aire, evaluación de la ocupación.*

Abstract

The work arises as a response to the need for reference values regarding the ventilation required between March 2020 and February 2022, the period in which the return to workplaces occurs under the COVID-19 health crisis. Although the Steady State CO₂ method was published in 2020, which was later adapted by the Spanish National Research Centre, it only contemplates doubling the ventilation values required in ASHRAE Guideline 62.1, but in no case links them to the infectivity of SARS-CoV-2, which developed multiple variants with different infectivity rates. Developing a tool to control the transmission of diseases through the air by means of indoor occupancy restrictions has become the main objective of this doctoral thesis, adapting to both infectivity of the pathogen and physical activity, not only in indoor and outdoor environments, under controlled and natural ventilation conditions. The method is based on establishing the maximum occupancy by sharing ventilation flows required depending on the activity carried out with the available clean air and the validation of the results has been carried out indoors by comparing the ventilation conditions in centres of Mostoles City Council with the incidence of SARS-CoV-2 among the municipal staff, meanwhile outdoors, a comparison between the estimated and measured CO₂ values during the festivities of Mostoles in September 2022 were analysed.

Keywords: *CO₂ concentration, air quality, natural ventilation, zenith ventilation, cross ventilation, preventing coronavirus spread, airborne disease control, occupancy assessment.*

Listado de abreviaturas y/o acrónimos

ACH	Renovaciones/Cambios de aire por hora (<i>Air changes per hour</i>)
AENOR	Asociación Española de Normalización y Certificación
AFEC	Asociación de Fabricantes de Equipos de Climatización
ASHRAE	La Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>)
ATPS	Temperatura ambiente y presión saturada (<i>Ambient Temperature and Pressure, Saturated</i>)
BOE	Boletín Oficial del Estado (España)
BT	Baja Tensión
CCRSM (SCHEER)	Comité Científico de los Riesgos Sanitarios, Medioambientales y Emergentes (<i>Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks</i>)
CE	Conformidad Europea
CENELEC	Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (<i>European Committee for Electrotechnical Standardization</i>)
COVID	Síndrome respiratorio agudo producido por un coronavirus (<i>Coronavirus Disease</i>)
CTE	Código Técnico de la Edificación
CEI (IEC)	Comisión Electrotécnica Internacional (<i>International Electrotechnical Commission</i>)
EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
IDA2	Aire de calidad media (según RITE) (<i>Indoor Air</i>)

INSHT	Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo
INSST	Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo
ISO	Organización Internacional de Normalización (<i>International Organization for Standardization</i>)
ITC	Instrucción Técnica Complementaria
ITU	Unión Internacional de Telecomunicaciones (<i>International Telecommunication Union</i>)
NTP	Nota Técnica de Prevención
OMS (WHO)	Organización Mundial de la Salud (<i>World Health Organization</i>)
ONU (UN)	Organización de las Naciones Unidas (United Nations)
PPD	Porcentaje estimado de insatisfechos (<i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i>)
ppm	Partes por millón (unidad de medida)
Q_{objetivo}	Caudal objetivo
RITE	Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios
SARS-CoV-2	<i>Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2</i>
SC	Subcomité Técnico de la Comisión Electrotécnica Internacional
SPTD	Condiciones de presión y temperaturas estándar de aire seco (<i>Standard Temperature and Pressure, Dry</i>)
TC	Comité Técnico de la Comisión Electrotécnica Internacional
UNE	Una Norma Española
ΔCO₂	Incremento de la concentración de dióxido de carbono

Contenido

<i>Dedicatoria</i>	III
<i>Agradecimientos</i>	V
<i>Preámbulo</i>	VII
<i>Resumen</i>	XI
<i>Abstract</i>	XII
<i>Listado de abreviaturas y/o acrónimos</i>	XIII
<i>Contenido</i>	XV
<i>Índice de figuras</i>	XIX
<i>Índice de tablas</i>	XXI

CAPÍTULO 1: Introducción	25
1.1 Justificación del tema elegido	27
1.2 La importancia en la calidad del aire	28
1.3 La importancia de la ventilación en los edificios	30
1.4 La ventilación natural	35
1.5 La COVID como bioefluente.....	37
1.5.1 Velocidad del viento	40
1.5.2 Densidad de ocupación y ventilación natural.....	42
1.5.3 Análisis de la importancia de la ventilación en los edificios municipales del Ayuntamiento de Móstoles	43
1.6 Aportaciones del método “Steady State”	44
1.7 La normativa UNE aplicada a los espacios interiores	47
1.8 Normativa UNE de Atmósferas Explosivas	48
1.9 Descripción de las ubicaciones objeto de estudio.....	49
1.10 Consideraciones finales	52
1.11 Estructura de la tesis	53
CAPÍTULO 2: Estado del arte	57

2.1 Marco legal	59
2.2 Normativa internacional.....	61
2.3 Normativa UNE.....	61
2.4 Normativa ATEX.....	63
2.4.1 Normativa ATEX aplicada a la ventilación	68
CAPÍTULO 3: Objetivos	69
3.1 Objetivo general	71
3.1.1 Consecución del Objetivo General	71
3.2 Objetivos específicos	72
CAPÍTULO 4: Metodología	75
4.1 Fases del estudio	77
4.2 Descripción de la metodología	77
4.2.1 Valores propuestos.....	80
4.2.2 Caudal de ventilación requerido en función de la actividad desarrollada.....	81
4.2.3 Análisis de la concentración de fondo.....	85
4.3 Justificación de la metodología empleada	86
4.4 Estrategia de investigación.....	92
4.4.1 Estrategia en interiores	92
4.4.2 Estrategia en exteriores	105
CAPÍTULO 5: Resultados en ambientes interiores	115
5.1 Resultados en ambientes interiores con ventilación controlada	118
5.2 Resultados en ambientes interiores con ventilación no controlada	123
5.3 Resultados en ambientes interiores con ventilación natural	129
5.4 Posibilidades de mejora con la incorporación de la ventilación por flotabilidad.....	130
CAPÍTULO 6: Resultados en ambientes exteriores	139
6.1 Proceso de elaboración	141
6.2 Datos climatológicos de los días en los que se realizaron la toma de datos.....	141
6.3 Método de cálculo.....	142

6.4 Ocupación máxima al aire libre	146
6.5 El comportamiento del dióxido de carbono a nivel de suelo ...	151
6.6 El comportamiento del dióxido de carbono en altura.....	152
CAPÍTULO 7: Discusión de los resultados	155
7.1 Introducción	¡Error! Marcador no definido.
7.2 Ambientes interiores	157
7.3 Ambientes exteriores	161
7.4 Concentración de fondo: porcentaje de aire exhalado necesario para producir una infección por SARS-COV-2.....	161
7.5 Resultados de infecciones: trabajadores en centros con ventilación forzada	163
7.6 Resultados de infecciones: trabajadores en centros con ventilación natural.....	164
7.7 Resultados de infecciones: trabajadores que acceden a múltiples instalaciones y centros municipales	166
7.8 Resultados de infecciones: trabajadores que su trabajo se desarrolla fundamentalmente en la vía pública.....	167
CAPÍTULO 8: Conclusiones	169
8.1 Limitaciones.....	173
CAPÍTULO 9: Futuras líneas de investigación	175
CAPÍTULO 10: Referencias bibliográficas	179
EPÍLOGO	195

Índice de Figuras

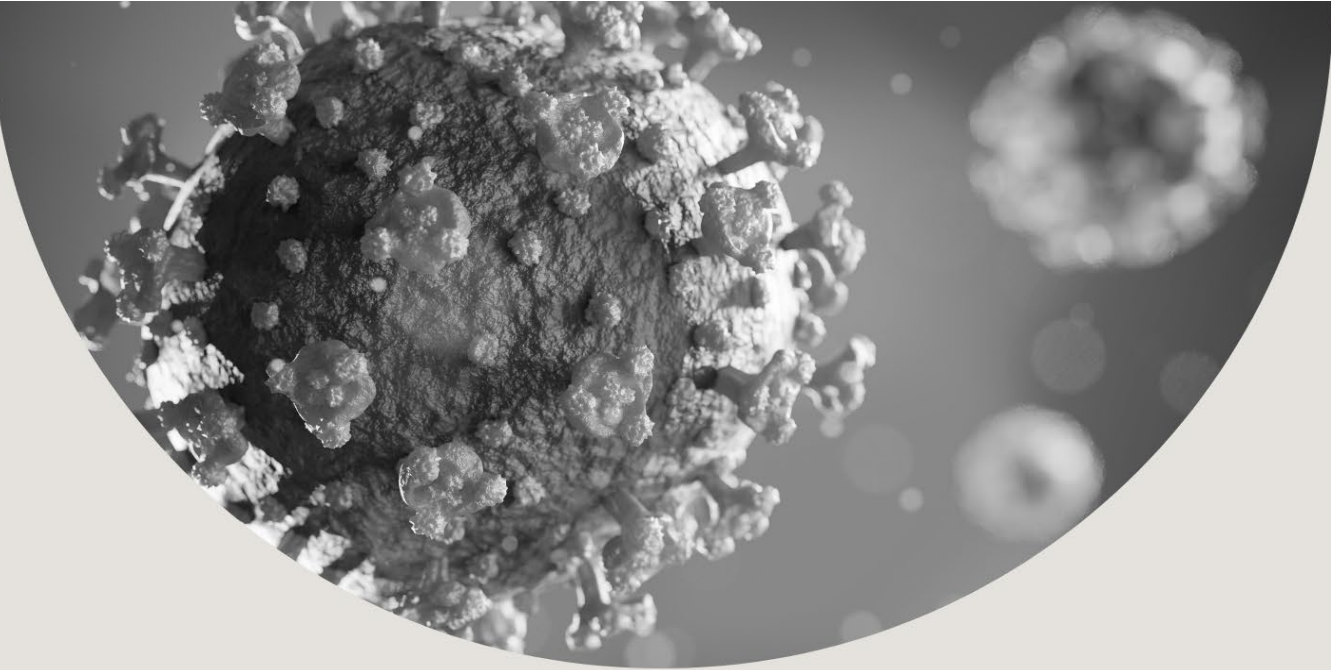
FIGURA 1.1. COMUNIDAD DE MADRID-ESPAÑA.....	49
FIGURA 1.2. MUNICIPIO DE MÓSTOLES-MADRID.....	49
FIGURA 1.3. UBICACIÓN DE LOS CENTROS MUNICIPALES OBJETO DE ESTUDIO	50
FIGURA 1.4. DETALLE DEL CONSERVATORIO, BIBLIOTECA CENTRAL Y TEATRO EL BOSQUE	51
FIGURA 1.5. EDIFICIO BIBLIOTECA CENTRAL ALMUDENA GRANDES.....	51
FIGURA 1.6. PATIO CENTRAL. BIBLIOTECA CENTRAL ALMUDENA GRANDES	51
FIGURA 1.7. PLANTA TERCERA. BIBLIOTECA CENTRAL ALMUDENA GRANDES.....	52
FIGURA 1.8. 1. PLANO DE EVACUACIÓN DEL GRADERÍO. 2. VISTA EXTERIOR EDIFICIO. 3. SECCIÓN TRIBUNA	52
FIGURA 4.1. COMPORTAMIENTO A NIVEL DE SUELO, NORMA UNE EN 202007IN	110
FIGURA 4.2. COMPORTAMIENTO EN ALTURA (< 5,0 M SOBRE EL SUELO) NORMA UNE EN 60079-10.....	110
FIGURA 4.3. COMPORTAMIENTO EN ALTURA (> 5,0 M SOBRE EL SUELO) NORMA UNE EN 60079-10.....	111
FIGURA 5.1. VENTILACIÓN NATURAL (VENTANAS): SALA DE ADULTOS, BIBLIOTECA CENTRAL ALMUDENA GRANDES	132
FIGURA 5.2. ÁREA EFECTIVA DE VENTILACIÓN: SALA DE ADULTOS, BIBLIOTECA CENTRAL ALMUDENA GRANDES	132
FIGURA 5.3. VENTILACIÓN CRUZADA: SALA DE ADULTOS, BIBLIOTECA CENTRAL ALMUDENA GRANDES.....	133
FIGURA 5.4. PLANTA BAJA, BIBLIOTECA CENTRAL ALMUDENA GRANDES	134
FIGURA 5.5. VENTILACIÓN NATURAL (EFECTO DE FLOTABILIDAD) BIBLIOTECA CENTRAL ALMUDENA GRANDES	136
FIGURA 5.6. VENTILACIÓN NATURAL (EFECTO DE FLOTABILIDAD) BIBLIOTECA CENTRAL ALMUDENA GRANDES	137
FIGURA 6.1. DENSIDAD DE OCUPACIÓN EXTERIOR POR ACTIVIDAD DESARROLLADA	147
FIGURA 6.2. DENSIDAD DE OCUPACIÓN EN EL EXTERIOR POR ACTIVIDAD DESARROLLADA (< 2,0 M DE ALTURA).....	148
FIGURA 6.3. DENSIDAD DE OCUPACIÓN EN EL EXTERIOR POR ACTIVIDAD DESARROLLADA (2,0- 5,0 M DE ALTURA)	149
FIGURA 6.4. DENSIDAD DE OCUPACIÓN EN EL EXTERIOR POR ACTIVIDAD DESARROLLADA (> 5,0 M DE ALTURA).....	150
FIGURA 6.5. DENSIDAD DE OCUPACIÓN EN EXTERIOR POR ACTIVIDAD DESARROLLADA (> 5,0 M DE ALTURA SIN OBSTÁCULOS)	151
FIGURA 6.6. COMPORTAMIENTO DEL DIÓXIDO DE CARBONO A NIVEL DE SUELO. ACTIVIDAD SEDENTARIA	151
FIGURA 6.7. COMPORTAMIENTO DEL DIÓXIDO DE CARBONO A NIVEL DE SUELO. ACTIVIDAD LIGERA	152
FIGURA 6.8. COMPORTAMIENTO DEL DIÓXIDO DE CARBONO EN ALTURA. MODELO GAS PESADO	153
FIGURA 6.9. COMPORTAMIENTO DEL DIÓXIDO DE CARBONO EN ALTURA. MODELO GAS LIGERO	153

FIGURA 6.10. COMPORTAMIENTO DEL DIÓXIDO DE CARBONO EN ALTURA. MODELO GAS PESADO.....	154
FIGURA 7.1. TASA DE INCIDENCIA A 14 DÍAS POR 100.000 TRABAJADORES AYUNTAMIENTO DE MÓSTOLES.....	159
FIGURA 7.2. TASA DE INCIDENCIA A 14 DÍAS POR 100.000 HABITANTES COMUNIDAD DE MADRID	159

Índice de Tablas

TABLA 1.1.	FACTORES DEL TERRENO.....	41
TABLA 1.2.	DATOS CLIMÁTICOS DE LA CIUDAD DE MÓSTOLES, AÑO 2023 (ENERO-JUNIO)....	42
TABLA 1.3.	DATOS CLIMÁTICOS DE LA CIUDAD DE MÓSTOLES, AÑO 2023 (JULIO-DICIEMBRE)	42
TABLA 1.4.	VELOCIDADES DE AIRE EN EXTERIORES: DILUCIÓN EFECTIVA DE LOS GASES EN LA ATMÓSFERA	42
TABLA 1.5.	NÚMERO DE RENOVACIONES REQUERIDAS SEGÚN MÉTODO STEADY STATE CO₂ .	47
TABLA 4.1.	TASA METABÓLICA POR ACTIVIDAD REALIZADA¹⁶⁶,	79
TABLA 4.2.	ADAPTACIÓN A LA TASA METABÓLICA POR ACTIVIDAD REALIZADA.....	80
TABLA 4.3.	CAUDAL DE VENTILACIÓN REQUERIDO POR PERSONA EN FUNCIÓN DE LA ACTIVIDAD DESARROLLADA.....	85
TABLA 4.4.	CAUDAL DE VENTILACIÓN REQUERIDO PARA LAS ACTIVIDADES REALIZADAS EN EL EXTERIOR.....	85
TABLA 4.5.	ÁREA DE VENTILACIÓN EFECTIVA.....	100
TABLA 4.6.	CAUDAL VOLUMÉTRICO DE AIRE EN LA SALA DE PLENOS	101
TABLA 4.7.	VELOCIDAD DE AIRE EN LA SALA DE PLENOS	102
TABLA 4.8.	OCUPACIÓN DE LA SALA DE PLENOS.....	103
TABLA 4.9.	RENOVACIONES DE AIRE DE LA SALA DE PLENOS.....	104
TABLA 4.10.	VELOCIDADES DE AIRE EN EXTERIORES: DILUCIÓN EFECTIVA GASES MÁS LIGEROS QUE EL AIRE	108
TABLA 4.11.	VELOCIDADES DE AIRE EN EXTERIORES: DILUCIÓN EFECTIVA GASES MÁS LIGEROS QUE EL AIRE	108
TABLA 4.12.	OCUPACIÓN TEÓRICA EN EXTERIOR EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DE AIRE (CALIDAD IDA2)	109
TABLA 5.1.	OCUPACIÓN PISCINA LAS CUMBRES CON VENTILACIÓN ARTIFICIAL	119
TABLA 5.2.	OCUPACIÓN POLIDEPORTIVO VILLAFONTANA CON VENTILACIÓN ARTIFICIAL	119
TABLA 5.3.	OCUPACIÓN POLIDEPORTIVO JOAN MIRÓ CON VENTILACIÓN ARTIFICIAL.....	119
TABLA 5.4.	OCUPACIÓN POLIDEPORTIVO LA LOMA CON VENTILACIÓN ARTIFICIAL	1200
TABLA 5.5.	OCUPACIÓN EDIFICIO SERVICIOS SOCIALES VÍA LÁCTEA CON VENTILACIÓN ARTIFICIAL.....	120
TABLA 5.6.	OCUPACIÓN CENTRO DE MAYORES PARQUE COÍMBRA CON VENTILACIÓN ARTIFICIAL.....	120
TABLA 5.7.	OCUPACIÓN JUNTA PARQUE COÍMBRA CON VENTILACIÓN ARTIFICIAL	120
TABLA 5.8.	OCUPACIÓN EDIFICIO DE SERVICIOS GENERALES: MANTENIMIENTO CON VENTILACIÓN ARTIFICIAL.....	121
TABLA 5.9.	OCUPACIÓN C.S.C. NORTE UNIVERSIDAD / JUNTA DE DISTRITO 2 CON VENTILACIÓN ARTIFICIAL.....	121
TABLA 5.10.	OCUPACIÓN TEATRO EL BOSQUE CON VENTILACIÓN ARTIFICIAL	122
TABLA 5.11.	OCUPACIÓN CENTRO DE MAYORES “LAS LOMAS” CON VENTILACIÓN ARTIFICIAL	123
TABLA 5.12.	OCUPACIÓN BIBLIOTECA CENTRAL CON VENTILACIÓN ARTIFICIAL	123
TABLA 5.13.	OCUPACIÓN CONSERVATORIO RODOLFO HALFFTER CON VENTILACIÓN ARTIFICIAL	124
TABLA 5.14.	OCUPACIÓN CONSERVATORIO RODOLFO HALFFTER CON VENTILACIÓN ARTIFICIAL	125

TABLA 5.15. OCUPACIÓN CENTRO SOCIOCULTURAL CALEIDOSCOPIO / EL SOTO / VILLA DE MÓSTOLES CON VENTILACIÓN ARTIFICIAL	126
TABLA 5.16. OCUPACIÓN CENTRO SOCIOCULTURAL CALEIDOSCOPIO / EL SOTO / VILLA DE MÓSTOLES" CON VENTILACIÓN NATURAL Y ARTIFICIAL.....	127
TABLA 5.17. OCUPACIÓN EDIFICIO PARTICIPACIÓN CIUDADANA / JUNTA DE DISTRITO 1" CON VENTILACIÓN ARTIFICIAL.....	128
TABLA 5.18. OCUPACIÓN EDIFICIO DE PARTICIPACIÓN CIUDADANA / JUNTA DE DISTRITO 1" CON VENTILACIÓN NATURAL Y ARTIFICIAL	129
TABLA 5.19. OCUPACIÓN CASA CONSISTORIAL CON VENTILACIÓN NATURAL.....	130
TABLA 5.20. OCUPACIÓN CENTRO DE ACOGIDA DE ANIMALES CON VENTILACIÓN NATURAL	130
TABLA 5.21. VENTILACIÓN SALA DE ESTUDIO DE LA BIBLIOTECA CENTRAL ALMUDENA GRANDES CALIDAD IDA 2.....	131
TABLA 5.22. VENTILACIÓN NATURAL POR FLOTACIÓN CON 1,0 M² DE APERTURA CENITAL ..	135
TABLA 5.23. VENTILACIÓN NATURAL DE LAS SALAS CON 1,0 M² DE APERTURA CENITAL.....	135
TABLA 6.1. DATOS CLIMATOLÓGICOS DEL AÑO 2022	141
TABLA 6.2. TASA DE GENERACIÓN DE CO₂ POR ACTIVIDAD DESARROLLADA	142
TABLA 6.3. MEDICIONES DE CO₂ A NIVEL DE SUELO EN ACTOS MULTITUDINARIOS	144
TABLA 6.4. DENSIDAD DE OCUPACIÓN A NIVEL DE SUELO, EN ACTOS MULTITUDINARIOS	144
TABLA 6.5. CONCENTRACIÓN DE CO₂ A DISTINTAS ALTURAS, EN ACTOS MULTITUDINARIOS	146
TABLA 7.1. PORCENTAJE DE INFECCIONES POR CENTRO, CON LAS CARENCIAS TEMPORALES .	160
TABLA 7.2. DENSIDADES DE OCUPACIÓN ESTIMADA Y REAL, A DIFERENTES ALTURAS, EN ACTOS MULTITUDINARIOS	161
TABLA 7.3. CONCENTRACIÓN DE FONDO, PARA LA DENSIDAD DE OCUPACIÓN CALCULADA ..	163
TABLA 7.4. PORCENTAJE DE INFECCIONES COVID-19. EDIFICIOS VENTILACIÓN FORZADA ...	164
TABLA 7.5. PORCENTAJE DE INFECCIONES POR COVID-19. EDIFICIOS CON VENTILACIÓN NATURAL.....	165
TABLA 7.6. PORCENTAJE DE INFECCIONES POR COVID-19. TRABAJADORES DIFERENTES INSTALACIONES.	167
TABLA 7.7. PORCENTAJE DE INFECCIONES POR COVID-19. TRABAJADORES EN VÍA PÚBLICA	167



1

Capítulo

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

La calidad del aire, su relación con la ventilación y cómo se vincula con la aparición de enfermedades, ha sido objeto de investigación a lo largo el tiempo, lo que ha llevado a organismos internacionales, como la Unión Europea y la Organización Mundial de la Salud, a su regulación.

El elemento químico más habitual en la caracterización de la calidad de aire en interiores con presencia humana prolongada es el dióxido de carbono (CO₂), el cual está relacionado con la actividad física de las personas.

El estudio plantea, mediante la utilización de indicadores poco habituales como es el análisis de las características tanto de los edificios como de las ubicaciones exteriores, sus ocupantes y la actividad que estén desarrollando, establecer una metodología que mediante el control de aforos se asegure la calidad de aire deseada.

1.1 JUSTIFICACIÓN DEL TEMA ELEGIDO

La reciente pandemia sufrida por la humanidad ha cambiado la perspectiva de los ciudadanos respecto a la exigencia de la calidad de aire que se respira, ya que se ha despertado una conciencia global sobre la vulnerabilidad del ser humano ante la transmisión de enfermedades que se propagan por el aire.

Desde la aparición de la COVID-19 a fines del año 2019, hasta el levantamiento de la situación de emergencia sanitaria mundial, la enfermedad produjo más de veinte millones de fallecidos. Hoy en día, el virus sigue circulando y mutando.

Durante el período comprendido entre el 19 de agosto al 15 de septiembre de 2024, el número de nuevos casos y muertes aumentó un 10% y un 11% respecto al período anterior entre el 22 de julio y el 18 de agosto de 2024, con 270.000 nuevos casos notificados y 5700 nuevas muertes certificadas. Actualmente, y debido a lo anteriormente expuesto, la OMS está rastreando varias variantes del SARS-CoV-2⁸.

Además, se constata que, en la actualidad, no existe una normativa específica de ventilación adaptada a la prevención de la propagación del SARS-CoV-2 en España. El objetivo del presente trabajo es disponer de una herramienta útil y veraz para el cálculo teórico de ocupación, durante el desarrollo de cualquier tipo de actividad, sedentaria o no, que permita mantener el recinto en condiciones

⁸ World Health Organization. COVID-19 Epidemiological Update. Edition 172.
<https://short.do/OHOa3m>

de seguridad, en base a la ventilación existente, teniendo en cuenta el dióxido de carbono como un bioefluente al igual que la COVID-19.

Se comprueba la eficacia del método para la prevención de la propagación y contagios del SARS-CoV-2, a través de los datos de infecciones por COVID-19 de los trabajadores de recintos e instalaciones municipales, de ámbito público, durante el desarrollo habitual de sus actividades.

1.2 LA IMPORTANCIA EN LA CALIDAD DEL AIRE

A lo largo de la historia, la concepción en el diseño de los edificios ha ido evolucionando, adaptándose a las nuevas necesidades. Especialmente significativa es la implementación del “Modular” de Le Corbusier, que relaciona la proporción humana con el diseño arquitectónico. También los bocetos de Alvar Aalto o La Bauhaus, que evolucionaron los diseños desde el Clasicismo al Modernismo Funcional, los trabajos de Mies van der Rohe, con su enfoque minimalista, o el Colectivo Vanguardista de Arquitectos de Archigram, con una visión creativa y poco convencional del espacio. En base a estas nuevas concepciones de la habitabilidad, la ventilación ha ido cambiando y ganando importancia, especialmente con la incorporación de mejores aislamientos y sistemas de ventilación mecánicos para recuperar el calor de Passivhaus.

La contaminación ambiental es uno de los factores de mayor incidencia en la calidad de vida de las personas, siendo responsable de múltiples enfermedades respiratorias y de la muerte prematura de miles de personas cada año^{9,10,11}. La realidad muestra que, en las últimas décadas, la humanidad ha conseguido importantes avances en los campos de la ciencia y la tecnología, pero también se han producido impactos negativos sobre el Medio Ambiente^{12,13,14}. Para mitigar los efectos de la contaminación, la Organización de las Naciones Unidas acordó

⁹ Pannia, P. G. (2023) Effects of air pollution on children's health. *Arch. Argent. Pediatr.*, 121(1), 1-2. <http://dx.doi.org/10.5546/aap.2022-02847>

¹⁰ Jerrett, M. (2022) Air pollution as a risk for death from infectious respiratory disease. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, 205(12), 1374-1375. <https://doi.org/10.1164/rccm.202202-0351ED>

¹¹ Sharma, A. K., Sharma, M., Sharma A. K., Sharma, M., Sharma, M. (2023) Mapping the impact of environmental pollutants on human health and environment: A systematic review and meta-analysis. *J. Geochem. Explor.*, 255, 107325. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2023.107325>

¹² Goshua, A., Akdis, C. A., Nadeau, K. C. (2022) World Health Organization global air quality guideline recommendations: Executive summary. *Allergy*, 77(7), 1955-1960. <https://doi.org/10.1111/all.15224>

¹³ Keswani, A., Akselrod, H., Anenberg, S. C. (2022) Health and clinical impacts of air pollution and linkages with climate change. *NEJM Evid.* 1(7). <https://evidence.nejm.org/doi/10.1056/EVIDra2200068>

¹⁴ Arribas, J. (2023) Humanity Is Facing Its Sustainability: Will Technological Progress Make the Future Unsustainable? In *Science, Technology and Innovation in the History of Economic Thought*, 241-256. Cham: Springer Nature Switzerland. https://10.1007/978-3-031-40139-8_12

un plan de actuación, denominado Agenda 2030, con unos Objetivos de Desarrollo Sostenible que, entre otras acciones, promueven la reducción de las emisiones de gas industriales, responsables de la mayor parte de las infecciones de corte respiratorio y enfermedades cardiovasculares^{15,16,17,18}.

Además de ello, la Unión Europea también ha promovido iniciativas para conseguir una atmósfera limpia y un aire exterior de calidad. Una de las primeras actuaciones ha sido establecer limitaciones en la concentración de agentes contaminantes presentes en el aire, con el objetivo de evitar su incidencia en la calidad de vida de las personas y conseguir un ambiente saludable adecuado, que evite enfermedades y favorezca una vida sana y saludable, de acuerdo con los estándares de calidad de la Organización Mundial de la Salud¹⁹. A todo esto, se suma el Octavo Programa Europeo de Acción en Materia de Medio Ambiente, que pretende conseguir un entorno libre de sustancias tóxicas, con un aire limpio y saludable²⁰.

A partir de las disposiciones normativas de la Unión Europea, en España se han diseñado estrategias para proteger la atmósfera, regular la calidad del aire respirable y gestionar de forma adecuada los grandes desafíos ambientales actuales^{21,22,23,24}.

¹⁵ Rafaj, P., Kiesewetter, G., Gül, T., Schöpp, W., Cofala, J., Klimont, Z., Pueohit, P., Heyes, C., Amann, J., Borken, L. Cozzi (2018) Outlook for clean air in the context of sustainable development goals. *Glob. Environ. Change.*, 53, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.08.008>

¹⁶ Medina, E. K. (2019) La contaminación del aire, un problema de todos. *Revista de la Facultad de Medicina*, Universidad Nacional de Colombia, 67(2), 189-191. <https://doi.org/10.15446/revfacmed.v67n2.82160>

¹⁷ Hao, Y., Guo, Y., Li, S., Luo, S., Jiang, X., Shen, Z., Wu, H. (2022) Towards achieving the sustainable development goal of industry: How does industrial agglomeration affect air pollution? *Innov. Green Develop.*, 1(1), 100003. <https://doi.org/10.1016/j.igd.2022.100003>

¹⁸ Jiřík, V., Římanová, V., Janulková, T., Siemiatkowski, G., Osrodka, L., Krajny, E. (2024) Lifetime losses due to cardiovascular and respiratory diseases attributable to air pollution in polluted and unpolluted areas. *Int. J. Environ. Health Res.*, 34(3), 1525-1539. <https://doi.org/10.1080/09603123.2023.2225426>

¹⁹ European Union (2008). Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. <https://short.do/MHpAut>

²⁰ European Union (2022). Decision (EU) 2022/591 of the European Parliament and of the Council of 6 April 2022 on a General Union Environment Action Programme to 2030. <https://goo.su/3uzUxz6>

²¹ Ministerio de Medio Ambiente (2004) Estrategia Española de Calidad del Aire (2004), *Gobierno de España*. Madrid, España. <https://goo.su/dVCz2i>

²² Jefatura del Estado (2007) Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera. *Gobierno de España*. Madrid, España. <https://www.boe.es/buscar/pdf/2007/BOE-A-2007-19744-consolidado.pdf>

²³ Ministerio de la Presidencia (2011) Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire. *Gobierno de España*. Madrid, España. <https://www.boe.es/buscar/pdf/2011/BOE-A-2011-1645-consolidado.pdf>

²⁴ Ministerio de Sanidad y Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico (2021) Plan Estratégico de Salud y Medio Ambiente 2022-2026. *Gobierno de España*. Madrid, España. https://www.sanidad.gob.es/ciudadanos/pesma/docs/241121_PESMA.pdf

1.3 LA IMPORTANCIA DE LA VENTILACIÓN EN LOS EDIFICIOS

Desde los albores de la humanidad, lo importante para el hombre era buscar cobijo o dominar el fuego. Ahora que ya tenemos todas nuestras necesidades cubiertas, la importancia de la ventilación en los edificios cobra especial importancia, dado que es el lugar en el que el ser humano pasa más tiempo a lo largo del día, entre su trabajo y su casa, o lo que es lo mismo, la “*residencia*” profesional y familiar.

La calidad del aire interior, su relación con la ventilación y cómo se vincula con la aparición de enfermedades, ha sido objeto de investigación a lo largo el tiempo, incrementando su importancia con la aparición del COVID-19^{25,26}. Esta apuesta por disponer de ambientes saludables también tiene en cuenta las condiciones de habitabilidad de los edificios, de forma que sea preceptivo garantizar unos estándares de calidad del aire interior de las edificaciones, con el objetivo de conseguir unos niveles de salubridad y de confort adecuados para el desarrollo de una vida saludable^{27,28,29,30,31}.

Tanto el *Scientific Committee on Health and Environmental Risks* (SCHER), que asesora a la Comisión Europea, como la *United States Environmental Protection Agency* (EPA), consideran de especial importancia conseguir una calidad del aire interior de los edificios, ya que es donde las personas permanecen más tiempo^{32,33}, ya sea en sus casas o en los lugares de trabajo. Estos organismos exigen erradicar los elementos contaminantes presentes de forma habitual en el

²⁵ Jerrett, M. (2022) Air pollution as a risk for death from infectious respiratory disease, *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, 205(12), 1374-1375. <https://doi.org/10.1164/rccm.202202-0351ED>

²⁶ García, C., Bluyssen, P. M. (2023) Assessing Indoor Air Quality and Ventilation to Limit Aerosol Dispersion-Literature Review. *Buildings*, 13, 742. <https://doi.org/10.3390/buildings13030742>

²⁷ Kelly, F. J., Fusell, J. C. (2019) Improving indoor air quality, health and performance within environments where people live, travel, learn and work. *Atmos. Environ.*, 200, 90-109. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.11.058>

²⁸ Mentese, S., Mirici, N. C., Elbir, T., Palaz, E., Mumcuoğlu, D. T., Cotuker, O., Kakar, C., Oymak, S., Otkun, M. T. (2020) A long-term multi-parametric monitoring study: Indoor air quality (IAQ) and the sources of the pollutants, prevalence of sick building syndrome (SBS) symptoms, and respiratory health indicators. *Atmos. Pollut. Res.*, 11(12), 2270-2281. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.07.016>

²⁹ Yang, S., Mahecha, S. D., Moreno, S. A., Licina, D. (2022) Integration of indoor air quality prediction into healthy building design. *Sustain.*, 14(13), 7890. <https://doi.org/10.3390/su14137890>

³⁰ Kumar, P., Singh, A. B., Arora, T., Singh, S., Singh, R. (2023) Critical review on emerging health effects associated with the indoor air quality and its sustainable management. *Sci. Total Environ.*, 872, 162163. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162163>

³¹ Maury-Micolier, A., Huang, L., Taillandier, F., Sonnemann, G., Jolliet, O. (2023) A life cycle approach to indoor air quality in designing sustainable buildings: Human health impacts of three inner and outer insulations. *Build. Environ.*, 230, 109994. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.109994>

³² European Union Scientific Committee on Health and Environmental Risks (SCHER). *European Commission*. Brussels, Belgium. <https://goo.su/fZB06r>

³³ United States Environmental Protection. United States Federal Government Agency. Washington, D.C., United States of America. <https://www.epa.gov/>

interior de los edificios, valorando su presencia mediante metodologías basadas en la concentración de CO₂ y evitándolos mediante caudales mínimos de ventilación^{34, 35, 36, 37, 38}.

Se han elaborado modelos para determinar la influencia de los factores ambientales en el bienestar de los ocupantes³⁹, su influencia en la seguridad y

³⁴ Cincinelli, A., Martellini, T. (2017) Indoor air quality and health. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 14(11), 1286. <https://doi.org/10.3390/ijerph14111286>

³⁵ Steinemann, A., Wargocki, P., Rismanchi, B. (2018) Ten questions concerning green buildings and indoor air quality. *Build. Environ.*, 112(1), 351-358. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.010>

³⁶ Johnson, D.L., Lynch, R.A., Floyd, E. L., Wang, J., Bartels, J. N. (2018) Indoor air quality in classrooms: Environmental measures and effective ventilation rate modelling in urban elementary schools. *Build. Environ.*, 136, 185-197. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.040>

³⁷ Lu, X., Pang, Z., Fu, Y., O'Neill, Z. (2022) The nexus of the indoor CO₂ concentration and ventilation demands underlying CO₂-based demand-controlled ventilation in commercial buildings: A critical review. *Build. Environ.*, 218, 109116. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109116>

³⁸ Touati, K., Benzaama, M. H., El Mendili, Y., Le Guern, M., Streiff, F., Goodhew, S. (2023) Indoor Air Quality in Cob Buildings: In Situ Studies and Artificial Neural Network Modeling. *Buildings*, 13(11), 2892. <https://doi.org/10.3390/buildings13112892>

³⁸ European Union. Scientific Committee on Health and Environmental Risks (SCHER). European Commission. Brussels, Belgium. <https://goo.su/bIN2B>

³⁸ United States Environmental Protection. United States Federal Government Agency. Washington, D.C., United States of America. <https://www.epa.gov/>

³⁸ Cincinelli, A., Martellini, T. (2017) Indoor air quality and health. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 14(11), 1286. <https://doi.org/10.3390/ijerph14111286>

³⁸ Steinemann, A., Wargocki, P., Rismanchi, B. (2017) Ten questions concerning green buildings and indoor air quality. *Build. Environ.*, 112(1), 351-358. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.010>

³⁸ Johnson, D. L., Lynch, R. A., Floyd, E. L., Wang, J., Bartels, J. N. (2018) Indoor air quality in classrooms: Environmental measures and effective ventilation rate modelling in urban elementary schools. *Build. Environ.*, 136, 185-197. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.040>

³⁸ Lu, X., Pang, Z., Fu, Y., O'Neill, Z. (2022) The nexus of the indoor CO₂ concentration and ventilation demands underlying CO₂ based demand-controlled ventilation in commercial buildings: A critical review. *Build. Environ.*, 218, 109116. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109116>

³⁸ Touati, K., Benzaama, M. H., El Mendili, Y., Le Guern, M., Streiff, F., Goodhew, S. (2023) Indoor Air Quality in Cob Buildings: In Situ Studies and Artificial Neural Network Modelling. *Build.*, 13(11), 2892. <https://doi.org/10.3390/buildings13112892>

³⁹ Fukawa, Y., Ohba, M., Akamatsu, N., Onoda, R., Ikeuchi, K., Minami, K., Takahashi, N., Watanabe, F., Lida, T., Kaneko, Y., Tanabe, S. (2024) Influence analysis of environmental factors on the subjective well-being of office workers in Japan: A structural equation modeling approach. *Build. Environ.*, 262, 11827. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111827>

salud^{40,41} y su relación con el síndrome del edificio enfermo^{42,43}. En consecuencia, la renovación del aire en el interior de los edificios es un aspecto que cobra especial importancia en el diseño y concepción de edificios residenciales, dado que la concentración de sustancias patógenas puede afectar tanto a la salud como a la calidad de vida de las personas que los habitan⁴⁴.

La preocupación por la calidad del aire en recintos destinados a actividades docentes, donde la concentración de personas procedentes de diferentes ambientes puede contribuir a la propagación y el contagio de enfermedades, obliga a garantizar unas especiales condiciones de salubridad^{45,46,47}. De igual forma, es especialmente importante considerar esta circunstancia en edificios sanitarios, ya que la presencia de sustancias patógenas en el aire no solo afecta al personal sanitario que presta sus servicios en ellos, sino que puede afectar también a la vida de las personas convalecientes^{48,49,50}.

⁴⁰ Rodríguez, M., Seseña, S., Valiente, N., Llanos, M., Rodríguez, A. (2024) Indoor air quality in elder. *Build. Environ.*, 262, 111832. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111832>

⁴¹ Parhizkar, H., Taddei, P., Weziak-Białowolska, D., McNeely, E., Spengler, J., Cedeño, J.G. (2023) Objective indoor air quality parameters and their association to respiratory health and well-being among office workers. *Build. Environ.*, 246(1), 110984. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110984>

⁴² Takigawa, T., Saijo, Y., Morimoto, K., Nakayama, K., Shibata, E., Tanaka, M., Yoshimura, T., Chikara, H., Kishi, R. (2012) A longitudinal study of aldehydes and volatile organic compounds associated with subjective symptoms related to sick building syndrome in new dwellings in Japan. *Sci. Total Environ.*, 417, 61-67. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.12.060>

⁴³ Takigawa, T., Wang, B. L., Sakano, N., Wang, D. H., Ogino, K., Kishi, R. (2009) A longitudinal study of environmental risk factors for subjective symptoms associated with sick building syndrome in new dwellings. *Sci. Total Environ.*, 407(19), 5223-5228. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.06.023>

⁴⁴ Gens, A., Hurley, J. F., Tuomisto, J. T., Friedrich, R. (2014) Health impacts due to personal exposure to fine particles caused by insulation of residential buildings in Europe. *Atmos. Environ.*, 84, 213-221. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.11.054>

⁴⁵ Jan, R., Roy, R., Satsangi, S. (2017) Exposure assessment of children to particulate matter and gaseous species in school environments of Pune, India. *Build. Environ.*, 111, 207-217. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.008>

⁴⁶ Saraiva, T. S., De Almeida, M., Bragança, L., Barbosa, M. T. (2018) Environmental comfort indicators for school buildings in sustainability assessment tools. *Sustainability*, 10(6), 1849. <https://doi.org/10.3390/su10061849>

⁴⁷ Vornanen-Winqvist, C., Järvi, K., Andersson, M. A., Duchaine, C., Létourneau, V., Kedves, O., Salonen, H. (2020) Exposure to indoor air contaminants in school buildings with and without reported indoor air quality problems. *Environ. Int.*, 141, 105781. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105781>

⁴⁸ Zeeshan, M., Hashmi, I., Zahid, U., Bhatti, M. F. (2018) Microbial quality assessment of indoor air in a large hospital building during winter and spring seasons. *Build. Environ.*, 135, 68-73. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.010>

⁴⁹ Shajahan, A., Culp, C. H., Williamson, B. (2019) Effects of indoor environmental parameters related to building heating, ventilation, and air conditioning systems on patients' medical outcomes: A review of scientific research on hospital buildings. *Indoor Air*, 29(2), 161-176. <https://doi.org/10.1111/ina.12531>

⁵⁰ Colas, A., Baudet, A., Le Cann, P., Blanchard, O., Gangneux, J. P., Baurès, E., Florentin, A. (2022) Quantitative Health Risk Assessment of the Chronic Inhalation of Chemical Compounds in Healthcare and Elderly Care Facilities. *Toxics*, 10(3), 141. <https://doi.org/10.3390/toxics10030141>

La preocupación por los contaminantes presentes en ambientes interiores, las reacciones químicas que se producen, su capacidad de dispersión y como se generan durante la actividad humana^{51,52,53,54}, unido a que, con frecuencia, su concentración es mayor que en el exterior, han llevado a los organismos internacionales como la Unión Europea y la Organización Mundial de la Salud, a regular su presencia^{55,56}.

Esta preocupación por la afección que el aire viciado y contaminado tiene sobre la salud de las personas ha motivado iniciativas para su regulación, mediante disposiciones normativas específicas en diferentes países, la mayor parte de ellas referidas a la calidad del aire exterior. Por ejemplo, en la Unión Europea, el Plan de Acción Europeo de Medio Ambiente y Salud 2004-2010⁵⁷ ya hacía referencia a la necesidad de mejorar la calidad del aire en el interior de los edificios. Por otra parte, la Estrategia Española de Calidad del Aire, impulsada por el Ministerio de Medio Ambiente, creó un grupo de trabajo para el estudio de la incidencia de la calidad del aire en la salud de las personas⁵⁸. Como consecuencia, en el año 2013 se publicó el Plan Nacional de Calidad del Aire y Protección de la Atmósfera 2013-2016⁵⁹ y en 2017 el Plan Nacional de Calidad del Aire 2017-2019 (Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, 2017)⁶⁰. Por otra parte, la Organización Mundial de la Salud ha actualizado recientemente los

⁵¹ Weschler C. J. (2011) Chemistry in indoor environments: 20 years of research. *Indoor Air.*, 1, 205-2018. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2011.00713.x>

⁵² Morrison, G. (2015) Recent Advances in Indoor Chemistry. *Build. Environ.*, 2, 33-40. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s40518-015-0026-9.pdf>

⁵³ Pei, J., Yin, Y., Liu, J., Dai, X. (2020) An eight-city study of volatile organic compounds in Chinese residences: Compounds, concentrations, and characteristics. *Sci. Total Environ.*, 698, 134137 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134137>

⁵⁴ Dimitroulopoulou, S., Dudzinska, M., Gunnarsen, L., Hägerhed, L., Maula, H., Singh, R., Toyinbo, O., Haverinen, U. (2023) Indoor air quality guidelines from across the world: An appraisal considering energy saving, health, productivity, and comfort. *Environ. Intern.* 179, 108127. <https://www.researchgate.net/publication/372822490>

⁵⁵ Kotzias, D., (2022) Exposure to volatile organic compounds in indoor/outdoor environments and methodological approaches for exposure estimates the European paradigm. *J. Hazard. Mater. Adv.*, 8, 100197. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100197>

⁵⁶ Mai, J. L., Yang, W. W., Zeng, Y., Guan, Y. F., Chen, S. J. (2024) Volatile organic compounds (VOCs) in residential indoor air during interior finish period: Sources, variations, and health risks. *Hyg. Environ. Health*, 9, 100087. <https://doi.org/10.1016/j.heha.2023.100087>

⁵⁷ European Union (2004) Environment & Health Action Plan 2004-2010. Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee. <https://goo.su/iRji>

⁵⁸ Ministerio de Medio Ambiente (2004) Estrategia Española de Calidad del Aire. Gobierno de España. Madrid, España. <https://goo.su/9RnZ2>

⁵⁹ Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2013) Plan Nacional de Calidad del Aire y Protección de la Atmósfera 2013-2016: Plan Aire. Gobierno de España. Madrid, España. <https://www.boe.es/buscar/pdf/2013/BOE-A-2013-5428-consolidado.pdf>

⁶⁰ Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (2017) Plan Nacional de Calidad del Aire 2017-2019 (Plan Aire II). Gobierno de España. Madrid, España. [file:///C:/Users/UBU/Downloads/plan-nacional-de-accion-de-calidad-del-aire-2017-2%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/UBU/Downloads/plan-nacional-de-accion-de-calidad-del-aire-2017-2%20(1).pdf)

CAPÍTULO 1

límites de contaminación ambiental a los que pueden estar expuestas las personas sin riesgos para su salud, incrementando notablemente los valores de referencia⁶¹.

En España, el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE en adelante)⁶² establece en la Instrucción Técnica 1.1.4.2 exigencias sobre la calidad del aire de los recintos interiores de edificios en función de su tipología y uso. En el ámbito de la contaminación biológica, en 2020, el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, en coordinación con el Ministerio de Sanidad, publicó un conjunto de recomendaciones y referencias para orientar las actividades de las empresas de instalación y mantenimiento de equipos de ventilación en la prevención de los contagios producidos por el SARS-CoV-2⁶³.

Al margen de este tipo de consideraciones, dada la situación sanitaria generada por la Pandemia de COVID-19, resulta necesario considerar la actualización de los parámetros de referencia para garantizar la calidad del aire en los edificios, con el objetivo de minimizar los riesgos por contaminación. Para ello, se requieren Tasas de Renovación del Aire más elevadas, evitando la concentración de patógenos agresivos para la salud, entre ellos, los coronavirus, como el SARS-CoV-2.

El Centro Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) ha publicado recientemente una Guía para la Ventilación de las Aulas, con el objetivo de reducir el riesgo de contagio por la COVID-19⁶⁴ en centros de enseñanza, que toma como referencia la Metodología *Steady State CO₂*, publicada por la Universidad de Harvard.⁶⁵ De igual forma, el Grupo de Trabajo de Ventilación en Centros Educativos, de la Asociación de Fabricantes de Equipos de Climatización (AFEC) ha publicado un conjunto de recomendaciones para renovar el aire de las aulas en colegios, institutos y centros universitarios, con el objetivo de reducir el

⁶¹ World Health Organization (2021). WHO Global Air Quality Guidelines. WHO European Centre for Environment and Health. Bonn, Germany. <https://shre.ink/5R0c>.

⁶² Ministerio de la Presidencia (2021) Real Decreto 178/2001 de Modificación del Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE). Gobierno de España. Madrid, España. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2021/03/23/178/dof/spa/pdf>

⁶³ Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2020) Recomendaciones de operación y mantenimiento de los sistemas de climatización y ventilación de edificios y locales para la prevención de la propagación del SARS-CoV-2. Gobierno de España. Madrid, España. <https://shre.ink/5R6Y>.

⁶⁴ Ministerio de Ciencia e Innovación (2020) Centro Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua, IDAEA-CSIC. Guía para la Ventilación en Aulas. Gobierno de España. Madrid, España. https://www.csic.es/sites/default/files/guia_para_ventilacion_en_aulas_csic-mesura.pdf

⁶⁵ Allen, J., Spengler, J., Jones, E., Cedeno-Laurent, J. (2020) How School Buildings Influence Student Health. Thinking and Performance. Harvard T.H. Chan Healthy Buildings Program. Cambridge, United States. <https://schools.forhealth.org/>

riesgo de transmisión de enfermedades, conseguir espacios más saludables y, de esta forma, incrementar el rendimiento escolar de los estudiantes⁶⁶.

En este trabajo de investigación se presenta una metodología acorde a lo expuesto anteriormente, que se basa en la aplicación combinada de Normas Españolas UNE, creadas en los Comités Técnicos de Normalización de la Asociación Española de Normalización (AENOR) y cuyos resultados concuerdan con la guía de aplicación anteriormente referenciada⁶⁷.

1.4 LA VENTILACIÓN NATURAL

La integración de la ventilación natural en el diseño de los edificios es un método funcional y sencillo para eliminar la contaminación en ambientes interiores.^{68,69,70} Además, también es una alternativa innovadora para conseguir una alta eficiencia energética y unos niveles adecuados de confort⁷¹. Estas metodologías de trabajo han sido objeto de estudio en múltiples ocasiones, incluso en los espacios asilados, donde se ha demostrado que la ventilación natural mejora la eliminación de contaminantes, ofreciendo un ambiente seguro frente a la transmisión de virus como el SARS-CoV-2⁷².

El uso de las ventanas es un método habitual para mejorar la calidad de aire⁷³, habiéndose realizado estudios predictivos del comportamiento humano

⁶⁶ AFEC-Asociación de Fabricantes de Equipos de Climatización. (2021) Recomendaciones de Ventilación para Centros Educativos. Grupo de Trabajo de Ventilación en Centros Educativos de la AFEC. Madrid, España. <https://goo.su/FLV4T0>

⁶⁷ Allen, J., Spengler, J., Jones, E., Cedeno-Laurent, J. (2020) How School Buildings Influence Student Health. Thinking and Performance. Harvard T.H. Chan Healthy Buildings Program. Cambridge, United States. <https://schools.forhealth.org/>

⁶⁸ Heiselberg, P. (2016) Natural Ventilation Design. *Int. J. Vent.*, 2, 295-312. <https://doi.org/10.1080/14733315.2004.11683674>

⁶⁹ Zuraimi, M.S., Pantazaras, A., Chaturvedi, K. A., Yang, J. J., Tham, K. W., Lee, S. E. (2017) Predicting occupancy counts using physical and statistical CO₂ based modeling methodologies. *Build. Environ.*, 123, 517-528. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.027>

⁷⁰ Wolf, S., Cali, D., Krogstie, J., Madsen, H. (2019) Carbon dioxide-based occupancy estimation using stochastic differential equations. *Appl. Energy*, 236, 32-41. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.078>

⁷¹ Xie, Z., Zhu, Y., Cao, B. (2024) Multi-fanning based simulated natural wind environment and its comfort performance under warm to hot conditions. *Build. Environ.*, 262, 111792. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111792>

⁷² Karumuna, B. V., Hao, L. (2024) CO₂ Concentration Assessment for Infection Monitoring and Occupancy Analysis in Tanzanian COVID-19 Isolation Centers. *Buildings*, 14, 2139. <https://doi.org/10.3390/buildings14072139>

⁷³ Yang, X., Zhang, J., Cheng, Y., Weng, X., Yin, R., Guo, L., Cheng, Z. (2024) A Method to Optimize Dormitory Environments Based on Personnel Behavior Regulation. *Buildings*, 14, 2111. <https://doi.org/10.3390/buildings14072111>

CAPÍTULO 1

relacionados con su apertura^{74,75,76,77,78,79,80}, implementando franjas horarias⁸¹ o estimado el tiempo necesario de ventilación a través de la monitorización de gases⁸², con el objetivo de mejorar la eficiencia energética de los edificios.

Es habitual la aplicación de Metodologías Estadísticas⁸³ y los Modelos de Simulación para predecir el viento en interiores⁸⁴ y la influencia de la ventilación cruzada en los edificios^{85,86,87}. No obstante, los resultados son poco precisos para los casos donde las aberturas son pequeñas y simples, además de depender de

⁷⁴ Jeong, B., Jeong, J., Park, J. S. (2016) Occupant behavior regarding the manual control of windows in residential buildings. *Energy Build.*, 127, 206-216. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.097>

⁷⁵ Fabi, V., Korsholm, R., Corgnati, S. (2015) Verification of stochastic behavioral models of occupants' interactions with windows in residential buildings. *Build. Environ.*, 94, 371-383. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.08.016>

⁷⁶ Huang, K., Feng, G., Li, H., Shui Yu, S. (2014) Opening window issue of residential buildings in winter in north China: A case study in Shenyang. *Energy Build.*, 84, 567-574. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.005>

⁷⁷ Calì, D., Korsholm, R., Müller, D., Olesen, B. (2016) Analysis of occupants behavior related to the use of windows in German households. *Build. Environ.*, 103, 54-69. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.03.024>

⁷⁸ Markovic, R., Grintal, E., Wölki, D., Frisch, J., Van Treeck, C. (2018) Window opening model using deep learning methods. *Build. Environ.*, 145, 319-329. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.024>

⁷⁹ Jeong, B., Jeong, J. W., Park, J. S. (2016) Occupant behavior regarding the manual control of windows in residential buildings. *Energy Build.*, 127, 206-216. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.097>

⁸⁰ Elkabalawy, M., Al-Sakkaf, A., Mohammed, E., Alfalah, G. (2024) CRISP-DM-Based Data-Driven Approach for Building Energy Prediction Utilizing Indoor and Environmental Factors. *Sustainability*, 16, 7249. <https://doi.org/10.3390/su16177249>

⁸¹ Xiang, H., Li, J. (2024) Impact of Night Ventilation on Indoor Thermal Environment of Residential Buildings under the Dual Carbon Target: A Case Study of Xi'an. *Buildings*, 14, 2459. <https://doi.org/10.3390/buildings14082459>

⁸² Pei, J., Yin, Y., Junjie, J. (2016) Long-term indoor gas pollutant monitor of new dormitories with natural ventilation. *Energy Build.*, 129, 514-523 <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.033>

⁸³ Hernández, P., Erkoreka, A., Gonzalez, Giraldo, C., Mora, L., Eguía, P. (2024) Measurement uncertainty and behavior analysis of indoor air quality variables of thermal zones of an in use mechanically ventilated building. *Build. Environ.*, 262, 111842. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111366>

⁸⁴ Jiang, Z., Kobayashi, T., Yamanaka, T., Sandberg, M., Yamasawa, H., Miyazawa Shohei, M. (2024) The similitude of indoor airflow in natural ventilation for a reducedscale model: Investigation of no isothermal flow fields by RANS simulation. *Build. Environ.*, 262, 111842. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111842>

⁸⁵ Ohba, M., Lun, I. (2010) Overview of natural cross ventilation studies and the latest simulation design tools used in building ventilation-related research. *Adv. Build. Energy Res.*, 4, 127-166. <https://doi.org/10.3763/aber.2009.0405>

⁸⁶ Aldawoud, A. (2017) Windows design for maximum cross ventilation in buildings. *Adv. Build. Energy Res.*, 11, 67-86. <https://doi.org/10.1080/17512549.2016.1138140>

⁸⁷ Sandberg, M. (2004) An Alternative View on the Theory of Cross Ventilation. *Int. J. Vent.*, 2, 409-418. <https://doi.org/10.1080/14733315.2004.11683682>

coeficientes algo ambiguos⁸⁸. Por otra parte, los enfoques numéricos están basados en indicadores relacionados con la dosis, mientras que el edificio y los ocupantes sólo se utilizan en estudios específicos⁸⁹, como es el caso de las oficinas^{90,91}, los hospitales, incluidas las Unidades de Cuidados Críticos⁹², los centros deportivos⁹³ y escuelas⁹⁴.

1.5 LA COVID COMO BIOEFLUENTE

Según la Organización Mundial de la Salud las infecciones respiratorias por SARS-CoV-2 pueden transmitirse por las siguientes vías: transmisión por gotas y por contacto, ya sea directo, indirecto o por contacto estrecho con personas infectadas, o por transmisión aérea por aerosoles (gotas pequeñas, microgotas menores de 5 micras). Considerando esta última posibilidad de transmisión aérea como muy probable, se plantea una metodología de trabajo basada en el análisis directo de un bioefluente como el dióxido de carbono, de forma que el conocimiento de su comportamiento permita la prevención de la propagación y los contagios del SARS-CoV-2 en interiores⁹⁵.

El dióxido de carbono (CO₂ en adelante por su formulación química) es un componente presente en el aire, siendo sus niveles habituales de entre 300 y 400 partes por millón (ppm en adelante), pudiendo alcanzar en zonas urbanas valores de hasta 500 ppm. El CO₂ también se puede comportar como un contaminante, pudiendo asfixiar por el simple desplazamiento del oxígeno. En concentraciones

⁸⁸ Zhai, Z., Johnson, M. H., Mankibi, M. E., Stathopoulos, N. (2016). Review of natural ventilation models. *Int. J. Vent.*, 15(3-4), 186-204. <https://doi.org/10.1080/14733315.2016.1214390>

⁸⁹ García, C., Bluyssen, P. M. (2023) Assessing Indoor Air Quality and Ventilation to Limit Aerosol Dispersion. Literature Review. *Buildings*, 13, 742. <https://doi.org/10.3390/buildings13030742>

⁹⁰ Felgueiras, F., Mourão, Z., Moreira, A., Fonseca, M. (2023) Indoor environmental quality in offices and risk of health and productivity complaints at work: A literature review. *J. Hazard. Mater. Adv.*, 10, 100314. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2023.100314>

⁹¹ Zhang, X., Du, J., David Chow, D. (2023) Association between perceived indoor environmental characteristics and occupants' mental wellbeing, cognitive performance, productivity, satisfaction in workplaces: A systematic review. *Build. Environ.*, 246, 110985. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110985>

⁹² Nyembwe, J., Munanga, J., Simões, N., da Silva, M. G. (2024) Ventilation Strategies to Mitigate Air Pollution Impact on Hospital Professionals in Intensive Care Units in the Democratic Republic of Congo. *Buildings*, 14, 1996. <https://doi.org/10.3390/buildings14071996>

⁹³ Zhang, D., Ortiz, M., Bluyssen, P. (2022) A review on indoor environmental quality in sports facilities: Indoor air quality and ventilation during a pandemic. *Indoor Built. Environ.*, 0, 1-21. <https://www.researchgate.net/publication/366488822>

⁹⁴ Galičič, A., Rožanec, J., Kučec, A., Medved, S., Eržen, I. (2024) Assessment of Perceived Indoor Air Quality in the Classrooms of Slovenian Primary Schools and Its Association with Indoor Air Quality Factors for the Design of Public Health Interventions. *Atmosphere*, 15, 995. <https://doi.org/10.3390/atmos15080995>

⁹⁵ World Health Organization (2021). WHO Global Air Quality Guidelines. WHO European Centre for Environment and Health. Bonn, Germany. <https://goo.su/FzaoOo>

superiores a 30.000 ppm, puede causar dolor de cabeza, mareos, somnolencia y problemas respiratorios, dependiendo de la duración de la exposición.

El valor límite de exposición profesional para exposiciones diarias de 8 horas es de 5.000 ppm, con un valor límite para exposiciones cortas de 15 minutos de 15.000 ppm. Estos valores están asociados a combustiones, por lo que son difíciles de encontrar en ambientes interiores. En el interior de edificios, la emisión de CO₂ se debe a la respiración humana y, en consecuencia, está ligada a la presencia de productos procedentes del metabolismo humano (agua, aerosoles biológicos, partículas, alcoholes, aldehídos, etc.) llamados bioefluentes. Los valores de referencia utilizados establecen que, en 600 ppm, los individuos más sensibles ya manifiestan quejas y molestias. En la práctica, se acepta que no debe superarse una concentración 1.000 ppm de CO₂, con el fin de que el aire sea considerado aceptable para aproximadamente el 80% de los visitantes del local. Estos valores se obtienen de la norma UNE-EN ISO 7730:06, sobre el cálculo de bienestar térmico local ⁹⁶.

El elemento químico más habitual en la caracterización de la calidad de aire en interiores con presencia humana prolongada es el dióxido de carbono (CO₂), el cual está relacionado con la actividad física de las personas⁹⁷. Además, se ha utilizado habitualmente para reducir el riesgo de enfermedades respiratorias transmitidas por aerosoles como el COVID-19, siendo un marcador adecuado para predecir la Tasa de Ocupación^{98,99}.

La literatura revisada se ha centrado en analizar los temas de aerosoles, riesgo de dispersión, ventilación e infección por separado en lugar de juntos, evitando en su mayoría la inclusión de los temas de parámetros de diseño y comportamiento humano¹⁰⁰. Es por esto por lo que se hace necesario en el

⁹⁶ EN ISO 7730:2006 Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local (ISO 7730:2005). European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

⁹⁷ Li, M., Bekö, G., Zannoni, N., Pugliese, G., Carrito, M., Cera, N., Moura, C., Wargocki, P., Vasconcelos, P., Nobre, P., Wang, N., Ernale, L., J. Willians, J. (2022) Human metabolic emissions of carbon dioxide and methane and their implications for carbon emissions. *Sci. Total Environ.*, 833, 155241. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155241>

⁹⁸ Ballesteros-Álvarez, J. M., Romero-Barriuso, A., Villena-Escribano, B. M., Rodríguez-Saiz, A, González-Gaya, C. (2024) Investigating the effectiveness of a new indoor ventilation model in reducing the spread of disease: A case of sports centers amid the COVID-19 pandemic. *Heliyon*, 10(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27877>

⁹⁹ Karumuna, B. V., Hao, L. (2024) CO₂ Concentration Assessment for Infection Monitoring and Occupancy Analysis in Tanzanian COVID-19 Isolation Centers. *Buildings*, 14, 2139. <https://doi.org/10.3390/buildings14072139>

¹⁰⁰ García, C.; Bluyssen, P. M. Assessing Indoor Air Quality and Ventilation to Limit Aerosol Dispersion. Literature Review. *Buildings*, 2023, 13, 742. <https://doi.org/10.3390/buildings13030742>

diseño de edificios saludables un enfoque integrado como alternativa en el que se adapte a las condiciones de ventilación a la actividad y la ocupación¹⁰¹.

Normativamente, la calidad de aire interior se establece a partir del caudal de ventilación requerido por ocupante. Los estándares americanos lo sitúan en 7 l/s por persona¹⁰², para locales de oficinas 7,5 l/s por persona¹⁰³, y en entornos laborales 8,3 l/s por trabajador¹⁰⁴. Estos valores no tienen en cuenta las dimensiones del recinto.

Durante la crisis sanitaria del COVID-19, se asumió como adecuados 14,0 l/s por persona, y cinco renovaciones de aire a la hora^{105,106,107}. De esta forma, también se tienen en consideración las condiciones del local.

Las exigencias de calidad de aire en interiores se determinan a partir de la referencia de concentración de dióxido de carbono¹⁰⁸, método que permite contemplar, de forma conjunta, tanto el aforo del recinto como las características del local.

La literatura científica más reciente establece que Tasas de Flujo superiores a cinco renovaciones a la hora, conllevan malestar a los ocupantes y son contraproducentes en el control de enfermedades como el COVID-19, ya que permiten una mayor dispersión de las gotas de los efluentes humanos. Para contener las infecciones, se consideran adecuadas tres renovaciones a la hora¹⁰⁹

¹⁰¹Zhang, D., Marco, M., Bluyssen, P. (2022) A review on indoor environmental quality in sports facilities: Indoor air quality and ventilation during a pandemic. *Indoor. Build. Environ.*, 0(0) 1–21. <https://www.researchgate.net/publication/366488822>

¹⁰² Standard ASHRAE 62.1 (2022). Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. The American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. American National Standards Institute. https://ashrae.iwrapper.com/ASHRAE_PREVIEW_ONLY_STANDARDS/STD_62.1_2022

¹⁰³ EN 16798-3:2018 Energy performance of buildings-Ventilation for buildings-Part 3: For non-residential buildings - Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems (Modules M5-1, M5-4). European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

¹⁰⁴ Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales (1997) 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. Gobierno de España. Madrid, España. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1997-8669>

¹⁰⁵ Allen, J. Spengler, J., Jones, E., Cedeno-Laurent, J. (2020) How School Buildings Influence Student Health. Thinking and Performance. Harvard T.H. Chan Healthy Buildings program. <https://schools.forhealth.org/>

¹⁰⁶ Ministerio de Ciencia e Innovación (2020) Centro Superior de Investigaciones Científicas-CSIC) Guía para la Ventilación en Aulas. Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua, IDAEA-CSIC. Gobierno de España. Madrid, España. https://www.csic.es/sites/default/files/guia_para_ventilacion_en_aulas_csic-mesura.pdf

¹⁰⁷ AFEC-Asociación de Fabricantes de Equipos de Climatización. (2021). Recomendaciones de Ventilación para Centros Educativos. Grupo de Trabajo de Ventilación en Centros Educativos de la AFEC. Madrid, España. <https://goo.su/FLV4T0>

¹⁰⁸ Ministerio de la Presidencia (2007) Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios. Gobierno de España. Madrid, España. <https://www.boe.es/boe/dias/2007/08/29/pdfs/A35931-35984.pdf>

¹⁰⁹ Dimitroulopoulou, S., Dudzinska, M. R., Gunnarsen, L., Hägerhed, L., Maula, H., Singh, R., Toyinbo, O., Haverinen, U., (2023) Indoor air quality guidelines from across the world: An appraisal considering energy saving, health, productivity, and comfort. *Environ. Int.*, 178, 108127. <https://www.researchgate.net/publication/372822490>

y valores de dióxido de carbono inferiores a 800 ppm. Con estos parámetros, se puede afirmar que un espacio presenta muy buena ventilación, reduciéndose el riesgo de contagio para los ocupantes¹¹⁰.

Este estudio plantea utilizar indicadores poco habituales¹¹¹, como el análisis de las características de los edificios, sus ocupantes y la actividad que estén desarrollando, de forma que, mediante el control de los aforos, se asegure la calidad de aire deseada en los recintos interiores¹¹².

Se plantea un método alternativo para determinar la correcta ventilación, basado en concentraciones de CO₂, por ser este un bioefluente al igual que la COVID-19, tal y como subyace en *Healthy Buildings*^{113, 114,115}.

En ambientes interiores, se toma como indicador de la calidad del aire la concentración del CO₂ producido por la respiración de los ocupantes del edificio, considerándola dependiente de la ventilación. El CO₂ que se difunde a la atmósfera se puede diluir por mezcla turbulenta con el aire y por difusión, debido a los gradientes de concentración. Una ventilación adecuada puede reducir el tiempo de persistencia de la atmósfera gaseosa y, por asociación, la concentración del patógeno. Es por ello que, en este estudio, a partir de este parámetro, se realizan los cálculos de ocupación.

En base a estos parámetros, se ofrece una visión de la situación actual de una muestra de los municipales del Ayuntamiento de Móstoles, con el objetivo de mejorar las condiciones de ventilación.

1.5.1 Velocidad del viento

La ocupación se obtiene por comparación del valor de referencia ($Q_{\text{requerido}}$) y la ventilación disponible. Ésta última está íntimamente relacionada con la velocidad de aire exterior, valor extremadamente fluctuante que requiere

¹¹⁰ Malki, L., Adzic, F., Roberts, B., Hathway, E. A., Iddon, C., Mustafa, M., Cook, M. (2022) Measurement and rapid assessment of indoor air quality at mass gathering events to assess ventilation performance and reduce aerosol transmission of SARS-CoV-2, *Building Serv. Eng. Res. Technol.*, 44(2), 113-133. <https://www.researchgate.net/publication/366354932>

¹¹¹ García, C., Bluysen, P. M. (2023) Assessing Indoor Air Quality and Ventilation to Limit Aerosol Dispersion. Literature Review. *Buildings*, 13, 742. <https://doi.org/10.3390/buildings13030742>

¹¹² Ballesteros-Álvarez, J. M., Romero-Barriuso, Á., Villena-Escribano, B. M., Rodríguez-Sáiz, Á., González-Gaya, C. (2024) Investigating the effectiveness of a new indoor ventilation model in reducing the spread of disease: A case of sports centres amid the COVID-19 pandemic. *Heliyon*, 10(6) (2024). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27877>

¹¹³ H.A.U.S. Healthy Buildings GBCE, (2020) Salud, espacios, personas. Green Building Council España. <https://gbce.es/documentos/Salud-Espacios-Personas.pdf>

¹¹⁴ Allen, J. Spengler, J., Jones, E., Cedeno-Laurent, J. (2020) How School Buildings Influence Student Health. Thinking and Performance. Harvard T.H. Chan Healthy Buildings Program. Cambridge, United States. <https://schoolsforhealth.org/>

¹¹⁵ Allen, J., Macomber, J. D. (2022). Healthy Buildings: How Indoor Spaces Can Make You Sick or Keep You Well. Harvard University Press.

adoptar las condiciones más desfavorables de valores proporcionados en la literatura científica¹¹⁶.

En general, la velocidad del viento es mucho menor en el terreno urbano, donde su régimen de flujo es fundamentalmente turbulento como consecuencia de los cambios de dirección que se producen^{117,118}.

El comportamiento de la velocidad del viento varía en función de la cercanía al terreno. Con una altura inferior a los 10,0 m es necesario aplicar la siguiente ecuación¹¹⁹ (Tabla 1.1):

$$\frac{v}{v_r} = c \cdot H^a$$

1.1

Ecuación 1.1. Velocidad efectiva del viento

Donde:

- **H** = es la altura del edificio (m)
- **c** = Parámetro relativo a la velocidad del viento, el terreno
- **a** = Parámetro relativo a la velocidad del viento y la altura sobre el suelo

Tabla 1.1. Factores del Terreno

Parámetros	c	a
Campo llano y abierto	0,68	0,17
Campo con cortavientos dispersos	0,52	0,20
Urbano	0,35	0,25
Ciudad	0,21	0,33

Los valores climáticos que determinan las posibilidades de ventilación natural de los edificios ubicados en la Ciudad de Móstoles son los siguientes¹²⁰ (Tabla 1.2 y 1.3):

¹¹⁶ Ballesteros-Álvarez, J. M, Romero-Barriuso, Á., Villena-Escribano, B. M., Rodríguez-Sáiz, Á., González-Gaya, C, (2024) Investigating the effectiveness of a new indoor ventilation model in reducing the spread of disease: A case of sports centres amid the COVID-19 pandemic. *Heliyon*, 10(6) (2024). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27877>

¹¹⁷ Asfour, O. (2006) Ventilation Characteristics of Buildings Incorporating Different Configurations of Curved Roofs and Wind Catchers. School of the Built Environment Institute of Architecture, University of Nottingham. Nottingham, United Kingdom. https://eprints.nottingham.ac.uk/56210/1/PHD_Omar%20Asfour.pdf

¹¹⁸ Moore, F. (1993) Environmental control systems: heating cooling lighting. McGraw-Hill, Inc. New York, United States.

¹¹⁹ CIBSE (1998) Energy efficiency in buildings. London. The Chartered Institution of Building Services Engineers.

¹²⁰ Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Gobierno de España. Madrid, España. <https://www.aemet.es/es/portada>

Tabla 2.2. Datos Climáticos de la Ciudad de Móstoles, año 2023 (enero-junio)

Valores Promedio	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Temperatura (°C)	5	6	10	12	16	22
Velocidad del Viento (m/s)	3,4	3,7	3,7	3,8	3,7	3,4

Tabla 3.3. Datos Climáticos de la Ciudad de Móstoles, año 2023 (Julio-diciembre)

Valores Promedio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura (°C)	25	25	20	14	9	5
Velocidad del Viento (m/s)	3,3	3,3	3,2	3,2	3,4	3,4

Por lo tanto, la menor velocidad media del viento a dos metros de altura durante el año 2023 en la ciudad de Móstoles se situó entre 0,84 y 1,33 m/s.

Para evitar la utilización de valores estadísticos, se recurre a velocidades de aire normalizadas utilizadas en la determinación de Áreas Peligrosas por Riesgo de Incendio y Explosión. Se establece la velocidad del aire en función del comportamiento del gas objeto de estudio y de la altura del punto de ventilación: El dióxido de carbono es 1,5 veces más pesado que el aire, por lo que tiende a moverse hacia abajo donde la ventilación es menor, por lo que la velocidad de la ventilación efectiva también es menor¹²¹ (Tabla 1.4).

Tabla 4.4. Velocidades de Aire en Exteriores: Dilución Efectiva de los Gases en la Atmósfera

Emplazamiento sin Obstáculos			Empalamiento con Obstáculos		
≤ 2 m	>2 m hasta 5 m	> 5 m	≤ 2 m	>2 m hasta 5 m	> 5 m
0,5 m/s	1 m/s	2 m/s	0,5 m/s	0,5 m/s	1 m/s
Gases más Pesados que el Aire					
0,3 m/s	0,6 m/s	1 m/s	0,15 m/s	0,3 m/s	1 m/s

1.5.2 Densidad de ocupación y ventilación natural

En ambientes interiores se diseña los sistemas de ventilación y climatización, a partir de valores normativos de referencia. No obstante, durante la crisis sanitaria del COVID-19 se puso de manifiesto la necesidad de disponer también de referencias relacionadas con el riesgo de transmisión de enfermedades a través del aire. En este sentido, aparece la Metodología *Steady State* CO₂, publicada por la Universidad de Harvard¹²², que toma el Centro Superior de

¹²¹ EN 60079-10-1:2022 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

¹²² Allen, J. Spengler, J., Jones, E., Cedeno-Laurent, J. (2020) How School Buildings Influence Student Health. Thinking and Performance. Harvard T.H. Chan Healthy Buildings Program. Cambridge, United States. <https://schools.forhealth.org/>

Investigaciones Científicas (CSIC) como referencia para elaborar la Guía para la Ventilación de las Aulas¹²³, con el objetivo de reducir el riesgo de contagio por la COVID-19 en centros de enseñanza. En ambas publicaciones se recomienda aumentar al doble la ventilación por persona establecida en la Directriz ASHRAE 62.1¹²⁴, pasando de 7,0 l/s por persona a 14,0 l/s por persona, incorporando la necesidad de disponer de cinco renovaciones de aire en los recintos ocupados por personas para evitar su transmisión. Aunque estudios recientes las rebajan a tres renovaciones a la hora, en ningún caso se tiene en cuenta la infectividad del virus, por lo que no fue posible adaptarla a las variantes del SARS-CoV-2 que fueron surgiendo.

El objetivo es determinar la densidad de ocupación que permite la ventilación natural, comparándola con el caudal de aire limpio requerido por cada asistente, de forma que se asegure una calidad de aire similar a la Categoría IDA2 para interiores¹²⁵. Además, para situaciones de riesgo se proponen cuatro niveles adicionales de seguridad, uno de ellos basado en la ventilación requerida para evitar la transmisión del SARS-CoV-2 a través de la metodología *Steady State* CO₂, de la Universidad de Harvard¹²⁶.

1.5.3 Análisis de la importancia de la ventilación en los edificios municipales del Ayuntamiento de Móstoles

Una ventilación adecuada garantiza una reducción del tiempo de persistencia de la atmósfera gaseosa de un recinto y, por ende, la concentración de posibles patógenos presentes en ella. Por ello, la determinación de este parámetro es un buen indicador para poder estimar el grado de ocupación en el interior de los edificios.

La ocupación media de cada recinto se ha estimado de diferentes formas. Por una parte, la Concejalía de Deportes elabora estadísticas de asistencia en todas las actividades deportivas que oferta el Ayuntamiento de Móstoles. Por otra, los centros de acceso al público disponen de aforos máximos adaptados a la nueva realidad condicionada por la aparición del COVID-19, de forma que los

¹²³ Ministerio de Ciencia e Innovación (2020) Centro Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua, IDAEA-CSIC. Guía para la Ventilación en Aulas. Gobierno de España. Madrid, España. <https://goo.su/M9z4e>

¹²⁴ Standard ASHRAE 62.1 (2019). Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. The American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. . American National Standards Institute. <https://spain-ashrae.org/directriz-ashrae-62-1-2019/>

¹²⁵ Ministerio de la Presidencia (2021) Real Decreto 178/2001 de Modificación del Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE). Gobierno de España. Madrid, España. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2021/03/23/178/dof/spa/pdf>

¹²⁶ Allen, J. Spengler, J., Jones, E., Cedeno-Laurent, J. (2020) How School Buildings Influence Student Health. Thinking and Performance. Harvard T.H. Chan Healthy Buildings Program. Cambridge, United States. <https://schools.forhealth.org/>

CAPÍTULO 1

trabajadores municipales pueden combinar el teletrabajo con el trabajo presencial, para que los aforos sean adecuados a la ventilación disponible en cada recinto.

Los datos de superficie y el caudal de ventilación de los edificios han sido facilitados por la propia administración pública.

En todos los casos analizados, con excepción de la Biblioteca Central Almudena Grandes, la posibilidad de ventilación natural se reduce a las ventanas practicables disponibles, por lo que la distancia vertical entre los puntos medidos de las aberturas superior e inferior es muy pequeña en comparación con su distancia horizontal. Como consecuencia, esta situación la ventilación inducida por flotabilidad se reduce y deja de ser significativa.

El edificio de la biblioteca se desarrolla verticalmente en seis plantas y cuenta con un patio central cubierto que discurre desde planta primera a cuarta, donde se emplaza una escalera central, aportado iluminación natural y albergando los exutorios. Esta configuración arquitectónica, además de ser un sistema de control de temperatura y evacuación de humos en caso de incendio, pueden ser utilizada para facilitar la ventilación diaria del edificio¹²⁷.

El estudio muestra las diferentes posibilidades de ventilación natural que se pueden implementar a través del análisis de un edificio singular que permite el movimiento de aire ascendente, como es la Biblioteca Central Almudena Grandes, y las capacidades máximas que se pueden obtener en los centros municipales del Ayuntamiento de Móstoles, comparándolas con los aforos para los que fueron diseñados.

1.6 APORTACIONES DEL MÉTODO *STEADY STATE*

Para conseguir el objetivo de determinar la ventilación óptima de un recinto ocupado, se debe estimar el flujo de aire exterior entrante mediante el uso de un medidor de CO₂. Para ello, los valores de ventilación se basan en la densidad de ocupación estimada en la Directriz ASHRAE 62.1¹²⁸, la cual establece una ocupación aproximada de 25 personas por cada 100 m². Se recomienda aumentar al doble la ventilación por persona establecido en dicha directriz, es decir, aumentar en 7,0 l/s por persona, estableciendo el límite en 14,0 l/s persona. No obstante, la guía considera como referencia para el estudio el

¹²⁷ EN 12101-2:2021 Smoke and heat control systems - Part 2: Natural smoke and heat exhaust ventilators, European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

¹²⁸ Standard ASHRAE 62.1 (2019). Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. The American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. American National Standards Institute. <https://spain-ashrae.org/directriz-ashrae-62-1-2019/>

parámetro *Air Changes per Hour* (ACH por sus siglas en inglés), es decir, una forma de medir la renovación del aire en un volumen dado por unidad de tiempo. El método implica configurar el medidor de CO₂ para registrar medidas de, al menos, una vez por minuto, y medir la concentración de CO₂ al aire libre con el sensor durante, al menos, cinco minutos. Se estima la Tasa de Generación de CO₂ multiplicando el número de ocupantes por su Tasa de Exhalación de CO₂. La Tasa de Generación de CO₂ por persona dependerá de valores como la edad, el sexo, el peso o la actividad metabólica^{129,130,131}.

Finalmente, se estima el flujo objetivo de aire exterior, el cual se multiplica por el volumen del recinto y por las renovaciones de aire objetivo. El propio método establece que, una vez realizado el cálculo, se puede usar el monitor de CO₂ durante la ocupación del recinto para evaluar si la ventilación es adecuada.

Como se ha indicado anteriormente, para la aplicación numérica del método *Steady State* CO₂, se establece un caudal de aire exterior (Q) por persona, expresado en l/s/persona, como otra forma de medir la ventilación. Para reducir el riesgo de contagio, recomienda un caudal Q_{objetivo} = 14,0 l/s/persona. Este caudal es igual a 50,0 m³/hora/persona, que coincide con lo indicado en el RD 486/1997¹³² como la renovación necesaria para lugares de trabajo contaminados. A partir del Q_{objetivo} y el volumen del recinto, se puede obtener el ACH objetivo:

$$ACH_{objetivo} = \frac{Q_{objetivo}}{V} \cdot 3,6 \quad 1.2$$

Ecuación 2.2. Renovaciones de aire objetivo necesario para reducir el riesgo de contagio

Donde:

- **ACH_{objetivo}** = Renovaciones de aire objetivo necesario para reducir el riesgo de contagio (h⁻¹)
- **Q_{objetivo}** = Caudal de aire exterior objetivo necesario para reducir el riesgo de contagio (l/s por persona)
- **V** = Volumen del recinto (m³)

¹²⁹ Allen, J., Spengler, J., Jones, E., Cedeno-Laurent, J. (2020) How School Buildings Influence Student Health. Thinking and Performance. Harvard T.H. Chan Healthy Buildings Program. Cambridge, United States. <https://schools.forhealth.org/>

¹³⁰ Allen, J., Macomber, D. (2022). Healthy Buildings. How Indoor Spaces Can Make You Sick or Keep You Well. Harvard University Press.

¹³¹ Ministerio de Ciencia e Innovación (2020) Centro Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua, IDAEA-CSIC. Guía para la Ventilación en Aulas. Gobierno de España. Madrid, España. <https://goo.su/M9z4e>

¹³² Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales (1997) 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. Gobierno de España. Madrid, España. <https://www.boe.es/eli/es/rd/1997/04/14/486/con>

CAPÍTULO 1

Se estima la generación de CO₂ de los ocupantes del recinto a partir de la Tasa de Exhalación¹³³, utilizando la siguiente ecuación:

$$qCO_2 = N \cdot \text{Tasa de Exhalación por ocupante} \cdot 60 \quad 1.3$$

Ecuación 1.3. Cantidad de CO₂ generada por los ocupantes de la estancia

Donde:

- **qCO₂** = Cantidad de CO₂ generada por los ocupantes de la estancia (l/min)
- **N** = Número de ocupantes

A continuación, se determina *C estado estable*, que es la concentración de CO₂ en un recinto ocupado por un número de ocupantes dado, por debajo de la que se asegura que se alcanzan las renovaciones o caudal de aire exterior necesario para reducir el riesgo de contagio. El Método *Steady State CO₂*¹³⁴ propone para su cálculo la siguiente ecuación:

$$C_{estable} = \frac{qCO_2 + (Q_{objetivo} \cdot |CO_2|_{exterior} \cdot 10^{-6})}{Q_{objetivo} \cdot 10^{-6}} \quad 1.4$$

Ecuación 1.4. Concentración de CO₂ en estado estable en un recinto ocupado

Donde:

- **C estable** = Concentración de CO₂ en estado estable en un recinto ocupado (ppm)
- **Q_{objetivo}** = Caudal de aire exterior objetivo necesario para reducir el riesgo de contagio (l/s por persona)
- **|CO₂|_{exterior}** = Concentración de CO₂ en un recinto ocupado (ppm)

En cuanto a la medición de CO₂ en el exterior, ésta se realiza de forma previa al resto de las mediciones y posteriormente a las mismas, considerando la media de los registros realizados. El propio método establece que, en caso de que no fuera posible realizar la medición exterior, se tomará el valor de 420 ppm. Posteriormente, se compara la concentración de CO₂ en estado estable estimado, con la medición de CO₂ en condiciones estables del interior, de forma que:

Si $C_{estado\ estable} > [CO_2]_{interior} \Rightarrow$ ventilación suficiente para reducir el riesgo de contagio

Si $C_{estado\ estable} < [CO_2]_{interior} \Rightarrow$ ventilación insuficiente para reducir el riesgo de contagio

¹³³ Persily, A. (2017) Carbon dioxide generation rates for building occupants. *Indoor Air*, 27(5) (2017) 868–879. <https://doi.org/10.1111/ina.12383>

¹³⁴ Allen, J. Spengler, J., Jones, E., Cedeno-Laurent, J. (2020) How School Buildings Influence Student Health. Thinking and Performance. Harvard T.H. Chan Healthy Buildings Program. Cambridge, United States. <https://schools.forhealth.org/>

Esta guía también establece como parámetro las renovaciones de aire del recinto considerado, estableciendo los siguientes niveles (Tabla 1.5).

Tabla 5.5. Número de Renovaciones Requeridas según Método Steady State CO₂¹³⁵

Nivel	Nº de Renovaciones C (h-1)
Mínimo	≤3
Bajo	3-4
Bueno	4-5
Excelente	5-6
Ideal	≥6

La metodología que se presenta en esta investigación establece como objetivo las cinco (5) renovaciones por hora.

1.7 LA NORMATIVA UNE APLICADA A LOS ESPACIOS INTERIORES

Los valores de ventilación considerados por el método *Steady State* CO₂, propuesto por la Universidad de Harvard, se establecen de forma previa a la aparición de las nuevas cepas. Si estas se confirman por el aumento de la capacidad de infección en un 70,0 %, es obvio que la ocupación debe corresponder al 25,0 % del límite establecido en la Metodología de Ventilación de Centros Municipales para la Prevención de la Propagación del SARS-CoV-2.

En consecuencia, se proponen unos valores de referencia basados en la aplicación de las Normas UNE-EN. Por comparación con los caudales volumétricos de aire de ventilación disponibles, se obtiene la ocupación estimada en el interior de un recinto, en función de la actividad desarrollada.

Se utiliza la Norma UNE EN 8996:21¹³⁶ como base de aplicación para determinar el valor del volumen de dióxido de carbono exhalado por una persona. Además, permite considerar las características y actividades que estén desarrollando los individuos. Los valores de ventilación obtenidos se comparan

¹³⁵ Allen, J. Spengler, J., Jones, E., Cedeno-Laurent, J. (2020) How School Buildings Influence Student Health. Thinking and Performance. Harvard T.H. Chan Healthy Buildings Program. Cambridge, United States. <https://schools.forhealth.org/>

¹³⁶ EN 8996:2021 Ergonomics of the thermal environment - Determination of metabolic rate. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

con los valores establecidos, tanto en la UNE-EN 16798-3:18¹³⁷ como en el Real Decreto 486/97¹³⁸.

1.8 NORMATIVA UNE DE ATMÓSFERAS EXPLOSIVAS

La aportación de ventilación natural a un recinto, así como el estudio de las situaciones al aire libre, se realiza con las Normas UNE que recurran las atmósferas explosivas, mediante la aplicación de los apartados correspondientes a cálculo de ventilación. Estas normas también permiten determinar la velocidad de viento en situaciones de exposición al aire libre, en función de la situación del emplazamiento y de la densidad relativa del gas.

La normativa legal que regula los riesgos derivados de la presencia de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo es el Real Decreto 681/2003, de 12 de junio, trasposición de la Directiva 99/92/CE¹³⁹. No obstante, para poder establecer la clasificación de Zonas por Riesgo de Incendio y Explosión, hay que recurrir a normas UNE, en concreto a la normativa de gases recogida en la Norma UNE-EN- 60079-10-1. Atmósferas explosivas. Clasificación de emplazamientos para atmósferas explosivas gaseosas¹⁴⁰.

La versión en vigor es la UNE-EN IEC 60079-10-1:2022, la cual anula y sustituye a la versión del año 2016. Con anterioridad, ha habido otras cuatro versiones de esta norma, referidas a los años 2010, 2004, 1997 y 1986. Es importante señalar que principal cambio producido entre la versión del año 2010 y de la del 2016 es que la normativa más reciente opta por una resolución gráfica, frene a la numérica de las primeras ediciones. Además, mientras que la versión del año 2010 se ajustaba mejor a zonas peligrosas pequeñas, a partir de la versión del año 2016 se posibilita la clasificación por riesgo de incendio y explosión de áreas de mayor envergadura. No obstante, con la nueva normativa, ya no es posible determinar zonas peligrosas inferiores a un metro.

¹³⁷ EN 16798-3:2018 Eficiencia energética de los edificios. Ventilación de los edificios. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

¹³⁸ Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales (1997) 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. Gobierno de España. Madrid, España. <https://www.boe.es/eli/es/rd/1997/04/14/486/con>

¹³⁹ Ministerio de la Presidencia (2003) Real Decreto 681/2003, de 12 de junio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo. Gobierno de España. Madrid, España. <https://www.boe.es/buscar/pdf/2003/BOE-A-2003-12099-consolidado.pdf>

¹⁴⁰ EN 60079-10-1:2022 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

El principal cambio que afecta a la investigación desarrollada en esta Tesis Doctoral es la posibilidad de disponer de velocidades de aire estandarizadas en ambientes exteriores en función de la altura.

1.9 DESCRIPCIÓN DE LAS UBICACIONES OBJETO DE ESTUDIO

Las zonas que han sido objeto de análisis se localizan en el Municipio de Móstoles, siendo todos los recintos y edificios de propiedad municipal (Figura 1.1 a 1.4).



Figura 1. Comunidad de Madrid-España

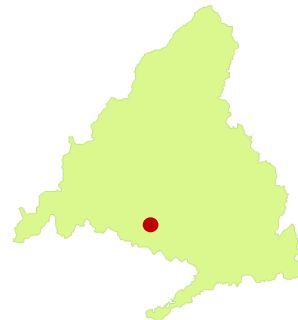


Figura 2. Municipio de Móstoles-Madrid

Los edificios municipales del Ayuntamiento de Móstoles que tienen posibilidad de ventilación natural, independientemente de los sistemas de climatización que tengan instalados, son los siguientes: La Casa Consistorial, Centro de Participación Ciudadana o Junta I, Junta 4 Oeste, Conservatorio Rodolfo Halffter, Centro Sociocultural Caleidoscopio, Centro Sociocultural El Soto, Centro Sociocultural Villa de Móstoles, Centro Social Ramón Rubial, Espacio Joven Ribera, Servicios Generales y Biblioteca Central Almudena Grandes.

La Casa Consistorial es un edificio de forma irregular de ocho plantas de altura. Los forman cuatro plantas en las que se ubican las dependencias del Ayuntamiento, de la Policía Municipal y actividades de oficina. Lo completan destinadas a oficinas una planta baja de recepción y tres sótanos. Dispone de una zona de atención al público y espacios destinados a usos secundarios de garaje-aparcamiento, espectáculos y reunión, además de las instalaciones auxiliares inherentes al funcionamiento del propio edificio. Cuenta con una superficie construida de 8423,02 m² y la altura a la que se localiza la cuarta planta es de 14,53 m.

El Centro de Participación Ciudadana o Junta I ocupa la totalidad de un edificio medianero en una de sus fachadas, y se asienta en un solar de forma irregular de 345 m² de superficie. El edificio cuenta con seis plantas, una de ellas bajo rasante, destinadas a despachos. También cuenta con una Sala de Reunión, Salón de Actos

CAPÍTULO 1

y una Sala de Ensayos. La superficie construida total del Centro es de 2.002,22 m² y la cuanta planta alcanza una cota de 12,80 m.

El Conservatorio Rodolfo Halffter es un edificio docente situado en un solar de 1.152 m², de forma trapezoidal, que se desarrolla verticalmente en cinco plantas sobre rasante y una planta de sótano. La configuración interior del edificio consiste en dos zonas bien diferenciadas, por una parte, el vestíbulo distribuidor de forma triangular que se reproduce en cada una de las plantas del edificio y que se ha concebido en sección en un gran espacio iluminado cenitalmente donde se ubican la escalera de comunicación vertical y los ascensores. Por otra, el Área Docente ocupada por el resto del edificio y que se organiza funcionalmente en dos crujías de aulas comunicadas mediante un eje central con vacío, que comunica visualmente todas las plantas, cubiertas con un lucernario. La superficie construida total del Centro es de 5.332,96 m² y la planta cuarta se sitúa a 16,50 m. de altura.

Los Centros Socioculturales Caleidoscopio, El Soto y Villa de Móstoles son idénticos en cuanto a patrón constructivo. Están destinados a la celebración de actividades culturales tales como cursos, talleres y representaciones teatrales. Dispone de una zona para exposiciones y cuenta con biblioteca y ludoteca, además de las correspondientes oficinas de gestión. El edificio tiene en planta una superficie de 2.000,0 m² cuenta con un semisótano y dos plantas sobre rasante.

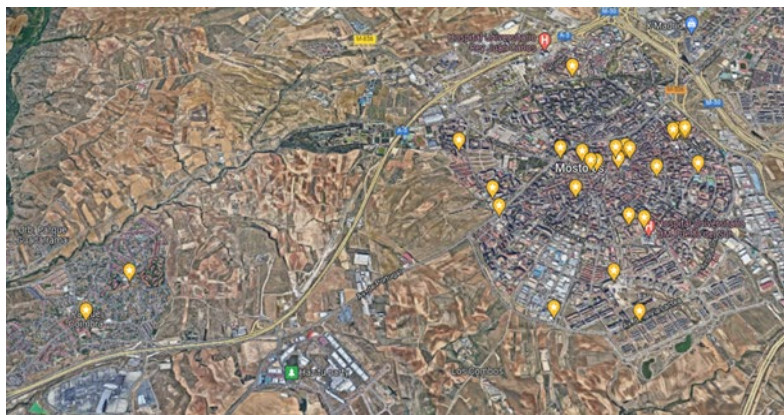


Figura 3. Ubicación de los Centros Municipales objeto de estudio

El Espacio Joven Ribera está dedicado a la atención de adolescentes. Se emplaza en un complejo de viviendas y dispone de 1113,71 m² distribuidos en dos plantas: planta baja y planta semisótano. El edificio de Servicios Generales ocupa las instalaciones de una antigua fábrica, reformadas y ampliadas de manera que el edificio queda constituido por dos volúmenes comunicados interiormente, distinguiendo el Módulo de Oficinas y el Módulo de Almacén. El Módulo de Oficinas constituye el frente del edificio y cuenta con una sola planta

de forma rectangular. Por el contrario, el Módulo de Almacén dispone de dos plantas sobre rasante, de forma rectangular, al que se han unido una serie de recintos independientes. La superficie total construida es de 2.495,0 m².

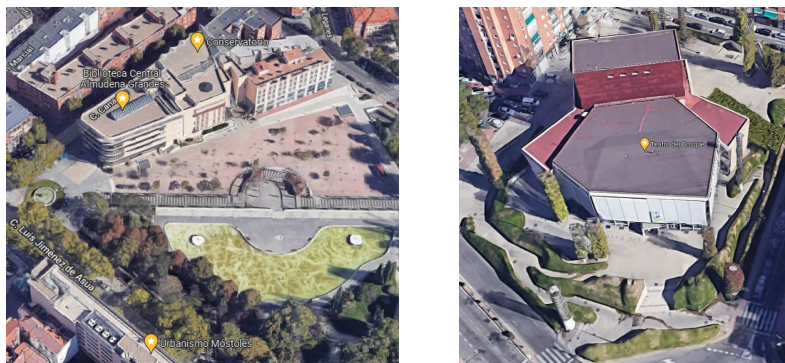


Figura 4. Detalle del Conservatorio, Biblioteca Central y Teatro El Bosque

La Biblioteca Central Almudena Grandes alberga la Biblioteca Municipal de Móstoles y dispone de salas de uso público, como son las Salas de Préstamo, Sala de Lectura y Salón de Actos. El edificio ocupa una superficie trapezoidal de 793,45 m² y se desarrolla verticalmente en seis plantas: un sótano, baja y primera a cuarta. Se caracteriza por disponer de un patio central cubierto que discurre desde planta primera a cuarta, donde se emplaza una escalera central que sirve de acceso a las plantas primera y segunda. En su conjunto, cuenta con una superficie construida de 4.372,51 m², situándose la última planta a 16,0 m. de altura (Figura 1.5 a 1.7).



Figura 5. Edificio Biblioteca Central Almudena Grandes

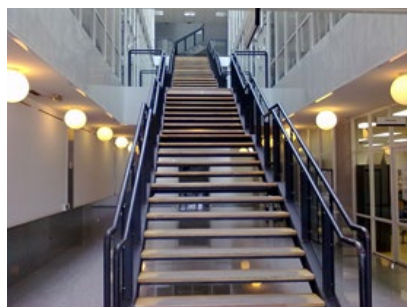


Figura 66. Patio Central. Biblioteca Central Almudena Grandes

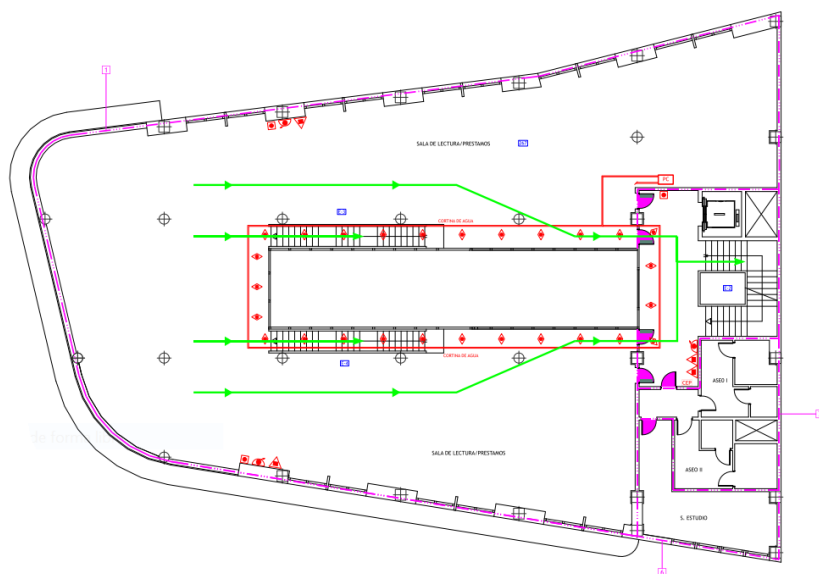


Figura 7. Planta tercera. Biblioteca Central Almudena Grandes

El análisis de posibilidad de transmisión de enfermedades al aire libre se orienta a la celebración de eventos multitudinarios durante las Fiestas Patronales de Móstoles en 2022, analizando tanto actividades callejeras como en la Plaza de Toros, edificio abierto con graderíos en altura (Figura 1.8).

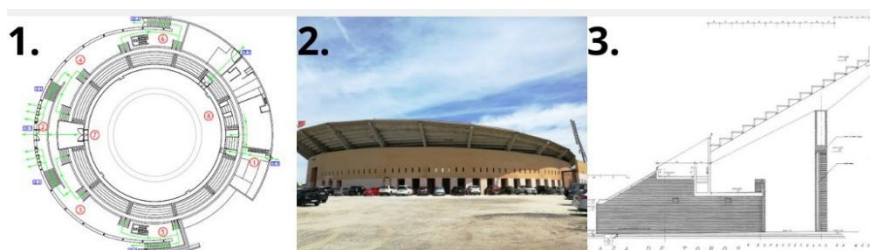


Figura 8. (1) Plano de Evacuación del Graderío. (2) Vista Exterior Edificio. (3) Sección Tribuna

El graderío de la Plaza de Toros de Móstoles tiene aforo para 5000 personas, parte de una cota de 2,0 metros y culmina a 12,0 metros de altura. La zona de asientos es escalonada, con una altura de 50,0 cm.

1.10 CONSIDERACIONES FINALES

A pesar de que a día de hoy el virus SARS-CoV-2 sigue circulando por el mundo y causando nuevas muertes, no se dispone de una herramienta que permita determinar los aforos, de forma que reduzca su transmisión a través del aire, y mucho menos durante las aglomeraciones en conciertos y Fiestas Patronales que tienen lugar en ambientes exteriores. Tampoco se ha llegado a conocer la

concentración en aire del virus susceptible de generar la transmisión de la enfermedad.

Dar respuesta a ambos aspectos, de forma que permita paliar la próxima crisis sanitaria, es la base de la presente Tesis Doctoral.

El método de cálculo teórico de ocupación para la prevención de la propagación del SARS-CoV-2, ha sido puesto en práctica en dependencias municipales del Ayuntamiento de Móstoles, para lo cual se realizaron visitas periódicas a los distintos centros de trabajo, se elaboraron informes específicos por cada centro de trabajo y se analizaron los casos de contagio sufridos por los trabajadores municipales. De esta forma, se pudo determinar la ocupación real de los recintos y establecer la ventilación adecuada, uno de los retos de esta investigación. Por otra parte, se han podido también distinguir las bajas sufridas por los trabajadores municipales por COVID-19 durante el periodo de estudio producidas durante la jornada laboral de las producidas como consecuencia de las condiciones de ventilación de los edificios.

1.11 ESTRUCTURA DE LA TESIS

La presente Tesis Doctoral se articula en torno a diez capítulos, elaborados a partir de tres artículos publicados en revistas científicas de reconocido prestigio, en las que se determinan los valores de caudal requerido en función del nivel de seguridad optado, considerando la ventilación artificial¹⁴¹, su aplicación en edificios que cuentan con ventilación natural¹⁴² y a eventos multitudinarios organizados en el exterior¹⁴³, tal y como se resume a continuación:

- **Capítulo 01 - Introducción:** en el primer capítulo se presenta el contexto y la justificación de la investigación y se define la estructura de la Tesis Doctoral.
- **Capítulo 02 - Estado del Arte:** este capítulo revisa el marco legal en el que se contextualiza la Tesis Doctoral.

¹⁴¹ Ballesteros-Álvarez, J. M., Romero-Barriuso, Á., Villena-Escribano, B. M., Rodríguez-Sáiz, Á., González-Gaya, C. (2024) Investigating the effectiveness of a new indoor ventilation model in reducing the spread of disease: A case of sports centres amid the COVID-19 pandemic. *Heliyon*, 10(6) (2024). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27877>

¹⁴² Ballesteros-Álvarez, J. M., Romero-Barriuso, Á., Villena-Escribano, B. M., Rodríguez-Sáiz, Á., González-Gaya, C. (2025). Enhancing Indoor Air Quality Through Natural Ventilation: Insights from Municipal Building in Mostoles, Spain. (2025). *Dyna*. 254-2833. <https://www.revistadyna.com/articulos>

¹⁴³ Romero-Barriuso, Á., Ballesteros-Álvarez, J. M., Villena-Escribano, B. M., Rodríguez-Sáiz, Á., González-Gaya, C. (2025). Occupancy and Air Quality Model for Outdoor Events: A Strategy for Preventing Disease Transmission at Mass Events. *Buildings*, 15(5), 677. <https://doi.org/10.3390/buildings15050677>

- **Capítulo 03 - Objetivos:** en este capítulo se definen los objetivos generales y específicos de la investigación, que se centran desarrollar una herramienta efectiva para el control de las enfermedades transmitidas a través del aire mediante el control de los aforos.
- **Capítulo 04 - Metodología:** en el cuarto capítulo describen las fases del estudio y una estrategia que está basada en la determinación de valores límite ambientales de CO₂, mediante la imposición de caudales de ventilación en función del nivel de seguridad requerido.

El método desarrollado se valida el mediante su aplicación práctica en el Ayuntamiento de Móstoles durante la época de pandemia para ambientes interiores de instalaciones municipales, tanto para centros dotados con ventilación artificial como los ventilados de forma natural (mediante apertura de ventanas), y en la época postpandemia en exteriores durante las fiestas patronales del municipio.

- **Capítulo 05 – Resultados en ambientes interiores:** este capítulo muestra los resultados obtenidos en ambientes interiores tanto en edificios “inteligentes” dotados únicamente de ventilación artificial, edificios que, además de disponer de ventilación artificial, cuentan con ventanas practicables, y edificios en los que su ventilación depende únicamente de la apertura de ventanas. Finalmente, se evalúa la mejora en la ventilación que permite la incorporación de la apertura de los exutorios: ventilación por flotabilidad.
- **Capítulo 06 – Resultados en ambientes exteriores:** este capítulo muestra los resultados obtenidos en ambientes exteriores durante la celebración de las Fiestas Patronales del Municipio de Móstoles en septiembre del 2022, a través del análisis a nivel de calle durante las aglomeraciones producidas en diferentes eventos, así como durante los festejos taurinos que tuvieron lugar en la Plaza de Toros.
- **Capítulo 07 – Discusión de los resultados:** El análisis de los resultados se realiza a partir de las bajas laborales del personal municipal del Municipio de Móstoles motivadas por SARS-CoV-2. Como premisa se establece que la transmisión no se considera producida en el ámbito laboral, si la carencia temporal entre trabajadores que comparten centro de trabajo es superior a las cuarentenas implantadas para evitar la transmisión del virus, de forma que la infección no se ha debido a las condiciones de ventilación del edificio.

Finalmente, a través del concepto de “*Concentración de Fondo*” se establece la concentración necesaria de aire exhalado para que se produzca la infección por SARS-CoV-2.

- **Capítulo 08 - Conclusiones:** Este capítulo resume las principales conclusiones de la investigación, destacando que la herramienta desarrollada permite determinar los aforos tanto en interior con ventilación artificial o natural, como en eventos multitudinarios celebrados al aire libre, de forma que se puedan garantizar las condiciones de salubridad y la seguridad sanitaria de las personas, en función de la actividad física prevista.
- **Capítulo 09 - Futuras líneas de investigación:** Este capítulo propone algunas ideas para continuar y ampliar la investigación realizada, en aras de mejorar su implementación.
- **Capítulo 10 - Referencias bibliográficas:** En este capítulo se muestra el listado de todas las referencias bibliográficas citadas en la Tesis Doctoral a pie de página.



2

Capítulo

ESTADO DEL ARTE

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

Tomando como referencia la normativa internacional en campos del conocimiento tan diversos como la Ergonomía y Psicología en el Trabajo o las instalaciones eléctricas y climatización, el objetivo de la Tesis Doctoral es el desarrollo de un Método de Cálculo Teórico de Ocupación para la prevención de la propagación del SARS-CoV-2, estableciendo como parámetros de validación los valores implementados en la metodología *Steady State CO₂*, desarrollada por la Universidad de Harvard¹⁴⁴. Además, a partir del concepto de la concentración de fondo implícito en las normas internacionales de Atmósferas Explosivas, se ha determinado la concentración en aire del SARS-CoV-2 para que la transmisión del COVID-19 sea efectiva¹⁴⁵.

2.1 MARCO LEGAL

El Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE)¹⁴⁶ y el Código Técnico de la Edificación (CTE)¹⁴⁷ constituyen el marco legal que regula las condiciones de ventilación de los edificios. Además, en los entornos laborales es de aplicación el 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*¹⁴⁸.

Durante la época de pandemia no se promulgó ninguna normativa legal que modificara las condiciones de ventilación en los recintos confinados, y tan solo se hacía referencia a las recomendaciones publicadas por el Centro Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) en su Guía para la Ventilación de las Aulas¹⁴⁹ en

¹⁴⁴ Allen, J., Spengler, J., Jones, E., Cedeno-Laurent, J. (2020) How School Buildings Influence Student Health. Thinking and Performance. Harvard T.H. Chan Healthy Buildings Program. Cambridge, United States. <https://schools.forhealth.org/>

¹⁴⁵ Ballesteros-Álvarez, J. M., A. Romero-Barriuso, A., Villena-Escribano, B. M., Rodríguez-Saiz, Á., González-Gaya, C. (2024) Investigating the effectiveness of a new indoor ventilation model in reducing the spread of disease: A case of sports centres amid the COVID-19 pandemic. *Heliyon*, 10(6) (2024). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27877>

¹⁴⁶ Ministerio de la Presidencia (2021) Real Decreto 178/2001 de Modificación del Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE). Gobierno de España. Madrid, España. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2021/03/23/178/dof/spa/pdf>

¹⁴⁷ Ministerio de Vivienda (2006) Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. Gobierno de España. Madrid, España. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2006/03/17/314>

¹⁴⁸ Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales (1997) 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. Gobierno de España. Madrid, España. <https://www.boe.es/eli/es/rd/1997/04/14/486/con>

¹⁴⁹ Ministerio de Ciencia e Innovación (2020) Centro Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua, IDAEA-CSIC. Guía para la Ventilación en Aulas. Gobierno de España. Madrid, España. <https://goo.su/M9z4e>

CAPÍTULO 2

centros de enseñanza, que tomaba como referencia la metodología *Steady State CO₂*, elaborada por la Universidad de Harvard ¹⁵⁰.

Las condiciones mínimas de ventilación de obligado cumplimiento en recintos interiores se recogen en la Instrucción Técnica IT.1.1.4.2.1., Apartado 2 del Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE)¹⁵¹, legislación que regula las instalaciones destinadas a atender la demanda de bienestar térmico e higiene a través de equipos y sistemas de calefacción, de climatización y de agua caliente sanitaria.

El actual Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) fue aprobado mediante el Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio¹⁵². Sustituyó al reglamento del Real Decreto 1751/1998, de 31 de julio, transposición de la Directiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2002, relativa a la eficiencia energética de los edificios.

El RITE ha sido modificado parcialmente por el Real Decreto 1826/2009, de 27 de noviembre, el Real Decreto 249/2010, de 5 de marzo, la Ley 25/2009, de 22 de diciembre, el Real Decreto 238/2013, de 5 de abril y el Real Decreto 56/2016, de 12 de febrero, por el que se transpone la Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de octubre de 2012.

Por otra, el Código Técnico de la Edificación (CTE), aprobado mediante el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, en la sección DB HS3 “*Calidad del aire interior*”, también establece las características básicas de ventilación de aplicación a las edificaciones públicas y privadas, modificado, a su vez, por el Real Decreto 450/2022¹⁵³.

Desde su aprobación en el año 2006, el Código Técnico de la Edificación ha tenido múltiples modificaciones. Las referencias normativas que han introducido cambios y adaptaciones en el tiempo han sido: el Real Decreto 314/2006, del 28 de marzo, el Real Decreto 1371/2007, de 19 de octubre, el Real Decreto 1675/2008, de 17 de octubre, la Orden VIV/984/2009, de 15 de abril, el Real Decreto 173/2010, de 19 de febrero, el Real Decreto 410/2010, de 31 de marzo,

¹⁵⁰ Allen, J., Spengler, J., Jones, E., Cedeno-Laurent, J. (2020) How School Buildings Influence Student Health. Thinking and Performance. Harvard T.H. Chan Healthy Buildings Program. Cambridge, United States. 2020. <https://schools.forhealth.org/>

¹⁵¹ Ministerio de la Presidencia (2021) Real Decreto 178/2001 de Modificación del Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE). Gobierno de España. Madrid, España. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2021/03/23/178/dof/spa/pdf>

¹⁵² Ministerio de la Presidencia (2007) RITE-Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios. Gobierno de España. Madrid, España. <https://www.boe.es/buscar/pdf/2007/BOE-A-2007-15820-consolidado.pdf>

¹⁵³ Ministerio de Vivienda (2006) Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. Gobierno de España. Madrid, España. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2006/03/17/314>

La Ley 8/2013, de 26 de junio, la Orden FOM/1635/2013, de 10 de septiembre, el Real Decreto 732/2019, de 20 de diciembre y el Real Decreto 450/2022, de 14 de junio.

En el caso de los “Centros de Trabajo”, para la regulación de las condiciones ambientales se aplica el Anexo III “*Condiciones ambientales de los lugares de trabajo*” del Real Decreto 486/1997, de 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo¹⁵⁴. A su vez, en el año 2015, el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT) ha desarrollado la “*Guía Técnica para la Evaluación y Prevención de los Riesgos Relativos a la Utilización de los Lugares de Trabajo*”. Esta legislación emana de la Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales, normativa que protege la salud de los trabajadores frente a los riesgos derivados de las condiciones de trabajo¹⁵⁵.

2.2 NORMATIVA INTERNACIONAL

Las principales referencias legales de carácter internacional emanan de las Directivas Europeas, transpuestas al Ordenamiento Jurídico Interno de los Estados miembros de la Unión Europea. No obstante, la “*Guía para la Ventilación de las Aulas en Centros de Enseñanza*”¹⁵⁶, toma los valores de ventilación establecidos en la Metodología *Steady State* CO₂, que a su vez están basados en la densidad de ocupación estimada en el estándar americano ASHRAE 62.1-19 “*Ventilación para una Calidad Adecuada del Aire Interior*”, publicado en 2013 por *American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers*)¹⁵⁷.

2.3 NORMATIVA UNE

La normativa UNE es también una importante referencia en la regulación de las condiciones ambientales de los espacios confinados. Por ejemplo, la Norma UNE-EN 16798-3:2018, sobre eficiencia energética de aplicación a edificios no residenciales, donde se desarrollen procesos industriales¹⁵⁸, o la Norma UNE EN

¹⁵⁴ Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales (1997) 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. Gobierno de España. Madrid, España. <https://www.boe.es/eli/es/rd/1997/04/14/486/con>

¹⁵⁵ Jefatura del estado (1995) Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales. Gobierno de España. Madrid, España. <https://www.boe.es/eli/es/l/1995/11/08/31/con>

¹⁵⁶ Ministerio de Ciencia e Innovación (2020) Centro Superior de Investigaciones Científicas-(CSIC) Guía para la Ventilación en Aulas. Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua, IDAEA-CSIC. Gobierno de España. Madrid, España. <https://goo.su/M9z4e>

¹⁵⁷ Standard ASHRAE 62.1 (2019). Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. The American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. American National Standards Institute. <https://spain-ashrae.org/directriz-ashrae-62-1-2019/>

¹⁵⁸ EN 16798-3:2018 Eficiencia energética de los edificios. Ventilación de los edificios. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

CAPÍTULO 2

UNE 100011-91 *Climatización. La ventilación para una calidad aceptable de aire en la climatización de los locales*, anulada por la Norma UNE-EN 13779:2005 Ventilación de edificios no residenciales¹⁵⁹ y modificada por la UNE-EN 13779:2005 *Ventilación de edificios no residenciales. Requisitos de prestaciones de ventilación y acondicionamiento de recintos*¹⁶⁰. Ambas normas contemplan requisitos similares a la legislación vigente contenidos en el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE)¹⁶¹ y el Código Técnico de la Edificación (CTE)¹⁶².

Por otra parte, para la determinación de la producción de calor metabólico y para establecer la relación entre el volumen de oxígeno inhalado y el volumen de dióxido de carbono exhalado, en función de las características y actividad del individuo, se aplica la Norma UNE-EN ISO 8996:2021 *Ergonomía del ambiente térmico Determinación de la tasa metabólica*¹⁶³. Además, la Norma UNE-EN ISO 7730:2006: *Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local (ISO 7730:2005)*¹⁶⁴, permite establecer valores de referencia respecto a la concentración de dióxido de carbono, en función de las quejas y molestias de los individuos.

¹⁵⁹ EN 100011:1991 Air conditioning. ventilation for an acceptable quality of the air in air conditioning of rooms. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

¹⁶⁰ EN 13779:2005 Ventilación de edificios no residenciales. Requisitos de prestaciones de los sistemas de ventilación y acondicionamiento de recintos. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

¹⁶¹ Ministerio de la Presidencia (2021) Real Decreto 178/2001 de Modificación del Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE). Gobierno de España. Madrid, España.
<https://www.boe.es/eli/es/rd/2021/03/23/178/dof/spa/pdf>

¹⁶² Ministerio de Vivienda (2006) Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. Gobierno de España. Madrid, España.
<https://www.boe.es/eli/es/rd/2006/03/17/314>

¹⁶³ EN 8996:2021 Ergonomics of the thermal environment - Determination of metabolic rate. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

¹⁶⁴ EN ISO 7730:2006 Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local (ISO 7730:2005). European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

2.4 NORMATIVA ATEX

El origen de la actual normativa ATEX^{165,166,167} se remonta a principios del siglo pasado con los sistemas “*antideflagrantes*”, también conocidos como “*a prueba de fuego*” en el caso de la normativa inglesa (“*flameproof*”), o “*caja a prueba de fuego*” (“*druckfeste kapselung*”) para la normativa alemana. Actualmente este modo de protección se denomina “*d*”, que toma su nombre de la inicial alemana.

Con anterioridad, en el año 1906 ya se había fundado la Comisión Electrotécnica Internacional, organización destinada a la publicación de normas eléctricas, electrónicas y relacionadas con éstas (CEI o IEC). A esta organización pertenecen ochenta y un países, entre ellos España.

La Comisión Electrotécnica está formada por noventa y cinco Comités Internacionales y ochenta Subcomités. Entre ellos está el Comité TC 31, correspondiente a los equipos para atmosferas explosivas, el Subcomité SC 31G correspondiente al material de seguridad intrínseca, el Subcomité SC 31J destinado a la clasificación de áreas peligrosas y, por último, el Subcomité SC 31M para equipos no eléctricos y sistemas de protección para atmosferas explosivas.

España participa en 175 Comités y Subcomités, colabora con la ISO y la IEC, y está vinculada a la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU), al Comité Europeo para la Normalización Electrotécnica (CENELEC) y otras organizaciones que desarrollan normas, códigos y reglamentos sobre esta materia.

Muchas de las normas aprobadas por la IEC son mencionadas por el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (R.E.B.T.), por lo que, en consecuencia, es de obligado cumplimiento.

El IEC también establece los Procedimientos de Evaluación de la Conformidad incluidos en el Sistema ICES, que permiten el comercio internacional de equipos y servicios para uso en atmosferas explosivas. Las certificaciones incluyen tanto las personas como los equipos o empresas que intervienen, de forma similar al caso del personal competente al que hace referencia el R.E.B.T. en el Punto 4 de la Instrucción Técnica Complementaria ITC BT 029 para realizar la clasificación de zonas, el personal experimentado a que hace referencia la norma UNE-EN 60079-17 y el Real Decreto 681/2003, para las revisiones de las instalaciones o los

¹⁶⁵ Ministerio de Trabajo y Economía Social (2001) Instituto de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). Guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo. Gobierno de España. Madrid, España. <https://goo.su/knTQb>

¹⁶⁶ Laboratorio Oficial J.M. Madariaga (LOM) Breve Guía Sobre Productos e Instalaciones en Atmósferas Explosivas. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España. https://www.guemisa.com/articulos/Breve_guia_ATEX.pdf

¹⁶⁷ Normalización Española (2024). La normalización en el ámbito de las atmósferas explosivas (ATEX). Asociación Española de Normalización. Madrid, España. <https://goo.su/0qV80>

CAPÍTULO 2

establecimientos de reparación, a los que alude la norma UNE-EN 60079-19. El sistema consta de los siguientes certificados:

- El IECEx Certificado de Equipo.
- El IECEx Certificado de Instalaciones de Servicio.
- La marca de Conformidad IECEx.
- La Certificación de Competencias IECEx del Personal (COPC).

La norma ISO/IEC 17025, 65 guías y los documentos de orientación técnica ("*Operational Documents*") IECEx, se utilizan como parte del proceso de evaluación IECEx. Son los siguientes:

- IECEx.
- IECEx 01 General. Reglas de procedimiento.
- IECEx 02 Sistema de certificación de los equipos. Reglas de procedimiento.
- IECEx 03 Certificado de servicio de instalaciones. Reglas de procedimiento.
- IECEx 04 Marca de conformidad. Reglas de procedimiento.
- IECEx 05 Certificado de competencia personal. Reglas de procedimiento.
- En España, no existe ninguna organización acreditada el sistema ICES.

El Real Decreto 138/2022, de 21 de marzo, que derogó el Real Decreto 681/2003, *sobre protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmosferas explosivas en el lugar de trabajo*, trasposición de la Directiva 1999/92/CE, contempla una serie de obligaciones con objeto de prevenir las explosiones y de proteger de sus consecuencias siguiendo el siguiente orden de prioridades:

1. Impedir la formación de atmosferas explosivas.
2. Cuando la naturaleza de la actividad no lo permita, evitar la ignición de la atmosfera explosiva y atenuar los efectos perjudiciales de una explosión.

Además, se establece la obligación de elaborar y mantener actualizado un documento de protección contra las explosiones, elaborado conforme a las Normas UNE-EN 60079-10-1 *Atmosferas explosivas. Parte 10-1: Clasificación de emplazamientos. Atmosferas explosivas gaseosas*, Informe UNE 202007:2006 IN *Guía de aplicación de la norma UNE-EN60079-10. Material eléctrico para*

atmosferas de gas explosivas. Clasificación de emplazamientos peligrosos y la UNE-EN 60079-10-2 Atmosferas explosivas. Parte 10-2: Clasificación de emplazamientos. Atmósferas explosivas de polvo.

Se establecen tres tipos de zonas, tanto para la presencia de gases y vapores como para la concentración en el ambiente de polvo combustible, en función de la probabilidad de presencia de atmosfera explosiva, dependiendo del número de horas al año en la que está presente.

Los equipos se dividen en dos grandes grupos: actividades de minería y otro tipo de actividades diferentes a la actividad minera. Para estas últimas, se establecen a su vez tres categorías o niveles de seguridad, en función de la probabilidad de fallo del equipo. De esta forma, relacionando la probabilidad de presencia de atmosfera explosiva con la probabilidad de fallo del equipo, se define la situación de riesgo.

El Real Decreto 144/2016, de 8 de abril, que derogó al Real Decreto 400/1996, transpuesto de la Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo 94/9/CE, establece la evaluación de la seguridad que ofrecen los equipos ubicados en el interior de las zonas clasificadas.

Para realizar una evaluación objetiva del riesgo real, se dispone del Método de William T. Fine, que es la referencia de la Nota Técnica de Prevención NTP 330, publicada por el Instituto Nacional de Seguridad y Trabajo¹⁶⁸

La Norma UNE-EN 1127-1 *Atmósferas explosivas. Prevención y protección contra la explosión. Parte 1: Conceptos básicos y metodología*, es la referencia técnica para identificar la presencia de la fuente de ignición y su eficacia, por comparación entre las propiedades de la sustancia inflamable y la capacidad de la fuente de ignición para provocar la misma. En el caso de gases, se toma como referencia para el cálculo la energía mínima de ignición y la temperatura de autoinflamación. Si se trata de polvo, la temperatura de inflamación de la capa superficial.

Se distinguen trece fuentes de ignición:

- Superficies calientes.
- Llamas y gases calientes.
- Chispas de origen mecánico.
- Material eléctrico.

¹⁶⁸ Ministerio de Trabajo (1993) Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST) Sistema simplificado de evaluación de riesgos de accidente (NTP 330). NIPO: 211-94-008-1. Gobierno de España. Madrid, España. <https://goo.su/y1U1c>

CAPÍTULO 2

- Corrientes eléctricas parasitas, protección contra corrosión catódica.
- Electricidad estática.
- Rayo.
- Ondas electromagnéticas de radiofrecuencia de 104 Hz a 3×10^{12} Hz.
- Ondas electromagnéticas de 3×10^{11} Hz a 3×10^{15} Hz.
- Radiación ionizante.
- Ultrasonidos.
- Compresión adiabática y ondas de choque.
- Reacciones exotérmicas incluyendo la auto ignición de polvos.

A continuación, se detallan las normas de aplicación, dividiéndolas en dos grupos: las que son de obligado cumplimiento, y las de cumplimiento recomendado.

a) Normas UNE-EN de obligado cumplimiento:

- UNE-EN 60079-10-1 *Atmosferas explosivas. Parte 10-1: Clasificación de emplazamientos. Atmosferas explosivas gaseosas.*
- UNE-EN 60079-10-2 *Atmosferas explosivas. Parte 10-2: Clasificación de emplazamientos. Atmosferas explosivas de polvo.*
- UNE-EN 60079-14 *Atmosferas explosivas. Parte 14: Diseño, elección y realización de las instalaciones eléctricas.*
- UNE-EN 60079-14/AC: 2012 *Atmosferas explosivas. Parte 14: Diseño, elección y realización de las instalaciones eléctricas.*
- UNE-EN 60079-17 *Atmosferas explosivas. Parte 17: Inspección y mantenimiento de instalaciones eléctricas.*
- UNE-EN 60079-19 *Atmosferas explosivas. Parte 19: Reparación, revisión y reconstrucción de material.*
- Otras normas UNE-EN, NTP y documento IEC
- UNE 202003-20 *Material eléctrico para atmosferas de gas explosivas. Parte 20: Datos de gases y vapores inflamable en relación con uso de material eléctrico.*

- Informe UNE 202007:2006 IN *Guía de aplicación de la norma UNE-EN 60079-10. Material eléctrico para atmosferas de gas explosivas. Clasificación de emplazamientos peligrosos.*
- UNE-EN 1127-1 *Atmosferas explosivas. Prevención y protección contra la explosión. Parte 1: Conceptos básicos y metodología.*
- UNE-EN 13463-1 *Equipos no eléctricos destinados a atmosferas potencialmente explosivas. Parte 1 Requisitos y metodología básica.*
- UNE-EN 14373 *Sistemas de supresión de explosiones.*
- UNE-EN 14460 *Equipos resistentes a las explosiones.*
- UNE-EN 14491 *Sistemas de protección por venteo de explosiones de polvo.*
- UNE-EN 14797 *Dispositivos de venteo de explosiones.*
- UNE-EN 14994 *Sistemas de protección por venteo contra las explosiones de gas.*
- UNE-EN 15089 *Sistemas de aislamiento de explosión.*
- Norma UNE-EN 60079-0 *Material eléctrico para atmosferas de gas explosivas. Parte 0: Requisitos generales.*
- EN 60079-20-1 *Atmosferas explosivas. Características de los materiales. Clasificación de los gases y vapores, métodos y datos de ensayo.*
- UNE-EN 60079-26 *Atmósferas explosivas. Parte 26: Material con nivel de protección de material (EPL) Ga.*
- IEC 60079-12 *Material eléctrico para atmosferas explosivas. Parte 12: clasificación de las mezclas de gases o vapores y aire de acuerdo con su intersticio máximo experimental de seguridad y corriente mínima de ignición.*
- NTP 330 *Sistema simplificado de evaluación de riesgos de accidente.*
- NTP 826 *El documento de protección contra explosiones (DPCE).*
- NTP 876 *Evaluación de los riesgos específicos derivados de las atmosferas explosivas (ATEX).*

2.4.1 Normativa ATEX aplicada a la ventilación

En el caso de que la ventilación de un espacio sea forzada, solo es necesario conocer el valor de renovación de aire del recinto estudiado. Si, por el contrario, la ventilación es natural, se aplicarían las normas de Atmósferas Explosivas UNE-EN- 60079-10-1. *Atmósferas explosivas. Clasificación de emplazamientos para atmósferas explosivas gaseosas*¹⁶⁹.

La aportación de aire mediante ventilación natural se realiza aplicando las normas de cálculo de las zonas clasificadas por atmósferas explosivas mencionadas, utilizando únicamente los apartados que analizan el aire que entra y sale de un recinto, y la dispersión o dilución de la nube de dióxido de carbono. Mediante el concepto de “*Concentración de Fondo*”, se establece la concentración en el aire del patógeno que se precisa para que la infección se produzca.

En interiores, la ventilación se encuentra inducida tanto por el viento como por la flotabilidad. La ventilación inducida por el viento se debe a la diferencia de presión entre los lados de barlovento y sotavento del edificio. Su cálculo se basa en determinar el área efectiva de las aperturas disponibles, mientras que la ventilación inducida por la flotabilidad es el efecto de succión que tiene lugar por el movimiento del aire debido a la diferencia de temperatura entre el interior y exterior del edificio. Para la aplicación del método, es necesario conocer tanto el volumen del recinto a ventilar, como la superficie y la localización de las aperturas disponibles.

En ambientes exteriores, la velocidad de viento, en situaciones al aire libre, queda definida en la norma UNE EN 60079-10-1¹⁷⁰ en función de la situación del emplazamiento y densidad relativa del gas, o aplicando 1/10 de la velocidad de flujo de aire libre habitual por encima de la instalación. Como no se dispone de datos de la misma, se utilizará la velocidad propuesta de 0,5 m/s, que es la velocidad a considerar en la clasificación de zonas peligrosas, cuando el volumen a ventilar es significativamente superior a un cubo de lado 15,0 m¹⁷¹.

¹⁶⁹ EN 60079-10-1:2022 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

¹⁷⁰ EN 60079-10-1:2022 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

¹⁷¹ EN 202007:2006 IN Application Guide of EN 60079-10. Electrical Apparatus for Explosive Gas Atmospheres. Classification of Hazardous Areas. European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium.

3

Capítulo OBJETIVOS

CAPÍTULO 3: OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo que se pretende alcanzar con la investigación desarrollada en esta Tesis Doctoral es el de aportar herramientas efectivas de control que ayuden a aminorar las enfermedades transmitidas a través del aire. Para ello, se deben tener en cuenta conceptos tan relevantes como la *Densidad de Ocupación de los Recintos* o la *Concentración de Fondo*, con el propósito de poder formular una metodología estable y adaptable al agente infeccioso que se encuentre diluido en el aire (pudiéndose aplicar a patógenos como el coronavirus), y teniendo siempre en cuenta el tipo de actividad física que prevé que se desarrolle en el interior del edificio. Además, esta metodología debe ser aplicable a entornos no controlados cuya ventilación sea natural, tanto en ambientes interiores como en exteriores, por lo que se también se podrá extrapolar espacios en los que se desarrollen actividades y eventos multitudinarios.

3.1.1 Consecución del Objetivo general

El Método de Cálculo de Ocupación para la Prevención del SARS-CoV-2, ha sido puesto en práctica en el Ayuntamiento de Móstoles durante la época de la Pandemia COVID-19. Para ello, se desarrolló una metodología de trabajo para su posterior validación con los datos tomados en ambientes, tanto interiores como exteriores.

La recogida de datos se realizó en ambientes interiores entre marzo del 2020 y febrero del 2022, periodo pandémico en el que, aunque con restricciones sanitarias, se acudía a los centros de trabajo. En el caso de del trabajo de campo en exteriores, se desarrolló durante los eventos multitudinarios celebrados en espacios abiertos en la Fiestas Patronales de la ciudad de Móstoles (Madrid, España) durante el mes de septiembre de 2022, primeras fiestas sin restricciones sanitarias.

La validez del método se justifica en el análisis de los datos recogidos, orientando el trabajo en dos direcciones:

- a) En el caso de los ambientes de recintos interiores, se compararon los valores esperados de ocupación con los reales registrados en los edificios municipales, analizando los registros de contagio de la enfermedad (SARS-CoV-2) de los trabajadores.
- b) En los espacios localizados en ambientes exteriores, se comparan los valores obtenidos durante las Fiestas Patronales de Móstoles de septiembre del 2022, con los valores estimados de concentración de

dióxido de carbono, utilizando para ello las especificaciones técnicas de las Normas UNE EN 202007 IN¹⁷² y UNE EN 60079-10¹⁷³.

En los espacios abiertos, donde se producen una aglomeración de público, el aire limpio es aportado por el movimiento natural exterior, que depende de las condiciones atmosféricas de cada momento. Se plantea como objetivo determinar el volumen teórico de aire a ventilar en el entorno de los ocupantes, tomando como referencia la altura a la que los ocupantes se encuentran situados. Para ello, se analizaron las concentraciones del CO₂ que mejor se adaptan en cada situación.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como Objetivo Específico se plantea diseñar de un método alternativo para determinar la ocupación teórica de un recinto, en función de la actividad física que en él se realice de la ventilación existente, tanto artificial como natural, considerando al dióxido de carbono como un bioefluente con igual comportamiento que el Covid-19. Esto implica la utilización del dióxido de carbono como un gas trazador, por lo que, como consecuencia, se debe disponer de valores límite del dióxido de carbono en aire y proceder a su validación, obteniendo, de esta forma, el caudal de aire limpio requerido por cada asistente ($Q_{\text{requerido}}$), para cada uno de los escenarios de referencia propuestos.

De igual forma, se persigue establecer la relación entre el volumen de dióxido de carbono exhalado y la actividad física que se esté realizando, con el objetivo de poder determinar la densidad de ocupación que permite la ventilación, en función de la actividad desarrollada. Para ello, se considera el caudal de aire limpio requerido.

Para garantizar la fiabilidad del método, se han definido diez situaciones que van desde estar sentado, hasta participar de forma activa en actividades deportivas. En consecuencia, se establecen diez valores de caudal de ventilación requerido por cada uno de los cinco niveles de seguridad, con el objetivo de poder determinar la ocupación máxima para cada una de las situaciones analizadas. Cada uno de los cinco niveles de acción se asimila a un incremento en la concentración de CO₂, consecuencia de la exhalación de los ocupantes mediante la respiración. De esta forma, se obtiene el caudal de aire limpio requerido para cada una de las cincuenta situaciones analizadas.

¹⁷² EN 202007:2006 IN Application Guide of EN 60079-10. Electrical Apparatus for Explosive Gas Atmospheres. Classification of Hazardous Areas. European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium, 2006.

¹⁷³ EN 60079-10-1:2022 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

Además de los objetivos indicados, la investigación pretende conseguir también otros propósitos:

1. Determinar la ocupación en ambientes interiores dotados de sistemas de ventilación forzada, considerando la relación entre los caudales de ventilación disponible y de aire limpio requerido por cada asistente.
2. Fijar las condiciones de ventilación en entornos no controlados, cuya ventilación depende únicamente de la ventilación natural que se produce a través de las ventanas o mediante aperturas practicadas en los cerramientos.
3. Analizar los beneficios de la implementación de la ventilación natural por flotabilidad en los edificios.
4. Validar la eficacia del método en ambientes exteriores sin restricciones sanitarias por comparación entre estimaciones teóricas y mediciones ambientales, a través de mediciones y registros obtenidos durante los eventos multitudinarios celebrados en espacios abiertos en la Fiestas Patronales de la ciudad de Móstoles (Madrid, España) en el mes de septiembre de 2022.
5. Asegurar una calidad de aire asimilada a la de Categoría IDA2 para interiores con ventilación artificial¹⁷⁴, en ubicaciones que dispongan de ventilación natural.
6. Establecer la concentración de SARS-CoV-2 en aire, a partir de la cual se posibilita la transmisión de la enfermedad entre seres humanos.
7. Por último, utilizar la concentración peligrosa en aire del SARS-CoV-2 para que la metodología diseñada pueda ser aplicada por comparación directa con cualquier otro patógeno o contaminante que se transmita a través del aire.

¹⁷⁴ Ministerio de la Presidencia (2007) RITE-Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios. Gobierno de España. Madrid, España.
<https://www.boe.es/buscar/pdf/2007/BOE-A-2007-15820-consolidado.pdf>

practices started by John We

Meth-od-ist *adj, nc (of) a*
Methodism.

meth-od-ol-ogy *nu t*
e.g. in academic stud-

meths *nu = methyl*

meth-yl-ated *s*

alcohol as

4

Capítulo

METODOLOGÍA

CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA

La Tesis Doctoral desarrolla tres variantes del conocimiento de la ventilación relacionadas con el procedimiento para determinar los valores de caudal requerido en función del nivel de seguridad optado considerando la ventilación artificial¹⁷⁵, su aplicación en edificios que disponen de ventilación natural¹⁷⁶ y a actividades y eventos multitudinarios organizados en el exterior¹⁷⁷.

4.1 FASES DEL ESTUDIO

El estudio consta de dos fases perfectamente diferenciadas. En primer lugar, se proponen valores límite ambientales de CO₂ y se evalúa su idoneidad por comparación con los valores de referencia de calidad en aire ya existentes. La Tasa de Generación de CO₂ por persona se obtiene a partir de la actividad metabólica del individuo, de forma que se pueda disponer de un caudal de ventilación requerido para cada una de las actividades físicas contempladas. De esta forma, por comparación con la ventilación disponible, se determina la ocupación máxima del recinto.

En la segunda fase se valida el método mediante su aplicación práctica en el Ayuntamiento de Móstoles durante la Pandemia COVID-19 para ambientes interiores, tanto para centros dotados con ventilación artificial como los ventilados de forma natural mediante apertura de ventanas, y en la postpandemia en ambientes exteriores durante las Fiestas Patronales del municipio.

4.2 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

La base del análisis de la metodología aplicada consiste en alcanzar un balance de materia, considerando el dióxido de carbono generado por los ocupantes del recinto y el evacuado por la ventilación, en condiciones de equilibrio.

¹⁷⁵ Ballesteros-Álvarez, J. M., Romero-Barriuso, Á., Villena-Escribano, B. M., Rodríguez-Sáiz, Á., González-Gaya, C. (2024) Investigating the effectiveness of a new indoor ventilation model in reducing the spread of disease: A case of sports centres amid the COVID-19 pandemic. *Heliyon*, 10(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27877>

¹⁷⁶ Ballesteros-Álvarez, J. M., Romero-Barriuso, Á., Villena-Escribano, B. M., Rodríguez-Sáiz, Á., González-Gaya, C. (2025). Enhancing Indoor Air Quality Through Natural Ventilation: Insights from Municipal Building in Mostoles, Spain. (2025). *Dyna*, 100(4), 2254-2833. <https://www.revistadyna.com/articulos>

¹⁷⁷ Romero-Barriuso, Á., Ballesteros-Álvarez, J. M., Villena-Escribano, B. M., Rodríguez-Sáiz, Á., González-Gaya, C. (2025). Occupancy and Air Quality Model for Outdoor Events: A Strategy for Preventing Disease Transmission at Mass Events. *Buildings*, 15(5), 677. <https://doi.org/10.3390/buildings15050677>

CAPÍTULO 4

Se consideran para ello los locales de trabajo con una temperatura ambiente de confort, no calurosa, y exentos de contaminación por el humo de tabaco, como es el caso de los espacios de uso colectivo en España. Cabe indicar que la prohibición completa de fumar en espacios cerrados se produjo en el año 2011¹⁷⁸, aunque, en España, esta medida fue adoptada en el año 2005¹⁷⁹.

Para un estado estacionario, el caudal de aire exterior que debe aportar el sistema de ventilación se obtiene mediante un balance de los caudales volumétricos de CO₂. Para ello, se establece una relación entre el caudal de aire exterior, las concentraciones de CO₂ y la Tasa de Generación de CO₂.¹⁸⁰

El balance de materia indicado en el procedimiento se determina aplicando la siguiente expresión:

$$q = \frac{qCO_2}{[CO_2]_{interior} - [CO_2]_{exterior}} \cdot 10^6 \quad 4.1$$

Ecuación 3.1. Caudal de Aire Exterior Requerido por Persona

Donde:

- q = Caudal de aire exterior en l/s por persona
- qCO_2 = Tasa de generación de CO₂ en l/s por persona
- $[CO_2]_{recinto}$ = Concentración media de CO₂ en el local (ppm)
- $[CO_2]_{exterior}$ = Concentración media de CO₂ en el exterior (ppm)

En consecuencia, se puede evaluar la ventilación del recinto cerrado utilizando la concentración de CO₂ como indicador, estableciendo como supuestos que la única fuente de CO₂ es la que procede de la respiración humana, que no exista ningún otro procedimiento de eliminación del CO₂ distinto al de ventilación, y que se haya alcanzado un estado estacionario. El método es válido en aquellos espacios en los que haya suficientes ocupantes para servir de fuente de producción de CO₂ y que, además, hayan permanecido en el recinto el tiempo necesario para que el nivel de CO₂ alcance el equilibrio.

¹⁷⁸ Jefatura del Estado (2010), Ley 42/2010, de 30 de diciembre, por la que se modifica la Ley 28/2005, de 26 de diciembre, de medidas sanitarias frente al tabaquismo y reguladora de la venta, el suministro, el consumo y la publicidad de los productos del tabaco. Gobierno de España. Madrid, España. <https://www.boe.es/eli/es/l/2010/12/30/42>

¹⁷⁹ Jefatura del Estado (2005) Ley 28/2005, de 26 de diciembre, de medidas sanitarias frente al tabaquismo y reguladora de la venta, el suministro, el consumo y la publicidad de los productos del tabaco. BOE-A-2005-21261. Gobierno de España. Madrid, España. <https://www.boe.es/eli/es/l/2005/12/26/28/con>

¹⁸⁰ Ministerio de Ciencia e Innovación (2020) Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua, IDAEA-CSIC. Guía para la Ventilación en Aulas. Gobierno de España. Madrid, España. <https://goo.su/M9z4e>.

La Tasa de Generación de CO₂ por persona se obtiene mediante fórmulas matemáticas que utilizan como parámetro de partida la actividad metabólica del individuo. Estos valores de actividad metabólica, es decir, la energía desprendida por los ocupantes, están expresados en vatios de acuerdo con lo establecido en la Norma UNE-EN 8996:21¹⁸¹.

Para disponer de la de energía emitida al exterior por metro cuadrado de piel, se aplica la Fórmula de Du Bois.

$$A_{DU} = 0,202 \cdot W_b^{0,425} \cdot H_b^{0,725} \tag{4.2}$$

Ecuación 4.2. Ecuación de Du Bois. Energía emitida por la piel

Donde:

- **Wb** = Peso del cuerpo (Kg)
- **Hb** = Altura del cuerpo (m)
- **ADu** = Área de la superficie del cuerpo, en m², dada por la fórmula de Du Bois

Obtenemos el área de la superficie del cuerpo, en metros cuadrados, utilizando la Fórmula de Du Bois, considerando una persona media de 70,0 Kg de peso y 1,7 metros de altura (Tabla 4.1).

$$A_{DU} = 0,202 \cdot W_b^{0,425} \cdot H_b^{0,725}$$
$$A_{DU} = 0,202 \cdot 70^{0,425} \cdot 1,7^{0,725} = 1,8$$

Tabla 6.1. Tasa Metabólica por Actividad Realizada^{166,182}

Actividad	Metabolismo (W)	Metabolismo (W/m²)
Descanso	100 - 125	55,55 – 69,44
Actividad baja	125 -235	69,44 – 130,55
Actividad moderada	235 -360	130,55 – 200,00
Actividad alta	360 - 465	200,00 – 258,33
Actividad muy alta	> 465	258,3

Para poder aplicar el método de forma sencilla, se establecen las siguientes actividades, con el consumo metabólico asociado, correspondiente a la persona media anteriormente considerada (Tabla 4.2).

¹⁸¹ EN 8996:2021 Ergonomics of the thermal environment - Determination of metabolic rate. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

Tabla 7.2. Adaptación a la Tasa Metabólica por Actividad Realizada

Actividad	Metabolismo (W/m²)	Tipo de actividad asociada
Trabajo Sentado	70	Descanso / Actividad baja
Trabajo Ligero de Pie	100	Actividad Baja
Paseando (1.6 Km/h)	100	Actividad Baja
Trabajo Ligero	130	Actividad baja / Actividad Moderada
Bailar	165	Actividad Moderada
Trabajo Moderado	165	Actividad Moderada
Andar Rápido	200	Actividad Moderada/ Actividad Alta
Trabajo Pesado	230	Actividad Alta
Gimnasio/Nadar	260	Actividad Alta
Gimnasio /Deporte	300	Actividad Muy Alta
Nadar	300	Actividad Muy Alta

4.2.1 Valores propuestos

El Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, establece en la IT 1.1.4.2.2 para los espacios interiores dedicados a actividades de oficinas una calidad de aire de Categoría IDA2. Esto implica que la concentración de CO₂ entre el interior y exterior del recinto analizado no puede diferir de un valor de referencia de 500 ppm¹⁸³.

$$q = \frac{q_{CO_2}}{[CO_2]_{interior} - [CO_2]_{exterior}} \cdot 10^6$$

$$q = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{500} \cdot 10^6 = 10 \text{ l/s}$$

Aplicando el Método Indirecto de Caudal de Aire Exterior por Persona, propuesto en la IT 1.1.4.2.3, se obtiene como resultado 45,0 m³/h por persona, lo que equivale a 12,5 l/s por persona. Como se puede observar, el valor obtenido es ligeramente inferior a los 14,0 l/s propuesto en el Método *Steady State* CO₂¹⁸⁴, pero puede servir de referencia como valor umbral para una adecuada ventilación de espacios interiores.

¹⁸³ Ministerio de la Presidencia (2021). Real Decreto 178/2001 de Modificación del Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE). Gobierno de España. Madrid, España.
<https://www.boe.es/eli/es/rd/2021/03/23/178/dof/spa/pdf>

¹⁸⁴ Allen, J., Spengler, J., Jones, E., Cedeno-Laurent, J. (2020) How School Buildings Influence Student Health. Thinking and Performance. Harvard T.H. Chan Healthy Buildings Program. Cambridge, United States. <https://schools.forhealth.org/>

Se establecen los niveles clásicos de actuación, como Metodología en Higiene Industrial, al 75%, 50% y 25 % de este límite, es decir 15,62 l/s, 18,75 l/s y 21,87 l/s.

En consecuencia, los valores de referencia de ΔCO_2 son, respectivamente, 230 ppm, 270 ppm y 320 ppm, considerando en el exterior una concentración entre 400 ppm y 500 ppm y en el interior 730 ppm, 770 ppm y 820 ppm. Es preciso indicar que la concentración de CO_2 establecida por el Método *Steady State* CO_2 para el exterior es de 420 ppm.

Si se utiliza el Método *Steady State* CO_2 como referencia, el ΔCO_2 considerado es de 378 ppm y el valor referenciado en interiores es de 878 ppm.

4.2.2 Caudal de ventilación requerido en función de la actividad desarrollada

Comparando los valores de referencia propuestos con los caudales volumétricos de aire, se obtiene la ocupación estimada en el interior de un recinto en función de la actividad desarrollada.

Aplicando las expresiones matemáticas anteriormente mostradas de la Norma UNE-EN ISO 8996:21¹⁸⁵ a los valores de consumo metabólico (Tabla 4.2), se obtienen las Tasas de Emisión de Dióxido de Carbono por Actividad:

$$M = EE \cdot V_{O_2} \cdot \frac{1}{A_{D_U}} \quad 4.3$$

Ecuación 4.3. Consumo Metabólico obtenido a partir del Oxígeno Inhalado

$$M = 5,68 \cdot V_{O_2} \cdot \frac{1}{1,8} \Rightarrow V_{O_2} = 0,3169 \cdot M$$

$$RQ = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{O_2}} = 0,85 \Rightarrow V_{\text{CO}_2} = 0,2694 \cdot M$$

$$q\text{CO}_2 = 6,36 \cdot 10^{-5} \cdot M$$

Donde:

- V_{O_2} = Tasa de Consumo de Oxígeno, en litros de oxígeno por hora
- V_{CO_2} = Tasa de Producción de Dióxido de Carbono, en litros de dióxido de carbono por hora
- $q\text{CO}_2$ = Tasa de Generación de Dióxido de Carbono en l/s por persona
- M = Tasa Metabólica, en vatios por metro cuadrado

¹⁸⁵ EN 8996:2021 Ergonomics of the thermal environment - Determination of metabolic rate. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

CAPÍTULO 4

El caudal de ventilación disponible se compara con el caudal de aire requerido, en función del valor limitante seleccionado de entre los propuestos. Para lo cual, se calcula la Tasa de Generación de Dióxido de Carbono y el caudal de aire exterior necesario en función de la actividad desarrollada. Para disponer del mismo nivel de seguridad, la dilución de las emisiones producidas por el ser humano durante su respiración, deben de aumentarse en la misma proporción que el aumento de la transmisión del virus.

$$Q_{requerido} = \frac{qCO_2}{[CO_2]_{interior} - [CO_2]_{exterior}} \cdot 10^6 \quad 4.4$$

$$[CO_2]_{interior} - [CO_2]_{exterior} = \Delta[CO_2]$$

Ecuación 4.4. Ventilación requerida por persona

Donde:

- $Q_{requerido}$ = Caudal ventilación necesario en l/s por persona
- qCO_2 = Tasa de Generación de Dióxido de Carbono en l/s por persona
- $[CO_2]_{recinto}$ = Concentración media de dióxido de carbono en el local (ppm)
- $[CO_2]_{exterior}$ = Concentración de dióxido de carbono en el exterior (ppm)
- ΔCO_2 = Diferencia de concentración de dióxido de carbono en el exterior

De esta forma, se obtiene un valor de $Q_{requerido}$ para cada uno de los cuatro valores de referencia propuestos: 75,0%, 50,0% y 25,0 %, es decir ΔCO_2 de 230 ppm, 270 ppm y 320 ppm, así como el valor de ventilación considerado adecuado por el Método *Steady State* CO_2 ¹⁸⁶, ΔCO_2 de 378 ppm. Para cada valor de referencia, se obtiene el caudal requerido de ventilación en el recinto considerado:

$$Q_{requerido\ 75\%} = \frac{q_{CO_2}}{230} \cdot 10^6 \quad 4.5$$

Ecuación 4.5. Caudal de Ventilación necesario para el Valor de Referencia al 75 %

Donde:

- $Q_{requerido\ 75\%}$ = Caudal de ventilación necesario en l/s por persona, para el valor de referencia al 75 %

$$Q_{requerido\ 50\%} = \frac{q_{CO_2}}{270} \cdot 10^6 \quad 4.6$$

Ecuación 4.6. Caudal de Ventilación necesario para el Valor de Referencia al 50 %

Donde:

¹⁸⁶ Allen, J., Spengler, j., Jones, E., Cedeno-Laurent, J. (2020) How School Buildings Influence Student Health. Thinking and Performance. Harvard T.H. Chan Healthy Buildings Program. Cambridge, United States. <https://schools.forhealth.org/>

- $Q_{\text{requerido } 50 \%}$ = Caudal de ventilación necesario en l/s por persona, para el valor de referencia al 50 %

$$Q_{\text{requerido } 25 \%} = \frac{q_{CO_2}}{320} \cdot 10^6 \quad 4.7$$

Ecuación 4.7. Caudal de Ventilación necesario para el Valor de Referencia al 25,0 %

Donde:

- $Q_{\text{requerido } 25 \%}$ = Caudal de ventilación necesario en l/s por persona, para el valor de referencia al 25 %

$$Q_{\text{requerido (Allen et al., 2020)}} = \frac{q_{CO_2}}{378} \cdot 10^6 \quad 4.8$$

Ecuación 4.8. Caudal de Ventilación para el Valor de Referencia Guía Allen

Donde:

- $Q_{\text{requerido (Allen et al., 2020)}}$ = Caudal de ventilación necesario en l/s por persona, para el valor de referencia Guía¹⁸⁷

En caso de disponer únicamente de ventilación natural, tanto en espacios interiores como en exteriores, es posible determinar la ocupación que permite mantener las mismas condiciones de ventilación que en interiores, calidad de aire asimilada a la Categoría IDA2¹⁸⁸.

$$Q_{\text{requerido RITE}} = \frac{q_{CO_2}}{500} \cdot 10^6 \quad 4.9$$

Ecuación 4.9. Caudal de Ventilación necesario para el Valor de Referencia al 75 %

Donde:

- $Q_{\text{requerido R.I.T.E.}}$ = Caudal de ventilación necesario en l/s por persona, para el valor de referencia Calidad IDA2

De esta forma, se dispone de un caudal de ventilación por cada persona que se encuentra en el interior del recinto, sin ser necesario que todos los ocupantes se encuentren realizando la misma actividad. Además, es posible, incluso, disponer de un valor ajustado también en función de las características físicas de los ocupantes, como su altura o su peso.

A continuación, se muestra el proceso de cálculo en el caso más restrictivo, considerando como nivel de seguridad una concentración equivalente al 75,0% del valor límite establecido durante la ejecución de una actividad sedentaria, en un recinto cuyos ocupantes coinciden con las dimensiones de una persona media.

¹⁸⁷ Allen, J., Spengler, J., Jones, E., Cedeno-Laurent, J. (2020) How School Buildings Influence Student Health. Thinking and Performance. Harvard T.H. Chan Healthy Buildings Program. Cambridge, United States. <https://schools.forhealth.org/>

¹⁸⁸ Ministerio de la Presidencia (2021). Real Decreto 178/2001 de Modificación del Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE). Gobierno de España. Madrid, España. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2021/03/23/178/dof/spa/pdf>

CAPÍTULO 4

En estas condiciones, la Tasa de Generación de Dióxido de Carbono por Persona, se sitúa en 0,0045 l/s.

$$q_{CO_2} = 6,36 \cdot 10^{-5} \cdot M \Rightarrow q_{CO_2} = 6,36 \cdot 10^{-5} \cdot 70 \Rightarrow q_{CO_2} = 4,45 \cdot 10^{-3} \text{ l/s}$$

Aplicando los valores de referencia, el caudal de ventilación requerido por persona queda establecido en 19,56 l/s.

$$\begin{aligned} Q_{\text{requerido } 75\%} &= \frac{q_{CO_2}}{230} \cdot 10^6 \Rightarrow Q_{\text{requerido } 75\%} = \frac{0,0045}{230} \cdot 10^6 \\ &\Rightarrow Q_{\text{requerido } 75\%} = 19,35 \text{ l/s} \cdot \text{persona} \end{aligned}$$

De esta forma, se obtienen los valores de referencia en los diferentes niveles de acción, para todas las actividades consideradas. La ocupación teórica se obtiene mediante la expresión:

$$Ocupación \text{ teórica} = \frac{Q_w}{Q_{\text{requerido}}} \cdot 10^3 \quad 4.10$$

Ecuación 4.10. Cálculo de la Ocupación Teórica

La ocupación, por ende, se obtiene por comparación con el valor de referencia $Q_{\text{requerido}}$, el cual es específico para cada actividad desarrollada ([Tabla 4.3](#)).

Tabla 8.3. Caudal de Ventilación Requerido por Persona en Función de la Actividad Desarrollada

Tipo de Actividad	Metabolismo (W/m²)	qCO ₂ (l/s)	Q _{requerido} 75% (l/s)	Q _{requerido} 50% (l/s)	Q _{requerido} 25% (l/s)	Q _{requerido} Allen et al., 2020) (l/s)
Trabajo Sentado	70	0,0045	19,36	16,49	13,91	11,78
Trabajo Ligero de Pie	100	0,0064	27,65	23,56	19,88	16,83
Paseando (1,6 Km/h)	100	0,0064	27,65	23,56	19,88	16,83
Trabajo ligero	130	0,0083	35,95	30,62	25,84	21,87
Bailar	165	0,0105	45,63	38,87	32,79	27,76
Trabajo Moderado	165	0,0105	45,63	38,87	32,79	27,76
Andar (5 Km/h)	200	0,0127	55,30	47,11	39,75	33,65
Trabajo Pesado	230	0,0146	63,60	54,18	45,71	38,70
Gimnasio/ Nadar	260	0,0165	71,90	61,24	51,68	43,75
Gimnasio /Deporte	300	0,0191	82,96	70,67	59,63	50,48
Nadar	300	0,0191	82,96	70,67	59,63	50,48

Aplicando el procedimiento de cálculo para el resto de las actividades consideradas, se obtienen los resultados que se muestran a continuación (Tabla 4.4).

Tabla 9.4. Caudal de Ventilación Requerido para las Actividades Realizadas en el Exterior

Actividad	Sentado	En pie	Paseando 1,6 Km/h	Actividad Ligera	Bailar
Q _{requerido} RITE (l/persona)	9,0	12,72	12,80	16,60	21,00
Actividad	Actividad Moderada	Andar 5 km/h	Actividad Pesada	Actividad Gimnástica	Deporte Equipo/Nadar
Q _{requerido} RITE (l/persona)	21,00	25,40	29,20	33,00	38,20

4.2.3 Análisis de la concentración de fondo

La “Concentración de Fondo” se define como la “concentración media en el aire dentro de un volumen cerrado, después de un período de tiempo durante el

cual se ha establecido un estado estable entre la emisión y el flujo de aire inducido por la ventilación”. De acuerdo con estas premisas, la Concentración de Fondo permite evaluar la efectividad de la ventilación en relación con la capacidad de dispersión del patógeno o contaminante. UNE-EN 60079-10-1¹⁸⁹.

La Concentración de Fondo está directamente relacionada con la *concentración peligrosa*, mediante el concepto de *concentración crítica*. Por consiguiente, cualquier patógeno o sustancia de la que se conozca su concentración peligrosa, es susceptible de ser controlada en recintos interiores, aplicando la metodología de estudio desarrollada en esta investigación.

La *concentración crítica* equivale a una cuarta parte del volumen considerado peligroso del patógeno o sustancia considerada.

4.3 JUSTIFICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA

Los valores de referencia propuestos en esta investigación se validan previamente mediante las referencias del Método *Steady State CO₂*¹⁹⁰.

Para poder utilizar como base de aplicación la Norma UNE EN 8996:21¹⁹¹, debe comprobarse con antelación que la Tasa de Emisión Volumétrica de Dióxido de Carbono exhalado, para un mismo tipo de actividad, coincide con la del Método de *Steady State CO₂*.

Para determinar el valor del volumen de dióxido de carbono exhalado por una persona, se aplica la Norma UNE EN 8996:21. Esta norma permite establecer una relación entre el volumen de oxígeno inhalado, el volumen de dióxido de carbono exhalado y la Tasa Metabólica. Esta última también se puede determinar en función de las características de la persona y de las actividades que realiza.

La Tasa Metabólica se determina mediante la aplicación de las siguientes expresiones:

$$RQ = \frac{V_{CO_2}}{V_{O_2}} \quad 4.11$$

Ecuación 4. Coeficiente respiratorio

$$EE = (0,23 \cdot RQ + 0,77) \cdot 5,88 \quad 4.12$$

¹⁸⁹ EN 60079-10-1:2022 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

¹⁹⁰ Allen, J., Spengler, J., Jones, E., Cedeno-Laurent, J. (2020) How School Buildings Influence Student Health. Thinking and Performance. Harvard T.H. Chan Healthy Buildings Program. Cambridge, United States. <https://schools.forhealth.org/>

¹⁹¹ EN 8996:2021 Ergonomics of the thermal environment - Determination of metabolic rate. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

Ecuación 4.12. Equivalente energético

$$M = EE \cdot V_{O_2} \cdot \frac{1}{A_{DU}} \quad 4.13$$

Ecuación 4.13. Tasa Metabólica

Donde:

- **RQ** = Cociente respiratorio
- **VO₂** = Tasa de Consumo de Oxígeno, en litros de oxígeno por hora
- **VCO₂** = Tasa de Producción de Dióxido de Carbono, en litros de dióxido de carbono por hora
- **EE** = El equivalente energético, en vatios hora por litro de oxígeno W·h/l O₂
- **M** = Tasa Metabólica, en vatios por metro cuadrado
- **ADu** = Área de la superficie del cuerpo, en metros cuadrados, dada por la fórmula de Du Bois:

$$A_{DU} = 0,202 \cdot W_b^{0,425} \cdot H_b^{0,725}$$

Donde:

- **Wb** = Peso del cuerpo (Kg)
- **Hb** = Altura del cuerpo (m)

Para el cálculo de la Tasa de Consumo de Oxígeno se aplica la siguiente expresión:

$$V_{O_2} = V_{ext}(0,209 - F_{O_2}) \quad 4.14$$

Ecuación 5. Consumo de Oxígeno

Donde:

- **VO₂** = Tasa de Consumo de Oxígeno (l/h)
- **FO₂** = Fracción de oxígeno en el aire espirado

Cálculo de la Tasa de Producción de Dióxido de Carbono

$$V_{CO_2} = V_{ext} \cdot (F_{CO_2} - 0,0003) \quad 4.15$$

Ecuación 6. Consumo de Dióxido de Carbono

Donde:

- **VCO₂** = Tasa de Consumo de Dióxido de Carbono (l/h)
- **FCO₂** = Fracción de dióxido de carbono en el aire espirado

Para la determinación del efecto de la contracción del volumen espirado, los volúmenes inspirado y espirado no son iguales si RQ es diferente a la unidad. La contracción del volumen espirado puede considerarse empleando las siguientes ecuaciones:

$$V_{O_2} = V_{ext} \cdot [0,265 \cdot (1 - F_{O_2} - F_{CO_2}) - F_{O_2}]$$

CAPÍTULO 4

$$V_{CO_2} = V_{ext} \cdot [F_{CO_2} - (1 - F_{O_2} - F_{CO_2}) \cdot 0,38 \cdot 10^{-3}]$$

Utilizando las expresiones anteriormente propuestas, se obtiene que la fracción de oxígeno en el aire espirado (F_{O_2}) es de 0,162, mientras que la de dióxido de carbono (F_{CO_2}) es de 0,042.

Para la obtención del Coeficiente Respiratorio, se aplican las siguientes expresiones:

$$V_{O_2} = V_{ext}(0,209 - F_{O_2})$$

$$V_{CO_2} = V_{ext} \cdot (F_{CO_2} - 0,0003)$$

$$RQ = \frac{V_{CO_2}}{V_{O_2}} = \frac{V_{ext} \cdot (F_{CO_2} - 0,0003)}{V_{ext}(0,209 - F_{O_2})}$$

$$RQ = \frac{(0,042 - 0,0003)}{V_{ext}(0,209 - 0,162)} = 0,83$$

Aplicando en las siguientes expresiones el efecto de la contracción del aire respirado, se obtiene:

$$V_{O_2} = V_{ext} \cdot [0,265 \cdot (1 - F_{O_2} - F_{CO_2}) - F_{O_2}]$$

$$V_{CO_2} = V_{ext} \cdot [F_{CO_2} - (1 - F_{O_2} - F_{CO_2}) \cdot 0,38 \cdot 10^{-3}]$$

$$RQ = \frac{V_{CO_2}}{V_{O_2}} = \frac{V_{ext} \cdot [F_{CO_2} - (1 - F_{O_2} - F_{CO_2}) \cdot 0,38 \cdot 10^{-3}]}{V_{ext} \cdot [0,265 \cdot (1 - F_{O_2} - F_{CO_2}) - F_{O_2}]}$$

$$RQ = \frac{F_{CO_2} - (1 - F_{O_2} - F_{CO_2}) \cdot 0,38 \cdot 10^{-3}}{0,265 \cdot (1 - F_{O_2} - F_{CO_2}) - F_{O_2}}$$

$$RQ = \frac{0,042 - (1 - 0,162 - 0,042) \cdot 0,38 \cdot 10^{-3}}{0,265 \cdot (1 - 0,162 - 0,042) - 0,162} = \frac{0,04169}{0,0489} = 0,85$$

El Equivalente Energético, expresado en vatios hora por litro de oxígeno, es el siguiente:

$$EE = (0,23 \cdot RQ + 0,77) \cdot 5,88$$

$$EE = (0,23 \cdot 0,85 + 0,77) \cdot 5,88 = 5,68$$

La Norma UNE-EN ISO 8996:21¹⁹² establece que las actividades comprendidas entre el descanso y la actividad baja tienen asignada una Tasa Metabólica de 125 W. Este tipo de actividades comprenden trabajos que no requieren excesivo esfuerzo como escribir, teclear, dibujar, coser, anotar contabilidad; trabajos con brazos y manos realizados con pequeñas herramientas, como actividades de inspección, montaje o clasificación de materiales ligeros. También trabajos realizados con los pies o las piernas como la conducción de vehículos en condiciones normales, empleo de pedales de accionamiento, etc.¹⁹³.

La Tasa Metabólica por metro cuadrado, asignada a un apersona de tipo medio, desarrollando este tipo de actividades es, por lo tanto, de 70,0 W/m².

Para poder comparar los resultados obtenidos con los del Método *Steady State* CO₂¹⁹⁴, se considera el trabajo ligero, por lo que, para los cálculos realizados, se establece un valor de referencia de 70,0 W/m².

$$M = EE \cdot V_{O_2} \cdot \frac{1}{A_{DU}}$$

$$70 = 5,68 \cdot V_{O_2} \cdot \frac{1}{1,8} \Rightarrow V_{O_2} = 22,18 \text{ l/h}$$

Aplicando el Coeficiente Respiratorio determinado en las expresiones anteriores, se obtiene:

$$RQ = \frac{V_{CO_2}}{V_{O_2}} = 0,85 \Rightarrow V_{CO_2} = 18,85 \text{ l/h}$$

Para los cálculos, se utilizan las Condiciones Normalizadas de Presión y Temperatura (CNPT), es decir, la temperatura es de 0 °C ($\theta = 0 \text{ °C}/273,15 \text{ K}$) y la Presión Atmosférica Normal ($p = 101,3 \text{ kPa}$), correspondiente al estándar de aire seco. Como el aire recogido está saturado de vapor de agua, cuya presión de saturación es función de la temperatura, y ésta, a su vez, viene determinada por la temperatura ambiente (condiciones ATPS: temperatura y presión

¹⁹² EN 8996:2021 Ergonomics of the thermal environment - Determination of metabolic rate. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

¹⁹³ Ministerio de Trabajo y Economía Social (2014) Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST) NTP 1011: Determinación del metabolismo energético mediante tablas. Gobierno de España. Madrid, España. <https://goo.su/o7LDc>

¹⁹⁴ Allen, J., Spengler, j., Jones, E., Cedeno-Laurent, J. (2020) How School Buildings Influence Student Health. Thinking and Performance. Harvard T.H. Chan Healthy Buildings Program. Cambridge, United States. <https://schools.forhealth.org/>

CAPÍTULO 4

atmosféricas, aire saturado), el Factor de Reducción f puede ser calculado a partir de la siguiente ecuación, utilizando la presión parcial de vapor de agua.

$$f = \frac{273 \cdot (P - P_{H_2O})}{(273 + \theta) \cdot 101,3} \quad 4.16$$

Ecuación 7. Factor de Reducción S.T.P.D.

Donde:

- **F** = Factor de Reducción STPD
- **P** = Presión Atmosférica medida (kPa)
- **θ** = Temperatura del aire espirado (°C)
- **P_{H₂O}** = Presión parcial de vapor de agua saturado, correspondiente a la temperatura θ (kPa)

Asumiendo que el aire exhalado se encuentra a la temperatura corporal de 36,5 °C, y que, a esa temperatura, la presión parcial del vapor de agua saturado es de 3,17 kPa, se obtiene el siguiente resultado:

$$f = \frac{273 \cdot (101,325 - 3,17)}{(273 + 36,5) \cdot 101,3} = 0,85$$

De esta forma, se obtiene el aire respirado en Condiciones Normalizadas de Presión y Temperatura (STPD):

$$V_{ext\ STPD} = V_{ext\ ATPS} \cdot f \quad 4.17$$

Ecuación 4.17. Volumen Espirado en condiciones S.T.P.D.

Donde:

- **V_{ext}_{STPD}** = Volumen espirado en condiciones STPD (l/h)
- **V_{ext}_{ATPS}** = Volumen espirado en condiciones ATPS (l/h)

Como el V_{ext} es proporcional al V_{CO_2} , el dióxido de carbono emitido durante la respiración durante la ejecución de tareas sedentarias es:

$$V_{CO_2\ STPD} = V_{CO_2\ ATPS} \cdot f$$

$$V_{CO_2\ STPD} = q_{CO_2} = 18,85 \cdot 0,85 = 16,02 \frac{l}{h} = 4,45 \cdot 10^{-3} l/s$$

El volumen de dióxido de carbono exhalado por persona en régimen sedentario es de $4,45 \cdot 10^{-3}$ l/s, de acuerdo con lo especificado en la Norma UNE

EN 8996:21¹⁹⁵. Aplicando las expresiones de la Norma UNE-EN 16798-3:18¹⁹⁶, para la medida del dióxido de carbono en condiciones de equilibrio, y utilizando como valor de actividad metabólica sedentaria 1,2 met, de acuerdo con la Norma UNE EN 8996:21, se obtiene el siguiente resultado:

$$q\text{CO}_2 = 0,0042 \cdot M = 0,0042 \cdot 1,2 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ l/s}$$

Como se puede observar, los valores obtenidos de la aplicación de ambas normas son similares.

El Método *Steady State* CO₂¹⁹⁷, considera la Tasa de Generación de CO₂ por Persona es un valor que depende de la edad, el sexo, el peso y la actividad metabólica. Los valores estimados se muestran en unas tablas de referencia, de acuerdo con estos condicionantes¹⁹⁸. Las tablas muestran que los valores de los niveles de actividad física para tareas administrativas están comprendidos entre 1,0 y 1,3 M, lo cual implica una Tasa de Generación de CO₂, para personas en edad laboral, comprendida entre 3,5 10⁻³ l/s y los 4,8 10⁻³ l/s.

Se puede observar que los resultados obtenidos por los tres métodos son similares, por lo que se puede afirmar que los valores son adecuados como referencia para su aplicación en los estudios de ventilación diseñados en esta investigación. Por otra parte, se observa que la ecuación propuesta por el Método de *Steady State* CO₂¹⁹⁹ para el cálculo de la *concentración de fondo del dióxido de carbono*, es, aplicando un balance de masas de dióxido de carbono, donde el Q objetivo se corresponde con el caudal de ventilación, y el Cestable con el [CO₂]exterior.

Se aplica la ecuación recogida en la Norma UNE-EN 16798-3:18²⁰⁰, y se analizan los resultados obtenidos para un volumen de dióxido de carbono exhalado de 5·10⁻³ l/s, de forma que puedan ser comparadas con los valores de referencia establecidos en las diferentes normas.

¹⁹⁵ EN 8996:2021 Ergonomics of the thermal environment - Determination of metabolic rate. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

¹⁹⁶ EN 16798-3:2018 Eficiencia energética de los edificios. Ventilación de los edificios. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

¹⁹⁷ Allen, J. Spengler, J., Jones, E., Cedeno-Laurent, J. (2020) How School Buildings Influence Student Health. Thinking and Performance. Harvard T.H. Chan Healthy Buildings Program. Cambridge, United States. <https://schools.forhealth.org/>

¹⁹⁸ De Jonge, P. L. (2017) Carbon dioxide generation rates for building occupants. *Indoor Air* 27(5), 868-879. <https://doi.org/10.1111/ina.12383>

¹⁹⁹ Allen, J. Spengler, J., Jones, E., Cedeno-Laurent, J. (2020) How School Buildings Influence Student Health. Thinking and Performance. Harvard T.H. Chan Healthy Buildings Program. Cambridge, United States. <https://schools.forhealth.org/>

²⁰⁰ EN 16798-3:2018 Eficiencia energética de los edificios. Ventilación de los edificios. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

CAPÍTULO 4

Tomando como referencia un ΔCO_2 de 1000 ppm entre el interior y el exterior de un recinto, y estableciendo como nivel de seguridad un 25,0%, se obtiene:

$$q = \frac{q\text{CO}_2 \cdot N}{[\text{CO}_2]_{\text{interior}} - [\text{CO}_2]_{\text{exterior}}} \cdot 10^6$$

Se considera:

$$q = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{1000 - (1000 \cdot 0,25)} \cdot 10^6 = 6,8 \text{ l/s}$$

En consecuencia, con los cálculos propuestos para la estimación de la ventilación, se llega a la conclusión de que el caudal de ventilación necesario es de 6,8 l/s por persona.

La Norma UNE-EN 16798-3:18 establece como recomendación 7,5 l/s por persona para la ventilación de locales de oficinas, mientras que el Anexo III del Real Decreto 486/97²⁰¹, considera la referencia de 30,0 m³/h/trabajador (8,3 l/s por trabajador). Por su parte, el Método *Steady State* CO₂²⁰² establece como valor adecuado de referencia para reducir el riesgo de contagio 14,0 l/s persona. Esta cantidad supone el doble de caudal de ventilación por persona establecido en el estándar americano ASHRAE 62.1²⁰³, que lo sitúa en 7,0 l/s por persona.

A la vista de los resultados obtenidos, se concluye que mediante la utilización de Normas UNE-EN españolas, se obtienen valores similares a los establecidos en el Método *Steady State* CO₂.

4.4 ESTRATEGIA DE INVESTIGACIÓN

Como estrategia de investigación, se propone realizar un análisis comparativo entre la ocupación máxima para cada uno de valores límite establecidos, y los valores reales de ocupación de los espacios analizados.

4.4.1 Estrategia en interiores

En ambientes interiores se distinguen dos tipos de situaciones. Por una parte, la ventilación controlada mediante sistemas de climatización y ventilación

²⁰¹ Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales (1997). 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. Gobierno de España. Madrid, España. <https://www.boe.es/eli/es/rd/1997/04/14/486/con>

²⁰² Altomonte, S., Allen, J., Bluyssen, P. M., Brager, G., Heschong, L., Loder, A., Schiavon, S., Weitch, J. A., Wang, L., P. Wargocki, P. Ten questions concerning well-being in the built environment. *Build. Environ.* 180 (2020) 106949. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106949>

²⁰³ Standard ASHRAE 62.1 (2019). Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. American National Standards Institute. <https://spain-ashrae.org/directriz-ashrae-62-1-2019/>

natural no contralada a través de las ventanas. En el caso de estas últimas, el caudal de aire que entra en el recinto se obtiene mediante aplicación de las normas de cálculo para atmósferas explosivas. Por otra, la ventilación natural, en la que es preciso analizar la ventilación inducida tanto por el viento a través de las aperturas disponibles, como por la flotabilidad.

4.4.1.1 Ventilación inducida por el viento

En la normativa se establece el flujo de ventilación a través de las aberturas previstas por el proyectista en el diseño del edificio. No se consideran los flujos inducidos por infiltración. No obstante, en este método de cálculo se consideran aberturas de ventilación tanto las ventanas como las puertas.

Para el cálculo se considera el viento inducido por diferencia de presión entre los lados de barlovento y sotavento del edificio. La velocidad de aire considerada en pasillos exteriores al recinto objeto de estudio, está comprendida entre 0,05 m/s y 0,15 m/s. Estos valores corresponden a recintos cerrados donde se toman medidas para el bienestar de las personas. No obstante, si no se dispone de información de registros del sistema de climatización del edificio, se toma el valor para el cálculo 0,05 m/s ²⁰⁴. Como se puede observar, para la velocidad de aire en interiores poco ventilados, la Norma UNE EN 20207:IN establece como valor directamente aplicable los 0,05 m/s ²⁰⁵.

El flujo de aire se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$Q_{aw} = C_d \cdot A_e \cdot u_w \sqrt{\frac{\Delta C_p}{2}} \quad 4.18$$

Ecuación 8. Entrada de Caudal de Aire en Interiores-Ventilación Natural

Donde:

- **Q_{aw}** = Caudal Volumétrico de Aire (m³/s)
- **C_d** = Coeficiente de Descarga Adimensional, característico de grades aberturas para ventilación y que tiene en cuenta la turbulencia y la viscosidad, típicamente está comprendido entre 0,5 y 0,7
- **A_e** = Área efectiva equivalente de las aberturas (m²)
- **u_w** = Velocidad del viento a la altura referenciada (m/s)

²⁰⁴ Ministerio de Vivienda, 2006. Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. Gobierno de España. Madrid, España.
<https://www.boe.es/eli/es/rd/2006/03/17/314>

²⁰⁵ EN 20207:2006 IN Application Guide of EN 60079-10. Electrical Apparatus for Explosive Gas Atmospheres. Classification of Hazardous Areas. European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium.

CAPÍTULO 4

- ΔC_p = Coeficiente de Presión característico de edificio (adimensional), se utiliza el valor de 0,1 debido a que el edificio está protegido en todo su alrededor por edificios y estructuras

Para obtener el área efectiva:

$$A_e = \sqrt{\frac{2 \cdot A_1^2 \cdot A_2^2}{A_1^2 + A_2^2}} \quad 4.19$$

Ecuación 4.19. Área Efectiva de Ventilación Natural

Donde:

- A_1 = Área efectiva de la abertura contra del viento
- A_2 = Área efectiva de la abertura a favor del viento

Si bien la expresión general del cálculo del caudal de viento es la misma que en la Norma UNE EN 202007:06, en esta última se presentan procedimientos de cálculo más desarrollados. Para ambientes cerrados, con aberturas de ventilación localizadas en la parte alta y baja, situadas en un solo lado, utiliza la siguiente expresión:

$$Q_{aw} = 0,025 \cdot (A_1 + A_2) \cdot w \quad 4.20$$

Ecuación 4.20. Ventilación mediante aberturas localizadas en la Parte Alta y Baja

Donde:

- W = Velocidad de aire exterior
- A_1 = Área libre real total de las aberturas situadas en alto en una pared
- A_2 = Área libre real total de las aberturas situadas en bajo en una pared

Esta expresión es de utilidad en el cálculo del caudal volumétrico de aire que entra a través de las puertas. No obstante, el aporte de aire obtenido a partir de las puertas localizadas en pasillos interiores, suelen ser despreciables.

4.4.1.2 Ventilación inducida por la flotabilidad

La succión del aire inducida por la flotabilidad tiene lugar por la diferencia de densidad del aire, producida por la diferencia existente entre la temperatura interior y exterior del edificio²⁰⁶.

$$P_s = P_0 - \rho \cdot g \cdot Y \quad 4.21$$

Ecuación 91. Succión Inducida por Flotabilidad

²⁰⁶ Walker, I. S., Wilson, D. J. (1993) Evaluating models for superposition of wind and stack effect in air infiltration, *Build. Environ.*, 28 (2), 201-210. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(93\)90053-6](https://doi.org/10.1016/0360-1323(93)90053-6)

Donde:

- P_s = Presión debida a la diferencia de densidades (Pa)
- P_0 = Presión a la altura de referencia (Pa)
- ρ = Densidad del aire (kg/m^3)
- Y = Altura medida desde el plano de referencia (m)

La presión producida como consecuencia de la diferencia de densidades entre dos aperturas verticales viene dada por la siguiente fórmula²⁰⁷:

$$\Delta P_s = -\rho \cdot g \cdot H \cdot T_i \cdot \left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_i} \right) \quad 4.22$$

Ecuación 102. Presión de Succión Inducida por Diferencia de Densidad del Aire

Donde

- ΔP_s = Diferencia de presión causada por la diferencia de densidad del aire (Pa)
- ρ = Densidad a la temperatura T_i (Kg/m^3)
- T_e = Temperatura del aire exterior (K)
- T_i = Temperatura del aire interior
- H = Separación vertical de las aperturas (m)

La normativa aporta modelos matemáticos que permiten determinar la Tasa de Ventilación Natural utilizando únicamente las aperturas cenitales^{208,209}:

$$Q_a = C_d \cdot \frac{A_r}{2} \cdot \sqrt{\frac{\Delta T}{T_{out}} \cdot 2 \cdot g \cdot \frac{H}{4} + C_w \cdot u_w^2} \quad 4.23$$

Ecuación 113. Caudal de Ventilación Inducido por la Diferencia de Temperatura del Aire

Donde:

- Q_a = Caudal volumétrico de aire (m^3/s)
- C_d = Coeficiente de Descarga Adimensional, característico de grades aberturas para ventilación y que tiene en cuenta la turbulencia y la viscosidad, típicamente está comprendido entre 0,5 y 0,7
- C_w = Coeficiente debido a la dirección del viento 0,07 -0,14

²⁰⁷ Espejel, D. E., López, I. L. (2013) Determination of rates of natural ventilation in a greenhouse using theoretical models and tracer gases. *Rev. Mex. Cienc. Agric.*, 4(2) 185-198.
<https://www.redalyc.org/pdf/2631/263127556001.pdf>

²⁰⁸ Espejel, D. E., López, I. L., Determination of rates of natural ventilation in a greenhouse using theoretical models and tracer gases. *Rev. Mex. Cienc. Agric.*, 4(2) 185-198.
<https://www.redalyc.org/pdf/2631/263127556001.pdf>

²⁰⁹ Boulard, T., Meneses, J. F., Mermier, M., Papadakis, G. (1996) The mechanisms involved in the natural ventilation of greenhouses. *Agric. For. Meteorol.*, 79, 61-77.
[https://doi.org/10.1016/0168-1923\(95\)02266-X](https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02266-X)

CAPÍTULO 4

- A_r = Área de ventilación superior (m^2)
- ΔT = Diferencia entre la temperatura exterior e interior (K)
- T_{out} = Temperatura Exterior (K)
- g = Aceleración de la gravedad ($9,81 m/s^2$)
- H = Distancia vertical entre las aberturas inferior y superior (m)
- uw = Velocidad del viento a la altura referenciada (m/s)

Para este “*efecto succión*”, el valor de la fuerza impulsora producida es la diferencia de densidad del aire como consecuencia del gradiente de temperaturas existente. La Norma UNE EN 60079-10-1, propone expresiones para el cálculo²¹⁰.

Para un gradiente de temperatura en el que la temperatura exterior es igual a la interior, el Caudal Volumétrico de Aire se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$Q_a = C_d \cdot A_e \cdot \sqrt{\frac{\Delta T}{(T_{in} + T_{out})}} \cdot g \cdot H \quad 4.24$$

Ecuación 124. Caudal de Aire Inducido por la Flotabilidad

Donde:

- Q_a = Caudal Volumétrico de Aire (m^3/s)
- C_d = Coeficiente de Descarga Adimensional, característico de grades aberturas para ventilación, y que tiene en cuenta la turbulencia y la viscosidad. El valor tipo está comprendido entre 0,5 y 0,7
- A_e = Área efectiva equivalente de las aberturas (m^2)
- ΔT = Diferencia entre la temperatura exterior e interior (K)
- T_{in} = Temperatura Interior (K)
- T_{out} = Temperatura Exterior (K)
- g = Aceleración de la gravedad ($9,81 m/s^2$)
- H = Distancia vertical entre los puntos de aberturas inferior y superior (m)

Esta ecuación permite obtener resultados razonables únicamente para recintos con aberturas de entrada y salida colocadas en paredes opuestas entre sí, y con pocas o ninguna obstrucción que puedan impedir el flujo de aire. Además, y aquí reside el problema de los valores obtenidos, si la distancia vertical entre los puntos medidos de las aberturas superior e inferior H es pequeño, y la distancia horizontal grande, entonces la ventilación inducida por flotabilidad se reduce y el cálculo deja de ser preciso.

Como se puede observar, el Caudal Volumétrico de Aire depende de la diferencia de temperaturas interior y exterior. Este parámetro es muy variable, y

²¹⁰ EN 60079-10-1:2022 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

en el caso que nos ocupa, tiende a cero, ya que, en el caso de que las ventanas se encontraran abiertas, su valor es cero al no existir diferencia de temperatura y, como consecuencia, un gradiente entre el interior y el exterior del recinto. Como se ha indicado en apartados anteriores, la ventilación del recinto es la suma de la ventilación producida por el viento y la inducida por la flotabilidad.

$$Q_w = Q_{aw} + Q_a \quad 4.25$$

Ecuación 135. Caudal de Aire Total por Ventilación Natural del Recinto

Donde:

- Q_w = Caudal Volumétrico de Aire que entra en el recinto (m^3/s)

4.4.1.3 Determinación de la dilución

Para conocer el nivel de dilución, se considera la sección perpendicular a las ventanas del recinto, en función de su localización, además de los Caudales de Ventilación obtenidos anteriormente. Para ello, se aplicarán las especificaciones técnicas de la Norma UNE EN 202007:IN²¹¹ para los huecos de ventana, y la Norma UNE EN 60079:10-1²¹² para las puertas. Para determinar la velocidad de aire en la sección perpendicular a la ubicación de las aberturas de ventilación, se utiliza la siguiente expresión:

$$u_w = \frac{Q_w}{S} \quad 4.26$$

Ecuación 4.26. Velocidad de Aire en el Interior

Donde:

- U_w = Velocidad del Aire (m/s)
- Q_w = Caudal Volumétrico de Aire (m^3/s)
- S = Superficie perpendicular a las aberturas de ventilación (m^2)

También se puede utilizar como parámetro la Renovación de Cambios por Hora (ACH), expresada en h^{-1} . La propia Metodología Steady State CO_2 ²¹³, establece como objetivo posibilitar, al menos, 5 renovaciones de aire por hora.

De acuerdo con las especificaciones técnicas de la Norma UNE-EN- 60079-10-1²¹⁴, la relación entre el Caudal Mínimo en Volumen de Aire Fresco ($Q_{min.}$) y el

²¹¹ EN 202007:2006 IN Application Guide of EN 60079-10. Electrical Apparatus for Explosive Gas Atmospheres. Classification of Hazardous Areas. European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium, 2006.

²¹² EN 60079-10-1:2022 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

²¹³ Allen, J., Spengler, J., Jones, E., Cedeno-Laurent, J. (2020) How School Buildings Influence Student Health. Thinking and Performance. Harvard T.H. Chan Healthy Buildings Program. Cambridge, United States. <https://schools.forhealth.org/>

²¹⁴ EN 60079-10-1:2022 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

CAPÍTULO 4

Caudal Real de Ventilación en el espacio considerado (V_o) en las proximidades de la persona que se encuentra emitiendo, puede expresarse como un volumen (V_k), aplicando la siguiente expresión:

$$V_k = \frac{Q_{\min}}{C} \quad 4.27$$

Ecuación 4.27. Volumen Interior Contaminado

Donde:

- V_k = Volumen contaminado (m^3)
- C = Número de renovaciones de aire por unidad de tiempo (s^{-1}) y es dado por
- $Q_{\min.}$ = Caudal mínimo en volumen de aire fresco (volumen por unidad de tiempo, m^3/s)

$$C = \frac{Q}{V_o} \quad 4.28$$

Ecuación 4.28. Número de Renovaciones de Aire del Recinto Considerado

Donde:

- C = Número de renovaciones de aire por unidad de tiempo (s^{-1}) y es dado por
- Q = Caudal de aire fresco a través del espacio considerado
- V_o = Volumen total (en el dominio de la planta) servido por la ventilación real en las proximidades del emisor

De esta forma, es posible obtener el número de renovaciones de aire del recinto considerado. Es necesario indicar que la renovación de aire (ACH), expresada en h^{-1} , implica considerar que, en una hora, entra en el recinto un volumen de aire exterior igual al volumen del recinto. No obstante, como consecuencia de la mezcla simultánea de aire interior/exterior, solo se produce un 63,0% real de reemplazo.

Disponiendo únicamente de ventilación natural y aplicando los caudales de ventilación establecidos por persona, es posible determinar una ocupación del recinto, tomando como referencia el parámetro de las renovaciones de aire producidas en el recinto.

4.4.1.4 Método de Cálculo: Aplicación a la Sala de Plenos del Ayuntamiento de Móstoles

A continuación, se muestra un ejemplo de aplicación del método diseñado en la investigación, correspondiente a un recinto de ventilación natural: el Salón de Plenos del Ayuntamiento de Móstoles.

El Salón de Plenos se ubica en el interior de un edificio ventilado de forma natural por viento. La disponibilidad del caudal de aire se considera aceptable, considerando las peores condiciones ambientales (velocidad de aire en condiciones de calma meteorológica).

En el estudio realizado, se analiza por separado la ventilación, mediante el estudio del mecanismo por el que el aire entra y sale de un recinto cerrado, y la dispersión, analizando cómo se diluye la nube de gas en el interior.

En situaciones de exposición al aire libre, la velocidad de viento queda definida en la Norma UNE EN 60079-10-1²¹⁵, considerando en emplazamiento del recinto y la densidad relativa del gas, o bien aplicando 1/10 de la velocidad del flujo de aire libre habitual por encima de la instalación.

Como se dispone de registros concretos de la velocidad del viento, se utilizará la velocidad propuesta en la Norma UNE EN 202007:IN²¹⁶, donde se establece que, para la Clasificación de Zonas Peligrosas, la velocidad a considerar es de 0,5 m/s es la velocidad, siempre que el volumen a ventilar sea significativamente superior a un cubo de 15,0 m de lado.

El Salón de Plenos del Ayuntamiento de Móstoles tiene una superficie aproximada de 110,0 m² y una altura de 3,0 m, y dispone de tres puertas de acceso localizadas en una pared frontal, con una superficie unitaria de 3,0 m².

La ventilación del recinto es natural, mediante aperturas de ventanas de doble hoja localizadas en paredes opuestas. Sus dimensiones son las siguientes: Dos ventanas con una superficie por hoja de 36,0 cm², enfrentadas con otras dos ventanas en la pared opuesta. Una de ellas tiene las mismas características, 36,0 cm² por hoja, mientras la segunda dispone de una superficie por hoja de 0,80 cm². Esta última ventana es también batiente, permitiendo una longitud de apertura máxima de 17,0 cm.

a) Ventilación inducida por el viento

Para los cálculos, se asume que el flujo de aire se produce a través de las aberturas diseñadas para la ventilación, y no se consideran los flujos inducidos por infiltración. No obstante, en este caso, se establece que la ventilación se produce a través de las ventanas y puertas. Los cálculos están basados tomando como referencia el viento inducido por diferencia de presión entre los lados de barlovento y sotavento del edificio.

La velocidad de aire considerada en el pasillo exterior al Salón De Plenos está comprendida entre 0,05 m/s y 0,15 m/s. Estos valores corresponden a recintos cerrados donde se toman medidas para el bienestar de las personas. En este caso, al no disponer de registros del sistema de climatización del

²¹⁵ EN 60079-10-1:2022 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

²¹⁶ EN 202007:2006 IN Application Guide of EN 60079-10. Electrical Apparatus for Explosive Gas Atmospheres. Classification of Hazardous Areas. European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium.

edificio, se toma el valor de 0,05 m/s. Cabe indicar que la propia Norma UNE EN 202007:IN²¹⁷, para los recintos interiores poco ventilados establece como valor directamente aplicable una velocidad de 0,05 m/s.

Se obtiene el flujo de aire y el área efectiva de ventilación, mediante la siguientes las fórmulas 20 y 21, respectivamente.

Considerando que todas las ventanas del recinto se encuentren abiertas, se utiliza la siguiente expresión:

$$A_e = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,44^2 \cdot 2,32^2}{1,44^2 + 2,32^2}} = 1,73 \text{ m}^2$$

Los resultados obtenidos, para todas las posibilidades de apertura, son los siguientes (Tabla 4.5):

Tabla 10.5. Área de Ventilación Efectiva

Situación Analizada	Superficie (m²)		
	A1	A2	Ae
Todas las ventanas abiertas (ambas hojas)	1,44	2,32	1,73
Todas las ventanas abiertas (sola una hoja)	0,72	1,16	0,86
Todas las ventanas abiertas (una sola hoja excepto la batiente: posición batida)	1,44	1,32	1,37
Una ventana abierta, ambas hojas, en cada pared	0,72	1,6	0,93
Una ventana abierta, una hoja, en cada pared	0,36	0,8	0,46

Aplicando la expresión del flujo de aire (Tabla 4.6):

$$Q_{aw} = 0,65 \cdot 1,73 \cdot 0,5 \sqrt{\frac{0,1}{2}} = 0,126 \text{ m}^3/\text{s}$$

²¹⁷ EN 202007:2006 IN Application Guide of EN 60079-10. Electrical Apparatus for Explosive Gas Atmospheres. Classification of Hazardous Areas. European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium.

Tabla 11.6. Caudal Volumétrico de Aire en la Sala de Plenos

Situación Analizada	Q _{aw} (m ³ /s)
Todas las ventanas abiertas (ambas hojas)	0,126
Todas las ventanas abiertas (sola una hoja)	0,062
Todas las ventanas abiertas (una sola hoja excepto la batiente: posición batida)	0,100
Una ventana abierta, ambas hojas, en cada pared	0,067
Una ventana abierta, una hoja, en cada pared	0,033

Si bien la expresión general del cálculo del caudal de viento es la misma que en la Norma UNE EN 202007:IN²¹⁸, en esta última se presentan procedimientos de cálculo más desarrollados.

Para ambientes cerrados, con aberturas de ventilación localizadas en la parte alta y baja situadas en un solo lado, se utiliza la siguiente expresión:

$$Q_{aw} = 0,025 \cdot (A_1 + A_2) \cdot w$$

$$Q_{aw} = 0,025 \cdot (3 + 0) \cdot 0,05 = 3,75 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

A la vista de los resultados obtenidos, no se considerarán las puertas como posibles aperturas de ventilación.

b) Ventilación inducida por la flotabilidad

El “*efecto succión*” de la ventilación inducida por la flotabilidad tiene lugar por el movimiento del aire producido por la diferencia entre la temperatura entre el interior y exterior del recinto. La fuerza impulsora es la diferencia de densidad del aire, originada por el gradiente de temperaturas. La Norma UNE EN 60079-10-1²¹⁹, propone expresiones para el cálculo.

Para un gradiente de temperatura, suponiendo que la temperatura exterior es igual a la interior, el caudal volumétrico del aire se obtiene mediante la [Ecuación 4.12](#). Esta ecuación da resultados razonables únicamente para salas con aberturas de entrada y salida colocadas en paredes opuestas entre sí, y con pocas o ninguna obstrucción que puedan impedir el flujo de aire. Además, y aquí reside el problema de los valores obtenidos, si la distancia vertical entre los puntos medidos de las aberturas

²¹⁸ EN 202007:2006 IN Application Guide of EN 60079-10. Electrical Apparatus for Explosive Gas Atmospheres. Classification of Hazardous Areas. European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium.

²¹⁹ EN 60079-10-1:2022 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

superior e inferior H es pequeño, y la distancia horizontal grande, entonces la ventilación inducida por flotabilidad se reduce y el cálculo deja de ser preciso.

Se puede observar que el caudal volumétrico de aire depende de la diferencia de temperaturas interior y exterior, parámetro de gran variabilidad. En el caso que nos ocupa, tiende a cero, ya que las ventanas se encontrarán abiertas y, en consecuencia, no se producirá un gradiente de temperaturas importante, entre el exterior y el interior del recinto.

c) Determinación de la dilución

Para la determinación de la dilución, se aplican las prescripciones técnicas de la Norma UNE 202007:IN²²⁰ para las ventanas y la Norma UNE EN 60079:10-1 para las puertas. Para ello, se considera la sección perpendicular a la ubicación de las ventanas de la Sala de Plenos, 18,0 m², y los caudales de ventilación obtenidos anteriormente.

La velocidad de aire en la sección perpendicular a la ubicación de las aberturas de ventilación se obtiene mediante la [Ecuación 26](#). Su aplicación, cuando la totalidad de las ventanas tengan abiertas ambas hojas, es la siguiente ([Tabla 4.7](#)):

$$u_w = \frac{0,126}{18} = 7,00 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

Tabla 12.7. Velocidad de Aire en la Sala de Plenos

Situación Analizada	u_w (m/s)
Todas las ventanas abiertas (ambas hojas)	0,007
Todas las ventanas abiertas (sola una hoja)	0,003
Todas las ventanas abiertas (una sola hoja excepto la batiente: posición batida)	0,006
Una ventana abierta, ambas hojas, en cada pared	0,004
Una ventana abierta, una hoja, en cada pared	0,002

d) Aplicación parámetros ventilación

En la [Tabla 4.8](#) se muestra la ocupación estimada de la Sala de Plenos, teniendo en cuenta los caudales volumétricos de aire anteriormente obtenidos y aplicando únicamente ventilación natural.

²²⁰ EN 202007:2006 IN Application Guide of EN 60079-10. Electrical Apparatus for Explosive Gas Atmospheres. Classification of Hazardous Areas. European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium.

Tabla 13.8. Ocupación de la Sala de Plenos

Situación Analizada	Modelo Harvard	% Respecto del Límite Establecido		
		75%	50%	25 %
Todas las ventanas abiertas (ambas hojas)	9	8	7	6
Todas las ventanas abiertas (sola una hoja)	4	4	3	3
Todas las ventanas abiertas (una sola hoja excepto la batiente: posición batida)	7	6	5	4
Una ventana abierta, ambas hojas, en cada pared	5	4	3	3
Una ventana abierta, una hoja, en cada pared	2	2	2	1

La Metodología *Steady State* CO₂ toma con referencia para el estudio el número de renovaciones por hora ACH (*Air Changes per Hour*), que permite medir la renovación del aire en un volumen dado, por unidad de tiempo. Se expresa en h⁻¹, y el objetivo es, al menos, poder realizar 5 renovaciones de aire por hora.

La relación entre el valor calculado del caudal mínimo en volumen de aire fresco (dV/dt)_{min.} y el caudal real de ventilación en el espacio considerado (V_o) en las proximidades de la persona que se encuentra emitiendo, puede expresarse como un volumen (V_k).

$$V_k = \frac{\left(\frac{dV}{dt}\right)_{\min}}{C} \quad 4.29$$

Ecuación 4.29. Volumen de Aire Fresco en la Proximidad de la Emisión

Donde:

- C = Número de renovaciones de aire por unidad de tiempo (s⁻¹) y es dado por
- (dV/dt)_{min.} = Caudal mínimo en volumen de aire fresco (volumen por unidad de tiempo, m³/s)

$$C = \frac{dV_o/dt}{V_o} \quad 4.30$$

Ecuación 4.30. Número de Renovaciones de Aire del Recinto

Donde:

- dV_o/dt = Caudal de aire fresco a través del espacio considerado
- V_o = Volumen total (en el dominio de la planta) servido por la ventilación real en las proximidades del emisor

Teniendo en cuenta que el volumen del Salón de Plenos es de 330,0 m³, aplicado al caso de mantener en la totalidad de las ventanas abiertas ambas hojas, se obtiene:

$$C = \frac{0,126 \cdot 3600}{330} = 1,37 \text{ h}^{-1}$$

Las renovaciones de aire del recinto, como consecuencia de la ventilación natural, son las siguientes (Tabla 4.9):

Tabla 14.9. Renovaciones de Aire de la Sala de Plenos

Situación Analizada	C (h ⁻¹)
Todas las ventanas abiertas (ambas hojas)	1,37
Todas las ventanas abiertas (sola una hoja)	0,67
Todas las ventanas abiertas (una sola hoja excepto la batiente: posición batida)	0,10
Una ventana abierta, ambas hojas, en cada pared	1,09
Una ventana abierta, una hoja, en cada pared	0,36

Cabe señalar que la renovación de aire por hora (ACH), expresada en h⁻¹, implica que, en el tiempo de una hora, entra en el recinto un volumen de aire exterior igual al volumen del recinto, pero que, debido al proceso simultáneo de la mezcla de aire, solo el 63,0% del aire interior se ha reemplazado por aire exterior.

Como conclusión, se puede afirmar que, disponiendo únicamente de ventilación natural, aplicando los caudales de ventilación establecidos por persona, es posible determinar la ocupación del recinto. No obstante, atendiendo al criterio de renovaciones de aire establecido en el Método *Steady State* CO₂, propuesto por la Universidad de Harvard, incluso manteniendo la totalidad de las ventanas abiertas, no se consigue cumplir con el objetivo que establece, es decir, producir, al menos, 5 renovaciones de aire por hora.

4.4.1.5 Método de cálculo: Aplicación a la Biblioteca Central Almudena Grandes. Ventilación inducida por flotabilidad

Como ejemplo de aplicación se muestra la ventilación aportada por la corriente de aire ascendente en el vestíbulo de la Biblioteca Central Almudena Grandes de Móstoles en invierno. Para ello, se contempla una temperatura media en el interior del edificio de 22,0 °C, y en el exterior de 5,0 °C.

Disponiendo solo de una apertura cenital de 1 m² a través de los exutorios, el caudal de aire es el siguiente:

$$Q_a = 0,76 \cdot \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{17}{278} \cdot 2 \cdot 9,8 \cdot \frac{20}{4} + 0,05 \cdot 1^2}$$

$$Q_a = 0,934 \text{ m}^3/\text{s}$$

Incorporando la apertura de la puerta del edificio, el caudal aumenta de forma significativa²²¹:

$$Q_a = 0,5 \cdot 3,32 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot 17}{573} \cdot 9,8 \cdot 20} = 12,00 \text{ m}^3/\text{s}$$

En esas condiciones ambientales, la corriente ascendente de aire en el vestíbulo de 112,0 m² la biblioteca tiene una velocidad de:

$$u_w = \frac{12,00}{112} = 0,11 \text{ m/s}$$

4.4.2 Estrategia en exteriores

En el cálculo de la ventilación en exteriores se utiliza como punto de partida, los datos ofrecidos como caudal de aire seguro obtenidos, teniendo en cuenta la actividad desarrollada, mediante la norma UNE-EN 8996:21²²².

4.4.2.1 Ventilación en exteriores: aire libre

Los espacios abiertos se caracterizan por el hecho de tener un volumen ilimitado, y por ser infinitamente receptivos a sustancias introducidas en la atmósfera, por lo que el riesgo de infección se localiza solamente en el entorno del emisor, no en los espacios alejados. Al aire libre, velocidades de viento muy bajas determinan un número elevado de cambios de aire.

La Norma UNE EN 202007:2006 IN²²³, propone un número de renovaciones de aire en exteriores de 0,03 s⁻¹, tomando como referencia para los cálculos una velocidad de viento de 0,5 m/s. Como consecuencia, la referida norma En consecuencia, la citada norma considera que la dilución producida es muy alta, sobre todo en ausencia de obstáculos que pudieran reducir la eficacia de la dilución de las emisiones producidas por una persona contagiada. Propone la siguiente expresión:

$$V_z = \frac{Q_{\min}}{0,03} = \frac{Q_{a \min}}{0,03} \quad 4.31$$

Ecuación 4.31. Volumen de Referencia a Ventilar en Exteriores

Donde:

²²¹ EN 60079-10-1:532022 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

²²² EN 8996:2021 Ergonomics of the thermal environment - Determination of metabolic rate. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

²²³ EN 202007:2006 IN Application Guide of EN 60079-10. Electrical Apparatus for Explosive Gas Atmospheres. Classification of Hazardous Areas. European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium.

CAPÍTULO 4

- $Q_{a \min}$ = Caudal de aire (m^3/s)
- V_z = Volumen del cubo de referencia o volumen total a ventilar (m^3)
- $Q_{\min}$ = Caudal mínimo en volumen de aire fresco (m^3/s)
- Se considera el número de renovaciones de aire por unidad de tiempo, de la siguiente manera:

$$C_0 = \frac{Q}{V_0} \quad 4.32$$

Ecuación 4.32. Número de Renovaciones de Aire en Exteriores

Donde:

- C_a = Número de renovaciones de aire por unidad de tiempo (s^{-1})
- Q = caudal de aire fresco a través del espacio considerado (m^3/s)
- V_0 = Volumen considerado (m^3)

La Norma UNE EN 202007 IN también establece para una velocidad de viento de 0,5 m/s, un cubo teórico de 15,0 m de lado al aire libre, de forma que permite obtener las renovaciones de aire previstas en el exterior. La norma considera que este cubo puede ser considerado el volumen total a ventilar V_0 .

$$C_0 = \frac{Q_a}{V_0} = \frac{w \cdot A_w}{V_0} = \frac{w \cdot L_0^2}{L_0^3} = \frac{w}{L_0} \quad 4.33$$

Ecuación 4.33. Tamaño del Volumen a Ventilar en Exteriores

Donde:

- Q_a = Caudal de aire (m^3/s)
- V_0 = Volumen del cubo de referencia o volumen total a ventilar (m^3)
- W = Velocidad de aire (m/s)
- A_w = Área del plano atravesado por el aire en el interior del cubo, es decir, la sección transversal (m^2)
- L_0 = Lado del cubo considerado, o la longitud del recorrido del aire en el interior del volumen a ventilar V_0 (m)

$$L_0 = \frac{w}{C_0} = \frac{0,5}{0,03} = 15 \text{ m}$$

4.4.2.2 Aplicación de los parámetros de ventilación en exteriores y obtención de la ocupación teórica

Aplicando los parámetros de ventilación en exteriores, se obtiene la ocupación teórica para la prevención de la propagación y contagios del SARS-CoV-2, en función de la actividad desarrollada, de la siguiente forma²²⁴:

$$V_z = \frac{f \cdot Q_{\min}}{0,03} = \frac{Q_{a \min}}{0,03}$$

²²⁴ EN 202007:2006 IN Application Guide of EN 60079-10. Electrical Apparatus for Explosive Gas Atmospheres. Classification of Hazardous Areas. European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium.

Donde:

- **f** = Factor de Eficacia de la Ventilación, que varía entre 1 y 5, considerando el valor de 5 en ambientes abiertos con presencia de un número muy elevado de impedimentos a la libre circulación del aire que puede reducir mucho su capacidad efectiva de dilución. UNE EN 60079-10

Se determina el número de personas emitiendo dióxido de carbono dentro del volumen considerado en el exterior, teniendo en cuenta los valores límite, propuestos con anterioridad.

$$15^3 = 5 \cdot \frac{Q_{a \min}}{0,03} \rightarrow Q_{a \min} = 20,25 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\frac{Q_{\text{requerido}}}{10^3} \cdot n^{\circ} \text{ personas emitiendo} = Q_{a \min}$$

La superficie considerada es un cuadrado de 15 metros de lado, en consecuencia:

$$n^{\circ} \text{ personas emitiendo por metro cuadrado} = \frac{n^{\circ} \text{ personas emitiendo}}{15^2}$$

La ocupación teórica en el exterior se obtiene mediante la expresión:

$$\text{Ocupación teórica por metro cuadrado} = \frac{90}{Q_{\text{requerido}}} \quad 4.34$$

Ecuación 4.34. Ocupación Teórica en Exteriores

El CO₂ es un gas 1,5 veces más pesado que el aire, por lo que la Norma UNE EN 60079-10²²⁵ establece que para gases con una densidad relativa inferior a 0,8, se considera seguro suponer que la velocidad de ventilación eficaz es al menos 0,5 m/s en situaciones al aire libre, mientras que para gases con una densidad relativa superior a 1,0, la velocidad de ventilación efectiva debe de ser reducida por un factor de 2. De igual forma, tal y como se muestra en las Tablas 4.10 y 4.11, en esta norma establece las velocidades de aire en exteriores en función de la altura respecto al suelo en la que se sitúen las personas en el recinto ([Tabla 4.10 y 4.11](#)).

²²⁵ EN 60079-10-1:2022 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

CAPÍTULO 4

Tabla 15.10. Velocidades de Aire en Exteriores: Dilución efectiva gases más ligeros que el aire²²⁶

Emplazamientos sin obstáculos			Emplazamientos con obstáculos		
≤ 2 m	> 2 m hasta 5 m	> 5 m	≤ 2 m	> 2 m hasta 5 m	> 5 m
0,5 m/s	1 m/s	2 m/s	0,5 m/s	0,5 m/s	1 m/s

Tabla 16.11. Velocidades de aire en exteriores: Dilución efectiva gases más ligeros que el aire²²⁷

Emplazamientos Sin Obstáculos			Emplazamientos Con Obstáculos		
≤ 2 m	>2 m hasta 5 m	> 5 m	≤ 2 m	>2 m hasta 5 m	> 5 m
0,3 m/s	0,6 m/s	1 m/s	0,15 m/s	0,3 m/s	1 m/s

Teniendo en cuenta los valores de velocidad de aire en el exterior propuestos en la Norma UNE EN 60079-10, y la Teoría del Cubo establecida en la Norma UNE EN 202007 IN, se determina la ocupación de los recintos para distintas alturas.

$$L_0 = \frac{w}{C_0} \rightarrow C_0 = \frac{w}{15}$$

$$15^3 = 5 \cdot \frac{Q_{a \min}}{C_0} \rightarrow Q_{a \min} = 45 \cdot w \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Ocupación teórica por metro cuadrado} = 200 \cdot \frac{w}{Q_{\text{requerido}}} \quad 4.35$$

Ecuación 4.35. Ocupación Teórica en Exteriores dependiente de la Velocidad de Aire

En las actividades desarrolladas en el exterior, se establece directamente la densidad de ocupación por actividad realizada por comparación con el valor de referencia $Q_{\text{requerido}}$, específico para cada actividad desarrollada (Tabla 4.3 y 4.4), con los parámetros de ventilación establecidos en la Norma UNE EN 202007 IN²²⁸ y la Norma UNE EN 60079-10 (Tabla 4.10).

Para una actividad en la que el público se encuentra en pie, la ocupación teórica máxima para cumplir con los requisitos de calidad de aire correspondientes a una Categoría IDA2²²⁹, mediante la ventilación propuesta en la Norma UNE EN 202007 IN (AENOR, 2006), se obtiene de la siguiente forma:

²²⁶ EN 60079-10-1:2022 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

²²⁷ EN 60079-10-1:2022 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

²²⁸ EN 202007:2006 IN Application Guide of EN 60079-10. Electrical Apparatus for Explosive Gas Atmospheres. Classification of Hazardous Areas. European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium.

²²⁹ Ministerio de la Presidencia (2021). Real Decreto 178/2001 de Modificación del Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE). Gobierno de España. Madrid, España.
<https://www.boe.es/eli/es/rd/2021/03/23/178/dof/spa/pdf>

Ocupación teórica por metro cuadrado = $200 \cdot \frac{0,5}{12,72}$

Ocupación teórica por metro cuadrado = 7,86

Aplicando la Norma UNE EN 60079-10, se obtiene dos ocupaciones teóricas, debido a que la densidad relativa del monóxido de carbono en aire no se corresponde con ninguno de los supuestos que la norma establece, además ofrece valores de velocidad de aire para diferentes alturas, lo que permite ajustar el cálculo para terrazas y balcones.

La ocupación teórica obtenida para las distintas actividades que se pueden desarrollar al aire libre, de forma que se cumpla para la mencionada Categoría IDA2, en función de la velocidad de aire estimada, es la siguiente (Tabla 4.12):

Tabla 17.12. Ocupación Teórica en Exterior en Función de la Velocidad de Aire (Calidad IDA2)

Tipo de actividad	Velocidad de Aire Estimada (m/s)					
	0,15	0,30	0,50	0,60	1,00	2,00
Sentado	3,33	6,67	11,11	13,33	22,22	44,44
En pie	2,34	4,69	7,86	9,38	15,63	31,25
Paseando (1,6 Km/h)	2,34	4,69	7,86	9,38	15,63	31,25
Actividad Ligera	1,81	3,61	6,02	7,23	12,05	24,10
Bailar	1,43	2,86	4,76	5,71	9,52	19,05
Actividad Moderada	1,43	2,86	4,76	5,71	9,52	19,05
Andar (5 Km/h)	1,18	2,36	3,94	4,72	7,87	15,75
Actividad Pesada	1,03	2,05	3,42	4,11	6,85	13,70
Actividad Gimnastica de Recreo	0,91	1,82	3,03	3,64	6,06	12,12
Deporte de Equipo / Nadar	0,79	1,57	2,62	3,14	5,24	10,47

Considerando solo las especificaciones técnicas de la Norma UNE EN 202007 IN²³⁰, se obtienen los siguientes resultados (Figura 4.1):

²³⁰ EN 202007:2006 IN Application Guide of EN 60079-10. Electrical Apparatus for Explosive Gas Atmospheres. Classification of Hazardous Areas. European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium.

CAPÍTULO 4

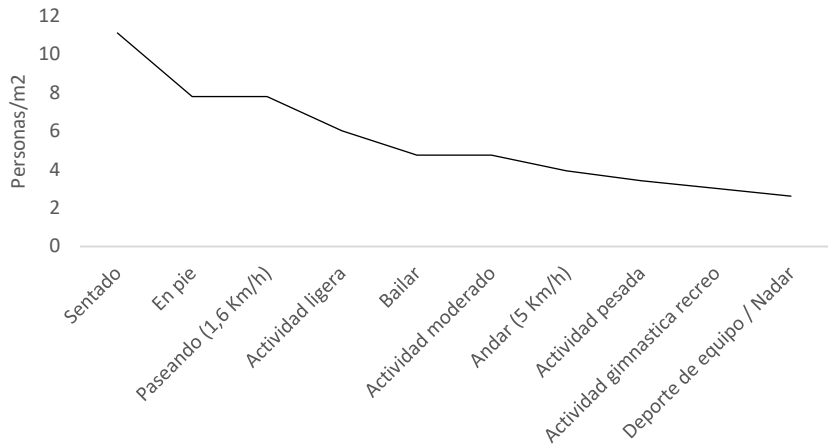


Figura 9. Comportamiento a Nivel de Suelo, Norma UNE EN 202007IN

Si solo se tienen en cuenta las consideraciones de la Norma UNE EN 60079-10²³¹, se obtiene dos ocupaciones teóricas, debido a que la densidad relativa del monóxido de carbono en aire no se corresponde con ninguno de los supuestos que la norma establece. Además, ofrece valores de velocidad de aire para diferentes alturas, lo que permite ajustar el cálculo para terrazas y balcones (Figura 4.2 y 4.3).

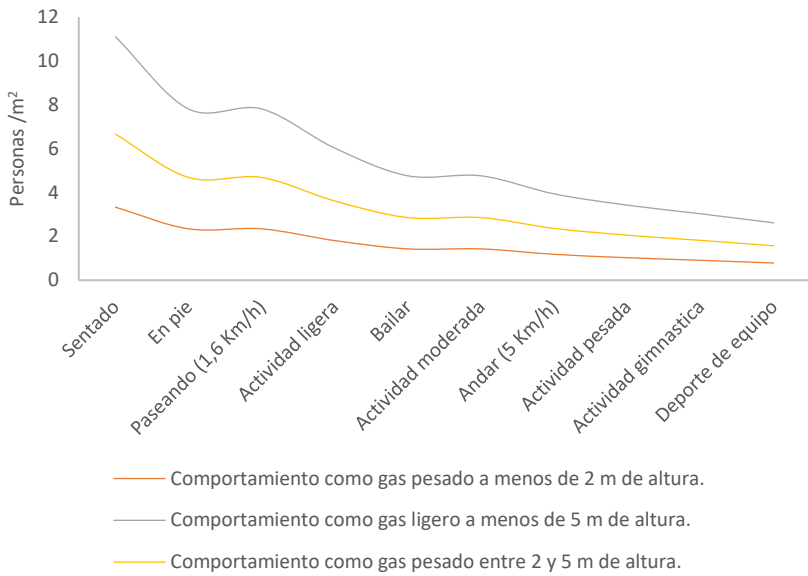


Figura 10. Comportamiento en altura (< 5,0 m sobre el suelo) Norma UNE EN 60079-10

²³¹ EN 60079-10-1:2022 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

Asimilando el comportamiento del CO₂ a un gas pesado, los valores de ocupación obtenidos son inferiores, debido a que la ventilación es menos eficaz, por otra parte, asimilándolo a un gas ligero su dilución es estable hasta una altura de cinco metros.

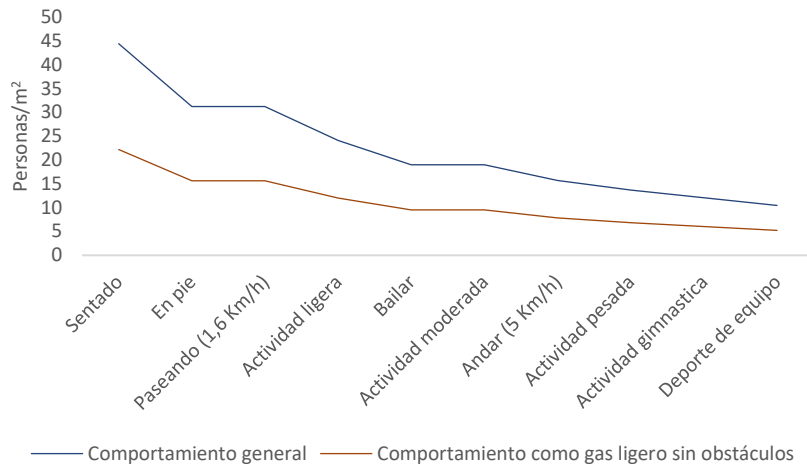


Figura 11. Comportamiento en altura (> 5,0 m sobre el suelo) Norma UNE EN 60079-10

Se puede observar que el gas siempre ofrece el mismo comportamiento a más de cinco metros de altura, excepto cuando se considera un gas pesado sin obstáculos.

Los resultados obtenidos de densidad de ocupación al aire libre, utilizando los diferentes límites propuestos para poder controlar una crisis sanitaria a través de la calidad de aire, se muestran en el Capítulo 6: densidad de ocupación al aire libre mediante la aplicación de la Norma UNE EN 202007 IN²³², densidad de ocupación a menos de dos metros de altura, entre dos y cinco metros y a más de cinco metros de altura en emplazamientos con obstáculos y a más de cinco metros de altura sin obstáculos, conforme a la Norma UNE EN 60079-10²³³ (Figura 6.1 a 6.9). Teniendo en cuenta que se establece una densidad de ocupación para recintos con espectadores en pie de 0,25 m²/persona y en discotecas de 0,5 m²/persona²³⁴, la densidad máxima en un evento multitudinario será de cuatro personas por metro cuadrado. En consecuencia, en

²³² EN 202007:2006 IN Application Guide of EN 60079-10. Electrical Apparatus for Explosive Gas Atmospheres. Classification of Hazardous Areas. European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium.

²³³ EN 60079-10-1:2022 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

²³⁴ Ministerio de Vivienda (2006) Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. Gobierno de España. Madrid, España.
<https://www.boe.es/eli/es/rd/2006/03/17/314>

una localización situada a una altura superior a cinco metros, no se produciría la transmisión del SARS-CoV-2 en eventos de ocio.

4.4.2.3 Aplicación del método a otros patógeno o sustancias peligrosas, que se transmitan por el aire: Concentración de Fondo

En el caso que nos ocupa, la concentración del patógeno en el aire exhalado por las personas es pequeña. Además, este aire tenderá a moverse junto con la masa general del aire del recinto, por lo que mostrará un comportamiento neutro respecto a la misma.

Partiendo del volumen consumido de oxígeno durante la realización de una tarea sedentaria, mediante la aplicación de la Norma UNE EN 8996:21²³⁵ se obtiene el volumen de aire inhalado por el individuo. Como se ha mencionado anteriormente, el consumo metabólico del individuo, realizando un ejercicio ligero, es de 70,0 W/m². La referida norma considera que la concentración del aire en oxígeno es 20,09 %, mientras que la fracción de oxígeno en el aire espirado es de 16,20 %.

$$M = EE \cdot V_{O_2} \cdot \frac{1}{a_{Du}}$$

$$70 = 5,68 \cdot V_{O_2} \cdot \frac{1}{1,8} \Rightarrow V_{O_2} = 22,18 \text{ l/h}$$

$$V_{O_2} = V_{ext}(0,209 - F_{O_2})$$

$$22,18 = V_{ext} \cdot (0,209 - 0,162) \Rightarrow V_{ext} = 471,91 \text{ l/h}$$

$$V_{O_2} = V_{ext}(0,209 - 0,162)$$

La concentración de fondo (vol/vol), se puede evaluar como:

$$X_b = \frac{Q_g}{Q_g + Q_1} \quad 4.36$$

Ecuación 4.36. Concentración de Fondo

Donde:

- X_b = Concentración de Fondo (vol/vol)
- Q_g = Caudal Volumétrico de Aire Exhalado (l/s)
- Q_1 = Caudal Volumétrico de Ventilación (l/s)

La concentración crítica está relacionada con la concentración peligrosa del SARS-CoV-2, mediante la siguiente expresión:

²³⁵ EN 8996:2021 Ergonomics of the thermal environment - Determination of metabolic rate. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

$$X_{\text{crit}} = 0,25 \cdot C_{\text{peligrosa}} \quad 4.37$$

Ecuación 4.37. Concentración Crítica

Donde:

- X_{crit} = Concentración crítica (vol/vol)
- $C_{\text{peligrosa}}$ = Concentración peligrosa del SARS-CoV-2 (vol/vol)

Se implementa el criterio de igualdad entre la concentración de fondo y la concentración crítica, teniendo en cuenta que el parámetro de caudal requerido al 75 % tiene incorporado el concepto de la concentración crítica.

$$\begin{aligned}
 X_b &> X_{\text{crit}} \\
 X_b = X_{\text{crit}} &\Rightarrow \frac{V_{\text{ext}}}{Q_{\text{valor límite}}} = 0,25 \cdot C_{\text{peligrosa}} \\
 X_b = X_{\text{crit}} &\Rightarrow \frac{V_{\text{ext}}}{Q_{\text{requerido } 75\%}} = C_{\text{peligrosa}} \\
 X_b = X_{\text{crit}} &\Rightarrow \frac{471,91/3600}{19,56} = C_{\text{peligrosa}} \\
 C_{\text{peligrosa}} &= 6,70 \cdot 10^{-3} \text{ vol./vol.}
 \end{aligned}$$

La comparación directa entre la concentración peligrosa en el aire del SARS-CoV-2 (vol/vol) y el patógeno o sustancia peligrosa que se quiera controlar, permite la aplicación del método presentado para su control.



5

Capítulo
RESULTADOS EN
AMBIENTES
INTERIORES

CAPÍTULO 5: RESULTADOS EN AMBIENTES INTERIORES

Los datos de superficie, caudal de ventilación, así como el número de casos positivos de contagio que han sufrido los trabajadores municipales, han sido facilitados por el Excmo. Ayuntamiento de Móstoles.

La ocupación media de cada recinto se ha estimado de diferentes formas. Por una parte, la Concejalía de Deportes elabora estadísticas de asistencia en todas las actividades deportivas ofrecidas por el Ayuntamiento de Móstoles. Por otra, los centros de acceso al público disponen de aforos máximos adaptados a la nueva realidad de la Pandemia COVID-19, y los trabajadores municipales combinan el teletrabajo con el trabajo presencial, de forma que los aforos sean adecuados a la ventilación disponible en cada recinto.

Se distinguen tres tipos de recintos, aquellos que disponen únicamente de ventilación artificial, los que además de disponer de ventilación artificial cuentan con ventilación natural y los que únicamente cuentan con ventilación natural.

A continuación, se muestra el proceso de cálculo llevado a cabo mediante la aplicación de las ecuaciones expuestas para el caso. Los resultados obtenidos en los centros municipales se muestran en el Capítulo 5, en concreto, los centros que cuentan con ventilación controlada (Tabla 5.1 a 5.12), aquellos que cuentan con ventilación forzada y ventanas practicables (ventilación natural) (Tabla 5.13 -5.18) y los que disponen únicamente de ventilación natural (Tabla 5.19 y 5.20).

Los centros municipales de Piscina Municipal “Las Cumbres” (Tabla 5.1), el Polideportivo “Villafontana” (Tabla 5.2), el Polideportivo “Joán Miró” (Tabla 5.3), el Polideportivo “La Loma” (Tabla 5.4), los Servicios Sociales “Vía Láctea” (Tabla 5.5), el Centro de Mayores “Parque Coimbra” (Tabla 5.6) y la Junta de Distrito “Parque Coimbra” (Tabla 5.7), son edificios inteligentes en los que no existe la posibilidad de ventilación natural, al no disponer de ventanas practicables.

La Biblioteca Central (Tabla 5.12) cuenta, además de la ventilación forzada, con ventanas practicables en tres de los cuatro cerramientos del edificio, en las Plantas Primera, Segunda, Tercera y Cuarta. El Centro Municipal de Mayores Las Lomas (Tabla 5.11), cuenta con ventanas practicables, tanto en la Cafetería como en la Sala de Juegos.

De los recintos que únicamente disponen de ventilación artificial, el 39,34% de los casos superan el límite establecido para el parámetro de $Q_{requerido}$ 75%, el 34,42% para el parámetro de $Q_{requerido}$ 50%, el 32,78% para el parámetro de $Q_{requerido}$ 25% y el 21,31% para el parámetro de $Q_{requerido}$ (Allen et al., 2020).

Los recintos que únicamente disponen de ventilación natural, el 78,57% de los casos superan el límite establecido para el parámetro de $Q_{requerido}$ 75%, el

CAPÍTULO 5

78,57% para el parámetro de $Q_{requerido}$ 50%, el 51,14% para el parámetro de $Q_{requerido}$ 25% y el 50% para el parámetro de $Q_{requerido}$ (Allen et al., 2020).

Los centros de trabajo en los que se dispone de ventilación natural además de la forzada, su ocupación, durante el periodo de pandemia, solo estaba permitida cuando las ventanas practicables estuviesen abiertas. En este tipo de centros, se puede observar una mejoría de las condiciones ambientales con la incorporación de la ventilación natural. En su conjunto, se pasa del 66,28 % de los recintos que superan el límite establecido para el parámetro de $Q_{requerido}$ 75%, al 55,81 %, y del 59,30% para el parámetro de $Q_{requerido}$ 50%, al 51,16 %, del 46,51% para el parámetro de $Q_{requerido}$ 25% al 37,21 % y del 40,70% para el parámetro de $Q_{requerido}$ (Allen et al., 2020) al 32,56 %.

Durante el periodo considerado, los Centros Socio Culturales han permanecido cerrados. En el Conservatorio Rodolfo Halffter, únicamente hay trabajadores municipales en la recepción, por lo que estos dos centros de trabajo no se consideran en la comparativa entre el estado de ventilación de los recintos, respecto a la ocupación y la Tasa de Incidencia entre los trabajadores municipales.

Respecto de las condiciones de ventilación en función de la ocupación, de la totalidad de los recintos donde se ubican los trabajadores, el 43,01% de los casos superan el límite establecido para el parámetro de $Q_{requerido}$ 75%, el 38,71% para el parámetro de $Q_{requerido}$ 50%, el 32,25% para el parámetro de $Q_{requerido}$ 25% y el 23,66% para el parámetro de $Q_{requerido}$ (Allen et al., 2020).

5.1 RESULTADOS EN AMBIENTES INTERIORES CON VENTILACIÓN CONTROLADA

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en los distintos centros municipales pertenecientes al Ayuntamiento de Móstoles, que disponen de ventilación forzada (Tabla 5.1 a 5.12).

Tabla 18. Ocupación Piscina Las Cumbres con Ventilación Artificial

Recintos	Grado de Ocupación			
	Q Requerido 75%	Q Requerido 50%	Q Requerido 25%	Q Requerido (Allen et al., 2020)
Vestuario masculino	1,71	1,46	1,23	1,04
Vestuario femenino	1,82	1,55	1,31	1,11
Vestuario familiar	0,00	0,00	0,00	0,00
Vaso principal	2,20	1,87	1,58	1,34
Vaso chapoteo	2,54	2,16	1,83	1,55
Área de piscina	1,11	0,94	0,80	0,67
Gradas piscina	0,00	0,00	0,00	0,00
Sala de reuniones	0,00	0,00	0,00	0,00
Despacho	1,03	0,88	0,74	0,63
Administración	0,66	0,57	0,48	0,40

Tabla 19. Ocupación Polideportivo Villafontana con Ventilación Artificial

Recintos	Grado de Ocupación			
	Q Requerido 75%	Q Requerido 50%	Q Requerido 25%	Q Requerido (Allen et al., 2020)
Gimnasio musculación	0,00	0,00	0,00	0,00
Vestuarios (10)	0,88	0,75	0,64	0,54
Recepción	1,95	1,66	1,40	1,19
Administración	0,93	0,80	0,67	0,57
Piscina Invierno	0,53	0,45	0,38	0,32
Pista Deportiva	0,90	0,77	0,65	0,55
Graderíos Pista	0,00	0,00	0,00	0,00
Graderíos Piscina	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 20. Ocupación Polideportivo Joan Miró con Ventilación Artificial

Recintos	Grado de Ocupación			
	Q Requerido 75%	Q Requerido 50%	Q Requerido 25%	Q Requerido (Allen et al., 2020)
Gradas	0,00	0,00	0,00	0,00
Pista	0,83	0,71	0,60	0,51
Despacho (2)	2,30	1,96	1,66	1,40
Sala de juegos	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 21. Ocupación Polideportivo La Loma con Ventilación Artificial

Recintos	Grado de Ocupación			
	Q Requerido 75%	Q Requerido 50%	Q Requerido 25%	Q Requerido (Allen et al., 2020)
Despachos	0,98	0,83	0,70	0,59
Palco	0,00	0,00	0,00	0,00
vestuarios	0,98	0,83	0,70	0,60
Pista polideportiva	1,47	1,25	1,05	0,89
Gradas	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 22. Ocupación Edificio Servicios Sociales Vía Láctea con Ventilación Artificial

Recintos	Grado de Ocupación			
	Q Requerido 75%	Q Requerido 50%	Q Requerido 25%	Q Requerido (Allen et al., 2020)
Oficinas I	0,76	0,64	0,54	0,46
Oficinas II	1,72	1,47	1,24	1,05
Admisión	0,58	0,49	0,41	0,35

Tabla 23. Ocupación Centro de Mayores Parque Coímbra con Ventilación Artificial

Recintos	Grado de Ocupación			
	Q Requerido 75%	Q Requerido 50%	Q Requerido 25%	Q Requerido (Allen et al., 2020)
Salón	0,90	0,76	0,65	0,55
Despacho	1,59	1,35	1,14	0,97
Aulas (2)	2,39	2,04	1,72	1,46

Tabla 24. Ocupación Junta Parque Coímbra con Ventilación Artificial

Recintos	Grado de Ocupación			
	Q Requerido 75%	Q Requerido	Q Requerido	Q Requerido (Allen et al., 2020)
Oficina	0,41	0,35	0,29	0,25
Despacho	1,44	1,23	1,04	0,88
Sala de juntas	1,74	1,48	1,25	1,06
Salón de actos	1,42	1,21	1,02	0,86
Recepción	1,31	1,11	0,94	0,79
Biblioteca	1,28	1,09	0,92	0,78

Tabla 25. Ocupación Edificio de Servicios Generales: Mantenimiento con Ventilación Artificial

		Grado de Ocupación			
Recintos		Q Requerido 75%	Q Requerido 50%	Q Requerido 25%	Q Requerido (Allen et al., 2020)
Planta Baja	Oficinas o despachos	1,04	0,89	0,75	0,63
	Sala de espera	0,00	0,00	0,00	0,00
	Talleres	5,11	4,35	3,67	3,11
	Almacenes	0,07	0,06	0,05	0,04
	Oficina Atención	1,32	1,13	0,95	0,81
	Salón de Actos	3,22	2,74	2,32	1,96
Plante Primera	Despachos (8)	0,80	0,68	0,57	0,49
	Oficinas o despachos	1,62	1,38	1,17	0,99
	Vestuarios	1,59	1,35	1,14	0,96
	Almacén	0,31	0,26	0,22	0,19
	Zonas de circulación	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 26. Ocupación C.S.C. Norte Universidad / Junta de Distrito 2 con Ventilación Artificial

		Grado de Ocupación			
Recintos		Q Requerido 75%	Q Requerido 50%	Q Requerido 25%	Q Requerido (Allen et al., 2020)
Planta Baja	Recepción-Exposición	1,52	1,29	1,09	0,92
	Zonas de circulación	1,32	1,12	0,95	0,80
	Auditorio	2,42	2,06	1,74	1,47
	Escenario	0,41	0,35	0,30	0,25
	Camerinos	0,00	0,00	0,00	0,00
	Aulas	0,68	0,58	0,49	0,41
Plante 1ª	Administración	1,50	1,28	1,08	0,91
	Biblioteca	1,65	1,40	1,18	1,00
	Zonas de circulación	1,54	1,31	1,10	0,93

Tabla 27. Ocupación Teatro El Bosque con Ventilación Artificial

Recintos		Grado de Ocupación			
		Q Requerido 75%	Q Requerido 50%	Q Requerido 25%	Q Requerido (Allen et al., 2020)
Sótano	Almacén Material	0,65	0,55	0,47	0,39
	Taller Carpintería	0,52	0,45	0,38	0,32
	Taller Cerrajería	0,00	0,00	0,00	0,00
	Limpieza	28,80	24,54	20,70	17,53
	Vestuarios	4,55	3,87	3,27	2,77
	Foso Escénico	0,69	0,59	0,50	0,42
	Foso Orquesta	0,17	0,15	0,12	0,11
	Lavandería	5,76	4,91	4,14	3,51
	Sala	2,30	1,96	1,66	1,40
	Almacén	0,00	0,00	0,00	0,00
	Instalaciones	0,00	0,00	0,00	0,00
	Zonas de Circulación	0,17	0,14	0,12	0,10
	Taller electricidad	0,86	0,74	0,62	0,53
	Almacén Decorados	0,60	0,51	0,43	0,36
	Almacén II	0,63	0,54	0,46	0,39
	Almacén general	0,19	0,16	0,13	0,11
	Almacén III	40,33	34,35	28,98	24,54
Planta Baja	Platea	0,35	0,29	0,25	0,21
	Escenario	8,15	6,94	5,86	4,96
	Foyer	0,95	0,81	0,68	0,58
	Cafetería	1,57	1,34	1,13	0,96
	Camerinos	0,00	0,00	0,00	0,00
	Cabina técnica	0,00	0,00	0,00	0,00
	Instalaciones	0,00	0,00	0,00	0,00
	Aseos	0,00	0,00	0,00	0,00
	Zona de Circulación	3,46	2,94	2,48	2,10
Planta Alta	Balcón del Foyer	2,42	2,06	1,74	1,47
	Anfiteatro	0,13	0,11	0,09	0,08
	Oficinas	2,30	1,96	1,66	1,40
	Camerinos	0,18	0,16	0,13	0,11
	Cabinas Traducción	0,00	0,00	0,00	0,00
	Equipos	0,00	0,00	0,00	0,00
	Aseos	0,00	0,00	0,00	0,00
	Zonas de paso	0,05	0,05	0,04	0,03
Planta Galería	Galería Escenario I	0,00	0,00	0,00	0,00
	Puente de proscenio	4,27	3,64	3,07	2,60
	Paraíso	0,32	0,27	0,23	0,19

RESULTADOS EN AMBIENTES INTERIORES

	Zonas de paso	1,84	1,57	1,33	1,12
Galerías y Peine	Galería Escenario II	0,90	0,77	0,65	0,55
	Galería Escenario III	1,05	0,89	0,75	0,64
	Galería Escenario IV	1,05	0,89	0,75	0,64
	Peine	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 28. Ocupación Centro de Mayores “Las Lomas” con Ventilación Artificial

Recintos	Grado de Ocupación			
	Q Requerido 75%	Q Requerido 50%	Q Requerido 25%	Q Requerido (Allen et al., 2020)
Cafetería	1,40	1,19	1,01	0,85
Salón de juegos	1,49	1,27	1,07	0,91

Tabla 29. Ocupación Biblioteca Central con Ventilación Artificial

Recintos	Grado de Ocupación			
	Q Requerido 75%	Q Requerido 50%	Q Requerido 25%	Q Requerido (Allen et al., 2020)
Sala juvenil	1,15	0,98	0,83	0,70
Sala adultos	0,76	0,65	0,55	0,46
Sala de estudio	2,44	2,08	1,76	1,49
Administración	1,14	0,97	0,82	0,69

5.2 RESULTADOS EN AMBIENTES INTERIORES CON VENTILACIÓN NO CONTROLADA

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en los centros municipales, que disponen además de ventilación forzada, ventanas practicables, lo cual permite conocer el aporte de la ventilación natural (Tabla 5.13 a 5.18).

Tabla 30. Ocupación Conservatorio Rodolfo Halffter con Ventilación Artificial

		Grado de Ocupación			
Recintos		Q _{Requerido} 75%	Q _{Requerido} 50%	Q _{Requerido} 25%	Q _{Requerido} (Allen et al., 2020)
Planta Baja	Almacén I	0,74	0,63	0,53	0,45
	Almacén II	0,71	0,61	0,51	0,43
	Equipos	0,00	0,00	0,00	0,00
	Cuarto Limpieza	0,79	0,68	0,57	0,48
Planta Primera	Entrada Principal	0,00	0,00	0,00	0,00
	Escalera / acceso	0,00	0,00	0,00	0,00
	Recepción	1,09	0,93	0,79	0,67
	Admisión	1,50	1,27	1,08	0,91
	Despacho I	1,22	1,04	0,88	0,75
	Despacho II	1,27	1,09	0,92	0,78
	Sala de profesores	1,56	1,33	1,12	0,95
	Despacho Dirección	1,31	1,11	0,94	0,79
	Zonas Comunes	0,00	0,00	0,00	0,00
	Escalera Interior	0,00	0,00	0,00	0,00
	Cocina	0,00	0,00	0,00	0,00
	Cafetería	0,00	0,00	0,00	0,00
	Biblioteca Fonética	1,41	1,20	1,01	0,86
	Biblioteca	1,35	1,15	0,97	0,82
Planta Segunda	Pasillo Central	1,13	0,97	0,82	0,69
	Escalera	3,64	3,10	2,62	2,22
	Aula 1	7,98	6,80	5,74	4,86
	Aula 2	7,38	6,29	5,30	4,49
	Aula 3	4,66	3,97	3,35	2,84
	Aula 4	5,26	4,48	3,78	3,20
	Seminario I	2,81	2,39	2,02	1,71
	Aula 6	4,82	4,10	3,46	2,93
	Aula 7	4,62	3,94	3,32	2,81
	Aula 8	4,62	3,94	3,32	2,81
	Aula 9	4,58	3,90	3,29	2,79
	Seminario II	2,86	2,44	2,06	1,74
	Aula 11	3,56	3,04	2,56	2,17
	Aula 12	4,68	3,98	3,36	2,84
	Aula 13	2,27	1,93	1,63	1,38
	Cabina 6	1,82	1,55	1,31	1,11

RESULTADOS EN AMBIENTES INTERIORES

	Cabina 7	1,89	1,61	1,36	1,15
	Cabina 8	2,54	2,16	1,83	1,55
	Cabina 9	1,12	0,95	0,80	0,68
	Cabina 10	1,34	1,14	0,96	0,82
Planta Tercera	Pasillo Central	1,13	0,97	0,82	0,69
	Escaleras	3,64	3,10	2,62	2,22
	Aula Polivalente	5,92	5,04	4,25	3,60
	A.P.A.	0,00	0,00	0,00	0,00
	Sala de Cámara	1,27	1,08	0,91	0,77
	Sala Preparación I	1,29	1,10	0,93	0,78
	Sala Preparación II	1,37	1,16	0,98	0,83
	Sala de Audición	0,94	0,80	0,68	0,57

Tabla 31. Ocupación Conservatorio Rodolfo Halffter con Ventilación Artificial

		Grado de Ocupación			
Recintos		Q Requerido 75%	Q Requerido 50%	Q Requerido 25%	Q Requerido (Allen et al., 2020)
Sótano	Almacén I	0,52	0,44	0,37	0,31
	Almacén II	0,50	0,43	0,36	0,30
	Equipos	0,00	0,00	0,00	0,00
	Cuarto Limpieza	0,56	0,47	0,40	0,34
Plante Primera	Entrada Principal	0,00	0,00	0,00	0,00
	Escalera / Acceso	0,00	0,00	0,00	0,00
	Recepción	0,77	0,65	0,55	0,47
	Admisión	1,05	0,89	0,75	0,64
	Despacho I	1,22	1,04	0,88	0,75
	Despacho II	1,27	1,09	0,92	0,78
	Sala de Profesores	1,56	1,33	1,12	0,95
	Despacho Dirección	1,31	1,11	0,94	0,79
	Zonas Comunes	0,00	0,00	0,00	0,00
	Escalera Interior	0,00	0,00	0,00	0,00
	Cocina	0,00	0,00	0,00	0,00
	Cafetería	0,00	0,00	0,00	0,00
	Biblioteca Fonética	1,41	1,20	1,01	0,86
	Biblioteca	1,35	1,15	0,97	0,82
Planta Segunda	Pasillo Central	0,79	0,68	0,57	0,48
	Escalera	2,55	2,17	1,83	1,55
	Aula 1	7,98	6,80	5,74	4,86
	Aula 2	7,38	6,29	5,30	4,49

CAPÍTULO 5

	Aula 3	4,66	3,97	3,35	2,84
	Aula 4	2,93	2,50	2,11	1,78
	Seminario I	1,64	1,40	1,18	1,00
	Aula 6	2,30	1,96	1,65	1,40
	Aula 7	4,62	3,94	3,32	2,81
	Aula 8	4,62	3,94	3,32	2,81
	Aula 9	2,71	2,31	1,95	1,65
	Seminario II	1,17	1,00	0,84	0,71
	Aula 11	2,32	1,97	1,67	1,41
	Aula 12	4,68	3,98	3,36	2,84
	Aula 13	1,69	1,44	1,21	1,03
	Cabina 6	1,82	1,55	1,31	1,11
	Cabina 7	1,89	1,61	1,36	1,15
	Cabina 8	2,54	2,16	1,83	1,55
	Cabina 9	1,12	0,95	0,80	0,68
	Cabina 10	1,34	1,14	0,96	0,82
Planta Tercera	Pasillo Central	0,79	0,68	0,57	0,48
	Escaleras	2,55	2,17	1,83	1,55
	Aula Polivalente	4,09	3,48	2,94	2,49
	A.P.A.	0,00	0,00	0,00	0,00
	Sala de Cámara	0,81	0,69	0,58	0,49
	Sala de Preparación I	1,29	1,10	0,93	0,78
	Sala de Preparación II	1,37	1,16	0,98	0,83
	Sala de Audición	0,83	0,70	0,59	0,50

Tabla 32. Ocupación Centro Sociocultural Caleidoscopio / El Soto / Villa de Móstoles con Ventilación Artificial

Recintos		Grado de Ocupación			
		Q Requerido 75%	Q Requerido 50%	Q Requerido 25%	Q Requerido (Allen et al., 2020)
Sótano	Taller Artesanía	1,53	1,30	1,10	0,93
	Instalaciones I	0,00	0,00	0,00	0,00
	Taller de Pintura	6,87	5,86	4,94	4,18
	Taller de Cerámica	3,19	2,72	2,30	1,94
	Instalaciones II	3,10	2,64	2,23	1,89
	Instalaciones III	2,99	2,54	2,15	1,82
	Vestuarios	2,02	1,72	1,45	1,23
	Camerinos	1,27	1,08	0,92	0,77
	Escenario	0,46	0,39	0,33	0,28

RESULTADOS EN AMBIENTES INTERIORES

Planta Baja	Teatro	2,42	2,06	1,74	1,47
	Vestíbulo Principal	0,20	0,17	0,14	0,12
	Ludoteca	2,52	2,15	1,81	1,54
	Biblioteca	3,86	3,29	2,78	2,35
	Ciber Aula	3,91	3,33	2,81	2,38
	Despacho	2,06	1,76	1,48	1,25
	Dirección	1,13	0,96	0,81	0,69
Planta Primara	Graderío	2,42	2,06	1,74	1,47
	Aula I	1,70	1,44	1,22	1,03
	Aula II	1,91	1,63	1,37	1,16
	Aula III	2,93	2,49	2,10	1,78
	Aula IV	1,60	1,36	1,15	0,97
	Sala Maquinaria	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 33. Ocupación Centro Sociocultural Caleidoscopio / El Soto / Villa de Móstoles” con Ventilación Natural y Artificial

		Grado de Ocupación			
Recintos		Q Requerido 75%	Q Requerido 50%	Q Requerido 25%	Q Requerido (Allen et al., 2020)
Sótano	Taller Artesanía	1,45	1,24	1,04	0,88
	Instalaciones I	0,00	0,00	0,00	0,00
	Taller de pintura	5,04	4,29	3,62	3,07
	Taller de cerámica	2,39	2,03	1,72	1,45
	Instalaciones II	3,10	2,64	2,23	1,89
	Instalaciones III	2,99	2,54	2,15	1,82
	Vestuarios	2,02	1,72	1,45	1,23
	Camerinos	1,27	1,08	0,92	0,77
Planta Baja	Escenario	0,60	0,51	0,43	0,36
	Teatro	2,42	2,06	1,74	1,47
	Vestíbulo principal	0,20	0,17	0,14	0,12
	Ludoteca	1,34	1,14	0,96	0,82
	Biblioteca	0,39	0,33	0,28	0,23
	Ciber aula	2,46	2,09	1,77	1,50
	Despacho	1,16	0,99	0,83	0,71
	Dirección	0,61	0,52	0,44	0,37
Planta Primara	Graderío	2,42	2,06	1,74	1,47
	Aula I	1,35	1,15	0,97	0,82
	Aula II	1,91	1,63	1,37	1,16
	Aula III	2,03	1,73	1,46	1,24
	Aula IV	1,29	1,10	0,92	0,78

Sala maquinaria	0,00	0,00	0,00	0,00
-----------------	------	------	------	------

Tabla 34. Ocupación Edificio Participación Ciudadana / Junta de Distrito 1" con Ventilación Artificial

Recintos		Grado de Ocupación			
		Q Requerido 75%	Q Requerido 50%	Q Requerido 25%	Q Requerido (Allen et al., 2020)
Planta Baja	Oficina Atención	1,32	1,13	0,95	0,81
	Salón de Actos	2,42	2,06	1,74	1,47
Planta Primera	Despachos (8)	2,02	1,72	1,45	1,23
	Despacho coordinador	0,30	0,25	0,21	0,18
	Sala Reunión I	0,00	0,00	0,00	0,00
	Sala Reunión II	0,00	0,00	0,00	0,00
Planta Segunda	Despachos (8)	0,00	0,00	0,00	0,00
	F.A.M.P.A.	0,00	0,00	0,00	0,00
	Sala Reunión III	0,00	0,00	0,00	0,00
	Sala Reunión IV	0,00	0,00	0,00	0,00
Planta Tercera	Despacho I	1,13	0,96	0,81	0,69
	Despacho II	0,93	0,79	0,67	0,57
	Despacho III	0,30	0,25	0,21	0,18
	Despacho IV	0,86	0,73	0,62	0,52
	Administración	1,27	1,08	0,92	0,77
	Sala Reunión V	0,00	0,00	0,00	0,00
	Sala Reunión VI	0,00	0,00	0,00	0,00
	Federación Peñas	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 35. Ocupación Edificio de Participación Ciudadana / Junta de Distrito 1" con Ventilación Natural y Artificial

		Grado de Ocupación			
Recintos		Q Requerido 75%	Q Requerido 50%	Q Requerido 25%	Q Requerido (Allen et al., 2020)
Planta Baja	Oficina Atención	1,32	1,13	0,95	0,81
	Salón de Actos	3,22	2,74	2,32	1,96
Planta Primera	Despachos (8)	0,80	0,68	0,57	0,49
	Dcho. Coordinador	0,07	0,06	0,05	0,04
	Sala Reunión I	0,00	0,00	0,00	0,00
	Sala Reunión II	0,00	0,00	0,00	0,00
Planta Segunda	Despachos (8)	0,00	0,00	0,00	0,00
	F.A.M.P.A.	0,00	0,00	0,00	0,00
	Sala Reunión III	0,00	0,00	0,00	0,00
	Sala Reunión IV	0,00	0,00	0,00	0,00
Planta Tercera	Despacho I	0,42	0,36	0,30	0,25
	Despacho II	0,39	0,33	0,28	0,24
	Despacho III	0,07	0,06	0,05	0,04
	Coordinador festejos	0,37	0,32	0,27	0,23
	Administración	0,52	0,44	0,38	0,32
	Sala Reunión V	0,00	0,00	0,00	0,00
	Sala Reunión VI	0,00	0,00	0,00	0,00
	Federación Peñas	0,00	0,00	0,00	0,00

5.3 RESULTADOS EN AMBIENTES INTERIORES CON VENTILACIÓN NATURAL

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en los distintos centros municipales pertenecientes al Ayuntamiento de Móstoles, que disponen únicamente de ventilación natural (Tabla 5.19 y 5.20).

Tabla 36. Ocupación Casa Consistorial con Ventilación Natural

Recintos		Grado de Ocupación			
		Q Requerido 75%	Q Requerido 50%	Q Requerido 25%	Q Requerido (Allen et al., 2020)
Planta Baja	Registro general	0,66	0,56	0,47	0,40
	Vestíbulo/público	4,38	3,73	3,15	2,67
	Oficinas y despachos	0,99	0,84	0,71	0,60
	Seguridad-emisora	2,65	2,25	1,90	1,61
Planta Primera	Oficinas y despachos	2,41	2,05	1,73	1,47
	Sala de espera	2,65	2,25	1,90	1,61
Planta Segunda	Oficinas y despachos	3,07	2,61	2,20	1,87
Planta Tercera	Salón de plenos	1,78	1,51	1,28	1,08
	Ordenanzas	2,65	2,25	1,90	1,61
	Oficinas y despachos	1,64	1,40	1,18	1,00
Planta Cuarta	Oficinas y despachos	1,31	1,12	0,94	0,80

Tabla 37. Ocupación Centro de Acogida de Animales con Ventilación Natural

Centro Acogida Animales		Grado de Ocupación			
		Q Requerido 75%	Q Requerido 50%	Q Requerido 25%	Q Requerido (Allen et al., 2020)
	Oficinas	1,29	1,10	0,93	0,79
	Jaulas	1,23	1,05	0,88	0,75
	Animalario	0,00	0,00	0,00	0,00

5.4 POSIBILIDADES DE MEJORA CON LA INCORPORACIÓN DE LA VENTILACIÓN POR FLOTABILIDAD

Para establecer posibles mejoras mediante Ventilación por Flotabilidad, se analizan las necesidades de ventilación requeridas en la Sala de Estudio de la Biblioteca Central Almudena Grandes. De esta forma, se valoran las posibilidades de mejora que aportan las ventanas disponibles, ya que es un edificio diseñado para albergar un elevado número de ocupantes, en áreas diáfanas con posibilidad de ventilación cruzada.

El aforo de la Sala de Estudio, para una calidad de aire Categoría IDA2²³⁶, requiere las capacidades de ventilación que se muestran en la [Tabla 5.21](#).

Tabla 38. Ventilación Sala de Estudio de la Biblioteca Central Almodena Grandes Calidad IDA 2

Nº de Renovaciones (h ⁻¹)	Ocupación (Nº Personas)
0,5	26
1	52
2	103
3,0	155
4,0	206
5,0	258
5,2	269
6,0	310

Disponiendo de tres (3) renovaciones de aire a hora, la ocupación máxima de la Sala de Estudio se corresponde con 56,0 % del aforo de diseño. Si se aumentara este valor a cinco (5), su ocupación aumentaría al 96,0 %. Para que el aforo completo de diseño disfrute de una Calidad de Aire IDA 2, se debería disponer de 5,2 renovaciones de aire a la hora.

La densidad de ocupación establecida en la Sala de Lectura es muy elevada, es decir, de una persona por cada dos metros cuadrados. En esta situación, se hace necesario alcanzar las cinco (5) renovaciones de aire en el recinto a la hora, con densidades de ocupación de una persona cada cinco metros cuadrados. Para el caso de los espacios dedicados a oficinas, únicamente se requerirían tres (3) renovaciones de aire a la hora.

En la [Figura 5.1](#), se muestran los valores de ventilación alcanzados respecto a la superficie abierta, considerando como tal, en caso de ventanas enfrentadas, el área efectiva.

²³⁶ Ministerio de la Presidencia (2007) Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios. Gobierno de España. Madrid, España. <https://www.boe.es/boe/dias/2007/08/29/pdfs/A35931-35984.pdf>

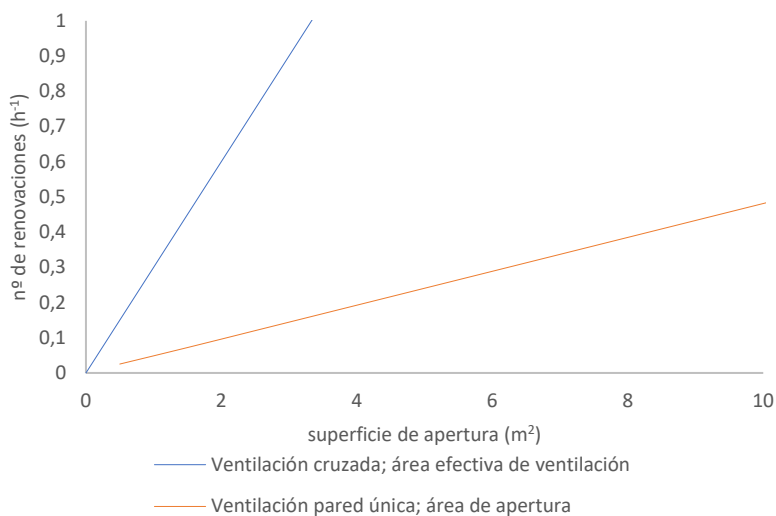


Figura 12. Ventilación Natural (Ventanas): Sala de Adultos, Biblioteca Central Almudena Grandes

Queda patente la imposibilidad de alcanzar los valores deseados con la apertura de ventanas en una única pared. En el caso de proceder a la apertura de las ventanas en paredes opuestas, la superficie efectiva de ventilación aumenta de forma exponencial, para lo cual abrimos las ventanas disponibles en la misma proporción en las paredes enfrentadas (Figura 5.2).

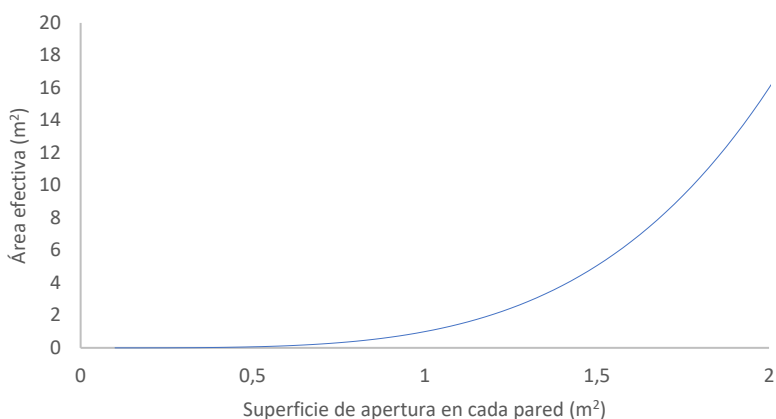


Figura 13. Área Efectiva de Ventilación: Sala de Adultos, Biblioteca Central Almudena Grandes

En este caso, para obtener tres (3) renovaciones de aire a la hora, se requiere una apertura en paredes opuestas de 1,9 m^2 y, para cinco, que se corresponde con las necesidades de ocupación del centro, se requiere una apertura de 2,05 m^2 (Figura 5.3).

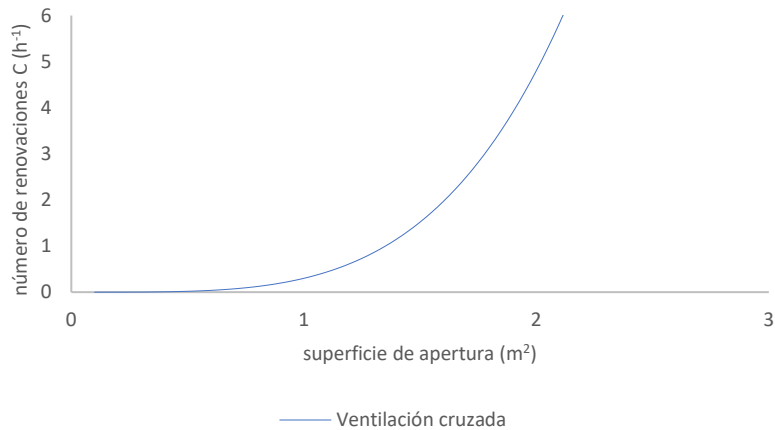


Figura 14. Ventilación cruzada: Sala de Adultos, Biblioteca Central Almudena Grandes

La Biblioteca Central Almudena Grandes de Móstoles también permite la incorporación de la ventilación natural del edificio. Esta ventilación se produce mediante la corriente de aire ascendente que se forma en el vestíbulo por la apertura de los exutorios, ya que el patio central, con 20,0 metros de altura y 112 m² de superficie, apenas presenta obstrucción al flujo de aire, ya que la escalera de acceso es abierta.

Con la sola apertura de las aperturas cenitales, se produce la entrada de aire inferior por infiltraciones a través de puertas y ventanas. Se considera en los exutorios un Coeficiente de Viento C_w 0,05 y de descarga C_d de 0,76²³⁷.

Las condiciones ambientales más favorables se producen en el mes de enero, cuando la temperatura media exterior en la Ciudad de Móstoles se sitúa en cinco grados centígrados y la velocidad de aire exterior de 1,0 m/s, mientras que la temperatura interior en invierno debe estar comprendida entre los 21 y 23 °C²³⁸. Con estas condiciones, la ecuación de diseño para el cálculo de la ventilación en el vestíbulo es:

$$Q_a = 9 \cdot 10^{-16} + \frac{A_r}{1,07}$$

²³⁷ EN 60079-10-1:2022 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

²³⁸ Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico. Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Datos Climatológicos. Gobierno de España. Madrid, España.
<https://www.aemet.es/es/portada>

CAPÍTULO 5

El aforo de diseño del vestíbulo se sitúa en 154 personas desarrollando una actividad ligera, que para disponer de una Calidad de Aire IDA 2 requieren 2,09 m², valor posible de alcanzar, pero no habitual en la instalación objeto de estudio.

$$12,72 \cdot 10^{-3} \cdot 154 = 9 \cdot 10^{-16} + \frac{A_r}{1,07}$$

$$A_r = 2,09 \text{ m}^2$$

Se contempla la posibilidad de poder abrir las puertas de entrada al edificio para posibilitar la entrada del aire por la zona inferior. El edificio dispone de una entrada general para el público a la biblioteca mediante exclusa de cuatro puertas, enfrentadas dos a dos con una anchura de 82,0 cm cada una (SE 1) y dos de emergencias, situadas en el propio vestíbulo de exposiciones, con una anchura de 2,0 m (SE 2), y en la fachada oeste del edificio, con una anchura de 1,91 m. (SE 4), todas ellas con una altura de 203,0 cm (Figura 5.4).

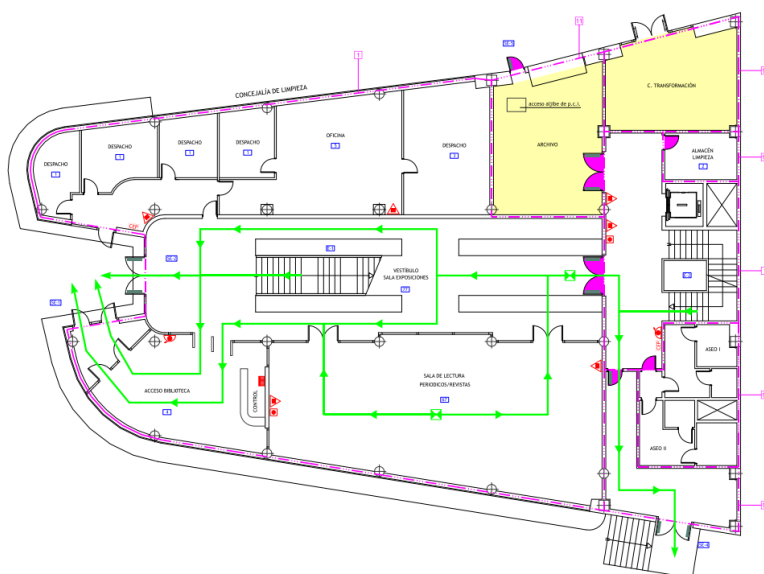


Figura 15. Planta Baja, Biblioteca Central Almudena Grandes

Considerando una apertura de los exutorios de un metro cuadrado, la velocidad de aire en el vestíbulo es muy superior a la estandarizada para interiores poco ventilados, que se corresponde con 0,05 m/s^{239,240}, por lo que es posible

²³⁹ EN 202007:2006 IN Application Guide of EN 60079-10. Electrical Apparatus for Explosive Gas Atmospheres. Classification of Hazardous Areas. European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium.

²⁴⁰ EN 60079-10-1:2022 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

también explorar la posibilidad de utilizar también las puertas de las Salas de Estudio situadas en las Plantas Primera, Segunda y Tercera, con el objetivo de incrementar la ventilación del recinto (Tabla 5.22).

Tabla 39. Ventilación Natural por Flotación con 1,0 m² de Apertura Cenital

Puerta	Q (m ³ /s)	w (m/s)
SE 1	12,00	0,11
SE 2	12,81	0,11
SE 4	12,67	0,11
SE 1+2	13,93	0,12
SE 1+1+4	14,23	0,13

Además, en las condiciones ambientales anteriormente indicadas, utilizando únicamente la puerta de entrada general a la biblioteca (SE 1), los exutorios deberán tener una apertura de 1,96 m² para que la velocidad del aire en el interior del patio se iguale con la estandarizadas en ambientes exteriores (1 m/s)²⁴¹. En caso de utilizar también la puerta de emergencia para favorecer el paso del aire, esta apertura se reduce a los 1,75 m².

A continuación, se contempla la posibilidad de mantener las puertas de entrada al edificio cerradas, e incorporar la ventilación por flotabilidad en las Salas de Estudio. En este caso, el aire caliente del interior de las Salas de Estudios y Préstamo, saldría por el vestíbulo y ascendería, para, finalmente, pasar a través de las aperturas cenitales.

El área efectiva de apertura de las ventanas ha de coincidir, como mínimo, con el área de las puertas. Las Salas de Estudio cuentan con dos puertas de acceso al vestíbulo de 80,0 cm de ancho, ubicadas sobre la misma pared.

Para una abertura cenital de los exutorios de un metro cuadrado, y con las condiciones ambientales anteriormente descritas, los valores máximos de ventilación en cada una de las salas son los siguientes (Tabla 5.23):

Tabla 40. Ventilación Natural de las Salas con 1,0 m² de Apertura Cenital

Ubicación	Cota (m)	H	Q (m ³ /s)
Sala Juvenil	4	16	0,84
Sala de Adultos/prestamos	8	12	0,68
Sala de lectura	12	8	0,56

²⁴¹ EN 60079-10-1:2022 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

Durante los cinco primeros meses del año, momento en el que su eficacia queda interrumpida al igualarse la temperatura exterior con la del interior del edificio, se muestra el aporte de la flotabilidad respecto de la ventilación inducida por las ventanas en la Sala de Adultos, situada a una cota de ocho metros (Figura 5.5).

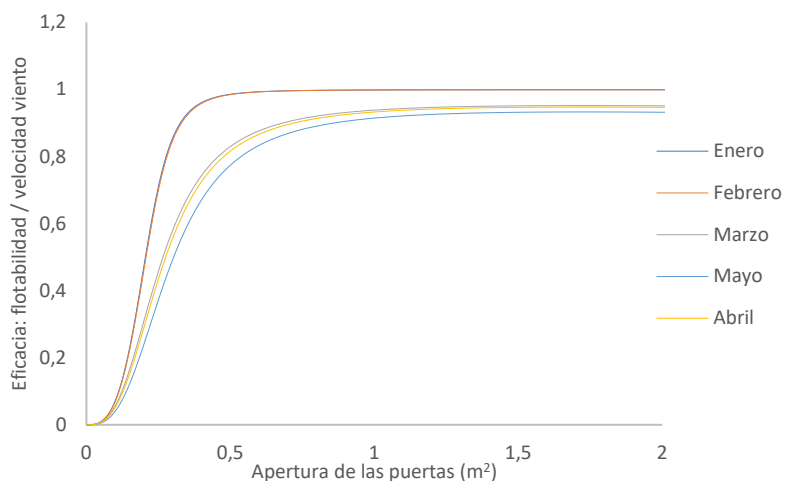


Figura 16. Ventilación Natural (Efecto de Flotabilidad) Biblioteca Central Almudena Grandes

La aportación de la ventilación por flotabilidad se incrementa con el tamaño de las aberturas de la sala, aunque únicamente durante los meses de enero y febrero su aporte se iguala con el aporte que realiza la ventilación cruzada a través de las ventanas, efecto que se produce en las salas localizadas tanto en la Primera, Segunda y Tercera Planta.

Para determinar cómo afecta la velocidad de aire exterior a cada uno de los mecanismos de ventilación, se considera una apertura de 20,0 cm tanto en los exutorios como en las ventanas de las salas, durante el mes enero (Figura 5.6).

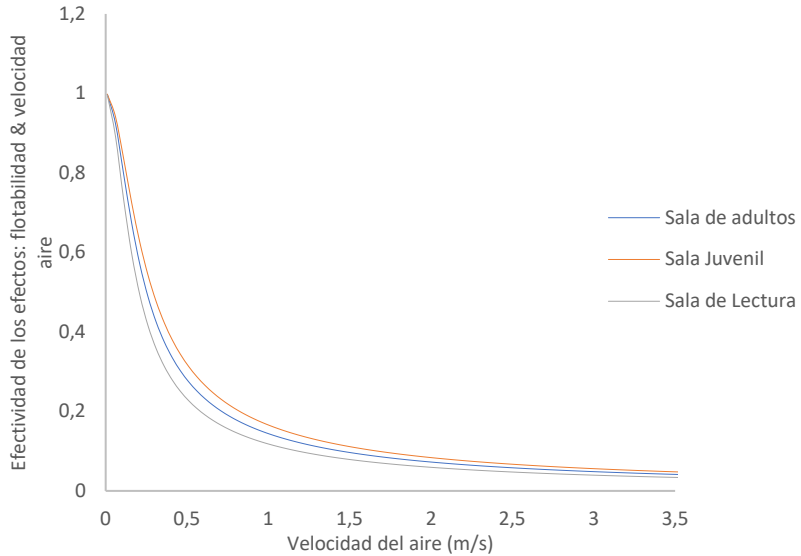


Figura 17. Ventilación Natural (Efecto de Flotabilidad) Biblioteca Central Almudena Grandes

Se observa que, a medida que aumenta la velocidad del aire en el exterior, domina el efecto del viento frente a la diferencia de temperaturas. No obstante, para las velocidades de aire estandarizadas^{242,243}, es necesario considerar ambos efectos de forma conjunta.

²⁴² EN 202007:2006 IN Application Guide of EN 60079-10. Electrical Apparatus for Explosive Gas Atmospheres. Classification of Hazardous Areas. European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium.

²⁴³ EN 60079-10-1:2022 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.



6

Capítulo
RESULTADOS EN
AMBIENTES
EXTERIORES

CAPÍTULO 6: RESULTADOS EN AMBIENTES EXTERIORES

6.1 PROCESO DE ELABORACIÓN

Los resultados del estudio de ambientes exteriores se obtienen mediante el análisis de las mediciones efectuadas a nivel de calle durante las Fiestas Patronales del Municipio de Móstoles, en septiembre del 2022, en la celebraciones y eventos con aglomeración masiva de personas, así como en los festejos taurinos que tuvieron lugar en la Plaza de Toros.

Se realizan mediciones directas de dióxido de carbono en la vía pública en el Recinto Ferial y el Mercado de Artesanía, que se desarrolla tanto en el Centro Histórico de la ciudad, como en la Plaza el Pradillo. En esta plaza se tomaron registros durante la inauguración de las fiestas en actividades como el pregón, el chupinazo, los pasacalles de gigantes y cabezudos. También en los conciertos organizados en la Finca Liana.

En la Plaza de Toros se toman las mediciones el día 10 a las 21 horas, durante el Festejo de Recortes, y los días 13, 14 y 15, a las 11:30 horas, durante la finalización de los encierros.

6.2 DATOS CLIMATOLÓGICOS DE LOS DÍAS EN LOS QUE SE REALIZARON LA TOMA DE DATOS

Tabla 41. Datos Climatológicos del año 2022

Fecha	10/09/22	11/09/22	12/09/22	13/09/22	14/09/22	15/09/22
Tª						
Máxima (°C)	32	33	28	25	23	24
Tª						
Mínima (°C)	20	20	23	17	15	17
Veloc. Máxima Aire (Km/h)	34	20	30	34	30	15
Veloc. Mínima Aire (Km/h)	15	5	5	7	9	5
Veloc. Media Aire (Km/h)	25	10	12	16	15	10

H. Relativa (%)	45	42	60	60	85	90
Estado del Cielo	Despejado	Despejado	Nublado	Muy Nublado	Muy Nublado Lluvia	Lluvia

6.3 MÉTODO DE CÁLCULO

Para obtener los valores estimados, se aplican las expresiones matemáticas anteriormente expuestas:

$$\begin{aligned} \text{Ocupación teórica}/m^2 &= 200 \cdot \frac{w}{Q_{\text{requerido}}} \\ Q_{\text{requerido}} &= \frac{q\text{CO}_2}{[\text{CO}_2]_{\text{interior}} - [\text{CO}_2]_{\text{exterior}}} \cdot 10^6 \\ [\text{CO}_2]_{\text{interior}} - [\text{CO}_2]_{\text{exterior}} &= \Delta[\text{CO}_2] \\ \text{Ocupación teórica}/m^2 &= 200 \cdot \frac{w}{q\text{CO}_2 \cdot 10^6} \cdot \Delta[\text{CO}_2] \\ \Delta[\text{CO}_2] &= \text{Ocupación teórica}/m^2 \cdot \frac{q\text{CO}_2 \cdot 10^6}{200 \cdot w} \end{aligned} \tag{6.1}$$

Ecuación 6.1. Incremento de la Concentración de Dióxido de Carbono en Exteriores

Se considera una concentración de dióxido de carbono, en un ambiente sin ocupación de 400 ppm, y con una Tasa de Generación correspondiente a la actividad (Tabla 6.2).

Tabla 42. Tasa de Generación de CO₂ por Actividad Desarrollada

Tipo de actividad	Metabolismo (W/m²)	qCO ₂ (l/s·persona)
Sentado	70	0,0045
Paseando (1,6 Km/h)	100	0,0064

Considerando que los emplazamientos siempre se encuentran obstaculizados, y aplicando un Factor de Eficacia de la Ventilación de 5, que se corresponde con ambientes abiertos con presencia de un número muy elevado de impedimentos, de acuerdo con lo especificado en la Norma UNE EN 60079-10²⁴⁴, se obtienen los siguientes resultados.

²⁴⁴ EN 60079-10-1:2022 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

El comportamiento esperado en la concentración de dióxido de carbono a nivel de suelo, tanto para actividades sedentarias como ligeras (pasear a una velocidad aproximada de 1,6 Km/h), se muestra en el Capítulo 6 (Figura 6.6 y 6.7).

Las ecuaciones que definen el comportamiento de la concentración de dióxido de carbono medido directamente en el ambiente respecto a la densidad de ocupación son:

- Actividad sedentaria aplicando el modelo obtenido a partir de la Norma UNE EN 60079-10²⁴⁵.

$$\text{Ocupación teórica}/m^2 = \frac{[\text{CO}_2]_{\text{Medición directa}} - 400}{150} \quad 6.2$$

Ecuación 6.2. Ocupación Teórica Exteriores: Modelo Velocidad de Aire Norma UNE EN 60079-10

- Actividad sedentaria aplicando el modelo obtenido a partir de la Norma UNE EN 202007 IN²⁴⁶.

$$\text{Ocupación teórica}/m^2 = \frac{[\text{CO}_2]_{\text{Medición directa}} - 400}{45} \quad 6.3$$

Ecuación 14. Ocupación Teórica Exteriores: Modelo Velocidad de Aire Norma UNE EN 202007 IN

- Actividad ligera (pasear a una velocidad de 1,6 Km/h) aplicando el modelo obtenido a partir de la Norma UNE EN 60079-10 (AENOR, 2022/2016).

$$\text{Ocupación teórica}/m^2 = \frac{[\text{CO}_2]_{\text{Medición directa}} - 400}{213} \quad 6.4$$

Ecuación 6.4. Ocupación Teórica Exteriores: Modelo Velocidad de Aire Norma UNE EN 60079-10

- Actividad ligera (pasear a una velocidad de 1,6 Km/h) aplicando el modelo obtenido a partir de la Norma UNE EN 202007 IN (AENOR, 2006).

$$\text{Ocupación teórica}/m^2 = \frac{[\text{CO}_2]_{\text{Medición directa}} - 400}{64} \quad 6.5$$

Ecuación 15. Ocupación Teórica Exteriores: Modelo Velocidad de Aire Norma UNE EN 202007 IN

Los resultados obtenidos, aunque muestran una gran variabilidad, se pueden agrupar en función de la densidad de ocupación estimada a partir de la dificultad de caminar (Tabla 6.3).

²⁴⁵ EN 60079-10-1:2022 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

²⁴⁶ EN 202007:2006 IN Application Guide of EN 60079-10. Electrical Apparatus for Explosive Gas Atmospheres. Classification of Hazardous Areas. European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium.

Tabla 43. Mediciones de CO₂ a Nivel de Suelo en Actos Multitudinarios

Estimación de la dificultad para caminar	CO ₂ Medición Directa (ppm)	
	Valor Mínimo	Valor Máximo
Vía pública despejada	460	500
Se camina sin dificultad	600	650
Se camina sin dificultad, pero hay que sortear a otros viandantes	700	750
Es fácil caminar, pero la marcha se encuentra entorpecida	800	900
Se camina con dificultad	900	1000
No es posible caminar, pero se mantiene la movilidad	1000	1200
La movilidad está dificultada	1200	1300
La movilidad está prácticamente impedida	1300	1400
La movilidad está impedida	1400	1500
Imposibilidad total de movilidad	1500	1680

La estimación de la ocupación teórica de la vía pública, durante la celebración de las Fiestas Patronales, aplicando cada uno de los modelos presentados, se muestran en la [Tabla 6.4](#).

Tabla 44. Densidad de Ocupación a Nivel de Suelo, en Actos Multitudinarios

Concentración CO ₂ (ppm)	Densidad de ocupación estimada (personas/m ²)			
	Actividad Sedentaria		Actividad Ligera	
	UNE EN 60079-10	UNE EN 202007 IN	UNE EN 60079-10	UNE EN 202007 IN
480	0,5	1,8	0,4	1,3
650	1,7	5,6	1,2	3,9
750	2,3	7,8	1,6	5,5
850	3,0	10,0	2,1	7,0
950	3,7	12,2	2,6	8,6
1100	4,7	15,6	3,3	10,9
1250	5,7	18,9	4,0	13,3
1350	6,3	21,1	4,5	14,8
1450	7,0	23,3	4,9	16,4
1550	7,7	25,6	5,4	18,0

Se observa que, mientras el proceso de caminar no se encuentra impedido, el modelo que mejor se ajusta a los resultados obtenidos es el de Actividad Ligera del Modelo UNE EN 60079-10²⁴⁷. De igual forma, cuando la movilidad se encuentra comprometida por la afluencia de gente, el modelo que mejor se ajusta es el correspondiente a una actividad sedentaria también es el contenido

²⁴⁷ EN 60079-10-1:2022 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

en la Norma UNE EN 60079-10. Se considera que la densidad máxima en un evento multitudinario es de cuatro personas por metro cuadrado, y en grades aglomeraciones, donde no es posible caminar, puede incrementarse hasta siete y ocho personas por metro cuadrado.

De los resultados obtenidos, se desprende que el dióxido de carbón se comporta a nivel de suelo como un gas pesado, siguiendo los patrones de dilución establecidos en la Norma UNE EN 60079-10.

El análisis de los datos obtenidos en la Plaza de Toros permite obtener valores durante actos multitudinarios celebrados en un recinto abierto a diferentes alturas. En este caso, se aplican los valores de velocidad de aire de la Norma UNE EN 60079-10. No obstante, aunque el dióxido de carbono es 1,5 veces más pesado que el aire, se utilizan los dos modelos de comportamiento, gases ligeros y gases pesados, para comparar a qué modelo se ajustan mejor los resultados obtenidos. En todos los casos, se ha considerado como actividad sedentaria la situación en la que el público se encuentra sentado en las gradas. El comportamiento del CO₂ en altura se muestran en el Apartado 6.6 (Figura 6.8 a 6.10).

Para su determinación, se toma como base de cálculo la densidad de ocupación para un recinto de pública concurrencia en la zona destinada a espectadores sentados, que sin asientos definidos se corresponde con 0,5 m²/persona²⁴⁸. El graderío de la Plaza de Toros de Móstoles tiene aforo para 5000 personas, que parte de una cota de 2,0 metros y culmina a 12,0 metros de altura. La zona de asientos es escalonada, con una diferencia entre hileras contiguas de 50,0 cm de altura (Figura 1.8). Las mediciones se realizaron en perímetros circulares, con una diferencia de un metro de altura, es decir, cada dos escalones.

Las ecuaciones que definen el comportamiento de la concentración de dióxido de carbono, medido directamente en el ambiente respecto a la densidad de ocupación son:

- Actividad sedentaria, para una densidad de ocupación de dos personas/m², aplicando el modelo para gases ligeros, obtenido a partir de la Norma UNE EN 60079-10.

$$\text{Altura (m)} = 50,295 \cdot e^{-0,005 \cdot |\text{CO}_2|} \quad 6.6$$

Ecuación 6.6. Relación Altura sobre el Nivel de Suelo/ Concentración Dióxido de Carbono para una Densidad de Ocupación de 2 personas/m² (Modelo de Gases Ligeros)

²⁴⁸ Ministerio de Vivienda (2006) Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. Gobierno de España. Madrid, España.
<https://www.boe.es/eli/es/rd/2006/03/17/314>

- Actividad sedentaria, para una densidad de ocupación de dos personas/m², aplicando el modelo para gases pesados, obtenido a partir de la Norma UNE EN 60079-10.

$$\text{Altura (m)} = 4983 \cdot e^{-0,015 \cdot |\text{CO}_2|}$$

6.7

Ecuación 16. Relación Altura sobre el Nivel de Suelo/ Concentración Dióxido de Carbono para una Densidad de Ocupación de 2 personas/m² (Modelo de Gases Pesados)

Los resultados obtenidos se muestran en la [Tabla 6.5](#).

Tabla 45. Concentración de CO₂ a Distintas Alturas, en Actos Multitudinarios

Altura (m)	Concentración CO ₂ (ppm)			
	Densidad de ocupación estimada de dos personas/m ²			
	10/09/2022 (21:00 h)	13/09/2022 (11:00 h)	14/09/2022 (11:00 h)	15/09/2022 (20:00 h)
2	750	700	700	750
3	750	600	600	600
4	600	500	600	600
5	600	500	500	550
6	550	450	450	500
7	450	450	450	500
8	450	----	450	450
9	450	----	----	----
10	----	----	----	----
11	----	----	----	----
12	----	----	----	----

Los datos registros obtenidos corresponden a la media obtenida a lo largo del recorrido circular de la Plaza de Toros, tomando valores únicamente en las zonas donde el aforo era completo.

6.4 OCUPACIÓN MÁXIMA AL AIRE LIBRE

Mediante el control de la calidad del aire ambiental, es posible determinar el nivel de ocupación de los espacios abiertos para la gestión eficaz de una crisis sanitaria, mediante la aplicación de los límites ambientales. Para ello, es posible utilizar tanto el método desarrollado en el Modelo Steady State CO₂, como los niveles clásicos de actuación aplicados a la Higiene Industrial, es decir, al 75,0%, 50,0% y 25,0 % del valor límite, considerando como tal la calidad de aire de Categoría IDA2 ([Figura 6.1 a 6.5](#)). La aplicación de la Norma UNE EN 202007 IN, solo es posible a nivel de suelo ([Figura 6.1](#)).

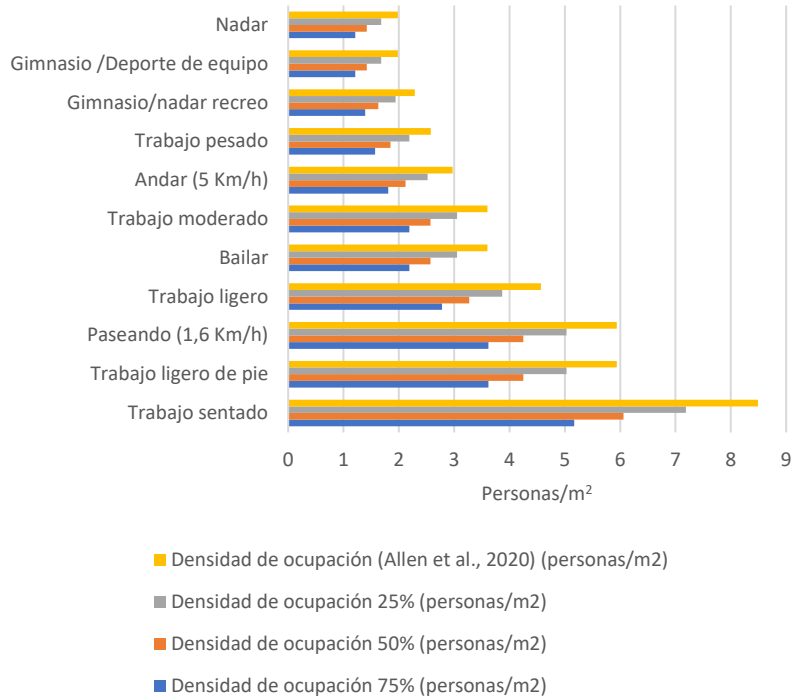


Figura 18. Densidad de Ocupación Exterior por Actividad Desarrollada

En cambio, la Norma UNE EN 60079-10 establece la dilución del CO₂ generado por las personas, dependiendo de su consideración como gas ligero o pesado (Figura 6.2).

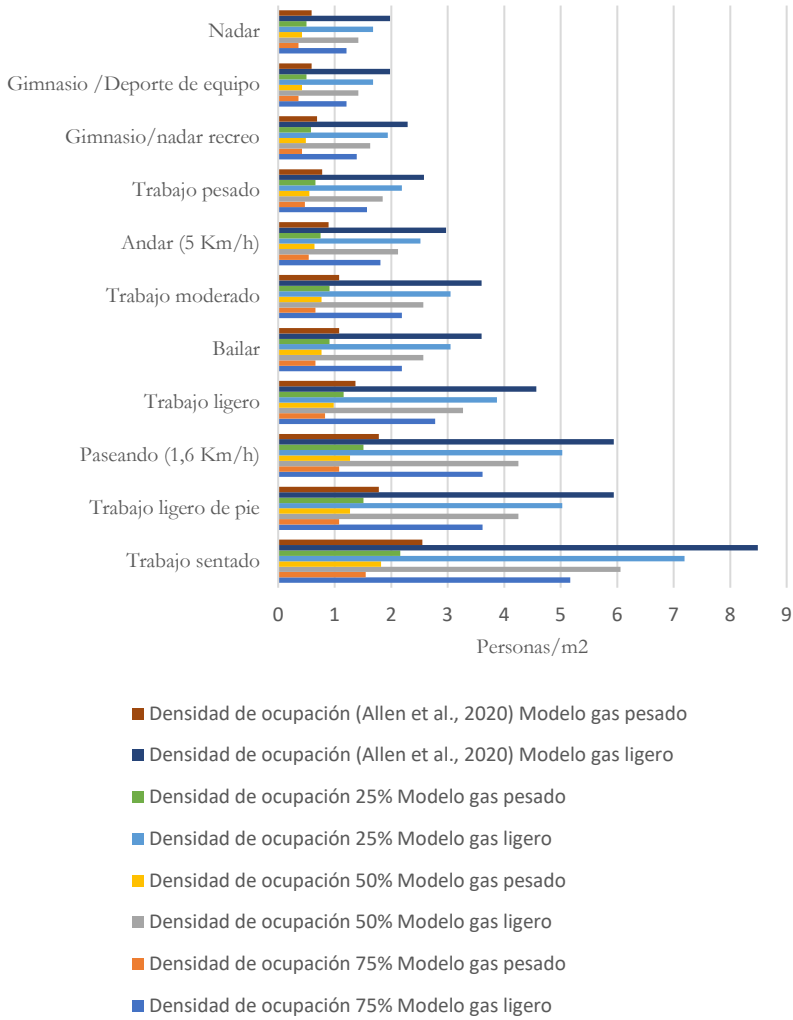


Figura 19. Densidad de Ocupación en el Exterior por Actividad Desarrollada (< 2,0 m de altura)

Los resultados muestran que la Norma UNE EN 202007 IN considera la eficiencia de la dilución de los gases a nivel de suelo, como si fuesen ligeros (Figura 6.1 a 6.2). Para establecer la densidad de ocupación en ubicaciones localizadas entre los 2,0 y los 5,0 metros de altura, solo es posible la aplicación de la Norma UNE EN 60079-10 (Figura 6.3).

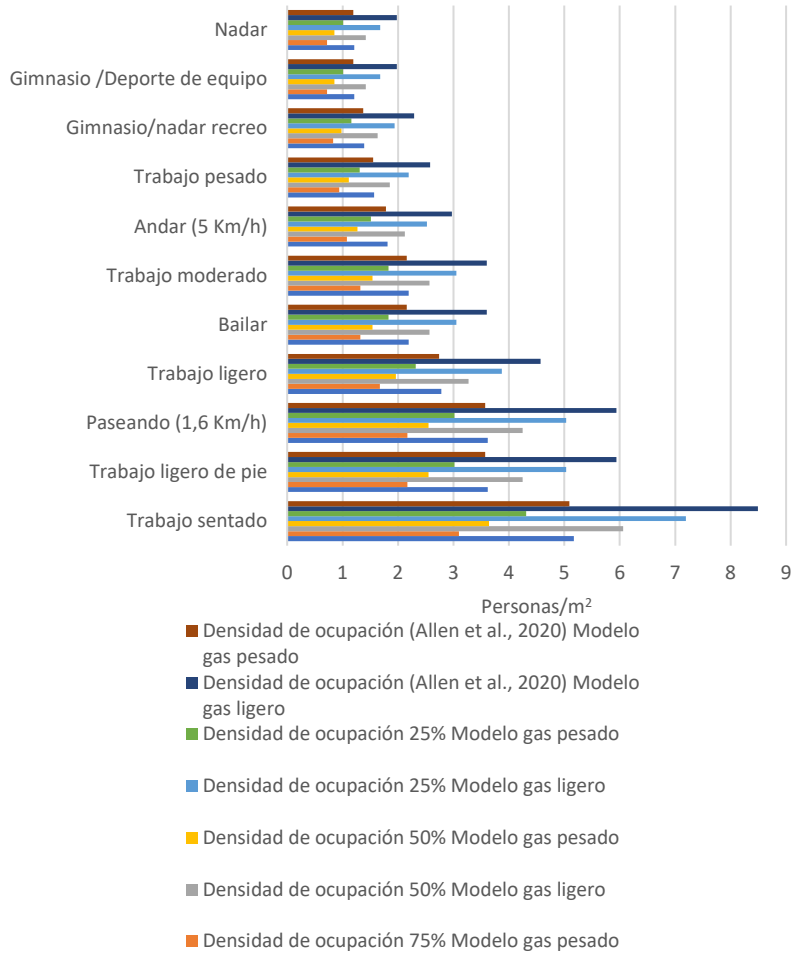


Figura 20. Densidad de Ocupación en el Exterior por Actividad Desarrollada (2,0-5,0 m de altura)

Si se considera que la efectividad en la dilución del CO₂ sigue el comportamiento de un gas ligero, éste se comporta de la misma manera hasta los 5,0 metros de altura, tendencia que también se pone de manifiesto en el Apartado 6.6 El comportamiento del dióxido de carbono en altura (Figura 6.8 a 6.9). De igual forma, para el caso de densidades de ocupación a más de 5,0 metros de altura, tan solo es posible la aplicación de la Norma UNE EN 60079-10 (Figura 6.4 a 6.5).

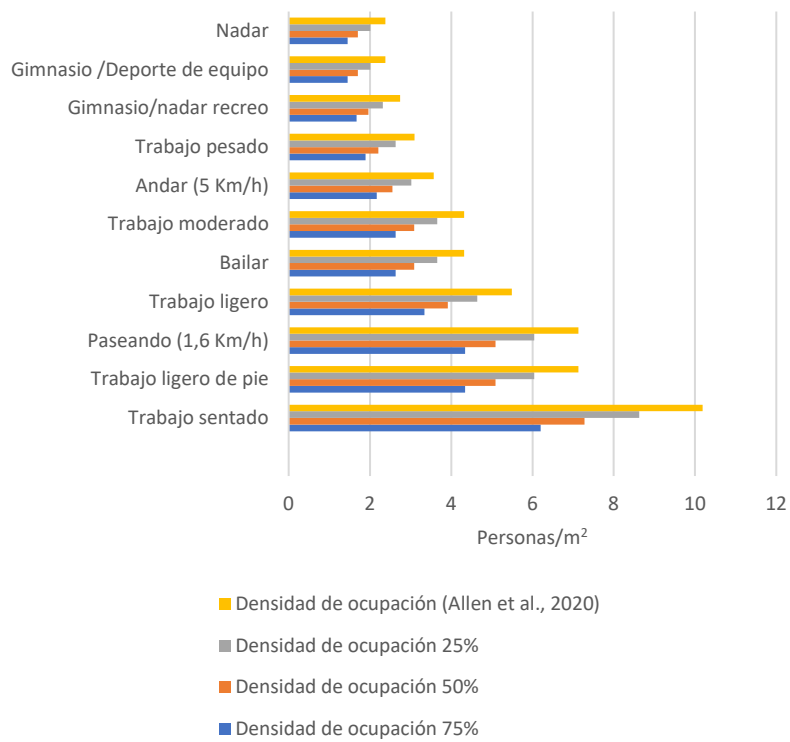


Figura 21. Densidad de Ocupación en el Exterior por Actividad Desarrollada (> 5,0 m de altura)

Los valores mostrados corresponden a concentraciones multitudinarias, por lo que se consideran emplazamientos con obstáculos. No obstante, una reunión de personas en una ubicación superior a 5,0 metros, se puede también considerar un área libre de obstáculos (Figura 6.5).

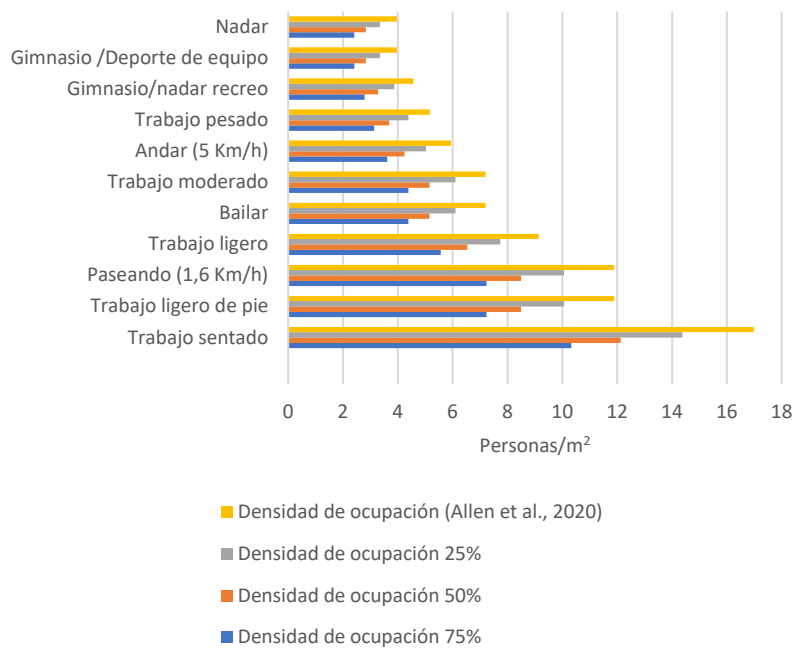


Figura 22. Densidad de Ocupación en Exterior por Actividad Desarrollada (> 5,0 m de altura sin obstáculos)

6.5 EL COMPORTAMIENTO DEL DIÓXIDO DE CARBONO A NIVEL DE SUELO

A nivel del suelo, el comportamiento esperado de la concentración de dióxido de carbono a nivel de suelo, tanto para actividades sedentarias como ligeras, es decir, pasear a una velocidad aproximada de 1,6 Km/h, se muestra en las [Figuras 6.6 y 6.7](#)

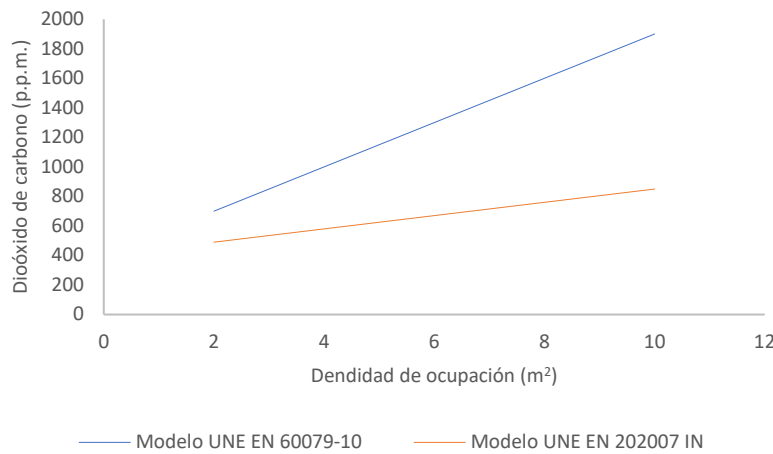


Figura 23. Comportamiento del Dióxido de Carbono a Nivel de Suelo. Actividad Sedentaria

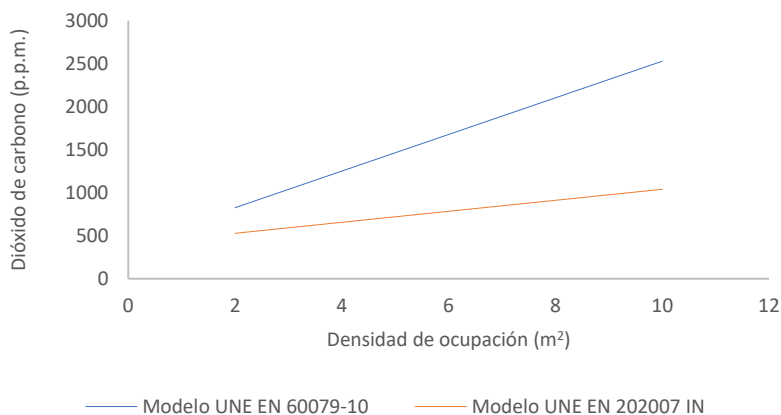


Figura 24. Comportamiento del Dióxido de Carbono a Nivel de Suelo. Actividad Ligera

La concentración de CO_2 aumenta con la ocupación y con el aumento de la actividad metabólica asociada a la actividad física que realicen las personas, siendo más acentuado este incremento cuando la efectividad de su dilución en la atmósfera circundante se produce conforme al modelo establecido en la Norma UNE EN 60079-10.

6.6 EL COMPORTAMIENTO DEL DIÓXIDO DE CARBONO EN ALTURA

La Plaza de Toros es un recinto abierto a diferentes alturas en el que se llevan a cabo actos multitudinarios, por lo que es un edificio idóneo para la toma de datos y el análisis del comportamiento del CO_2 exhalado por los seres humanos.

Si bien el dióxido de carbono es 1,5 veces más pesado que el aire, se utilizan los dos modelos de comportamiento, gases ligeros y gases pesados, para el posterior análisis de los datos obtenidos en la Plaza de Toros, y poder así comparar qué modelo se ajusta mejor los resultados obtenidos. El público se encuentra sentado en las gradas, por lo que se considera que realizan una actividad sedentaria.

El comportamiento de la concentración de dióxido de carbono en altura se muestra en las Figuras 6.8 a 6.10.

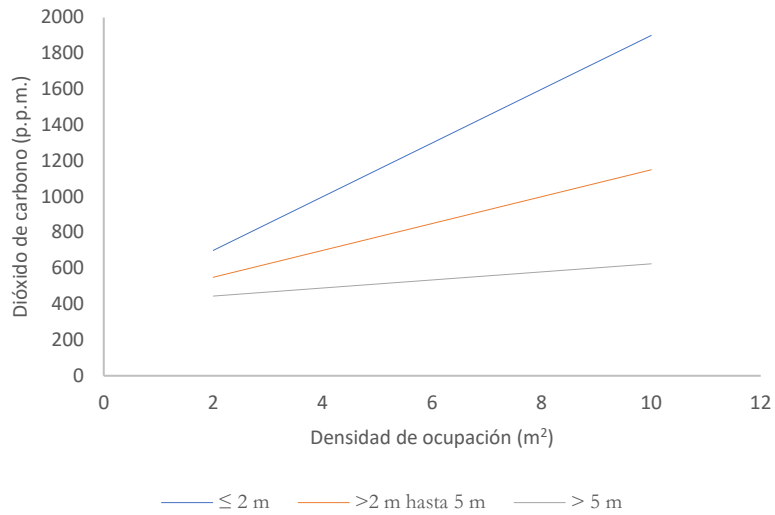


Figura 25. Comportamiento del Dióxido de Carbono en Altura. Modelo Gas Pesado

La dilución del CO₂ aumenta con la altura permitiendo disponer de densidades de ocupación más elevadas manteniendo la misma calidad de aire.

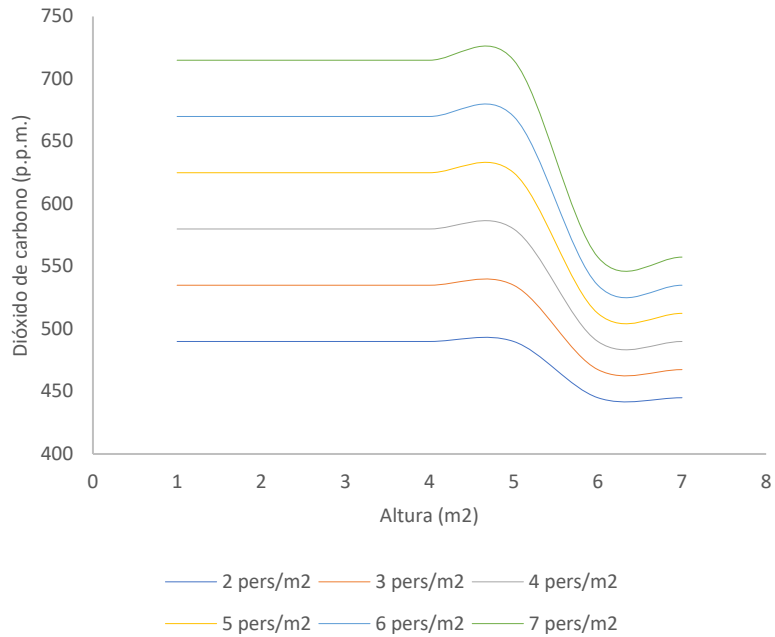


Figura 26. Comportamiento del Dióxido de Carbono en Altura. Modelo Gas Ligero

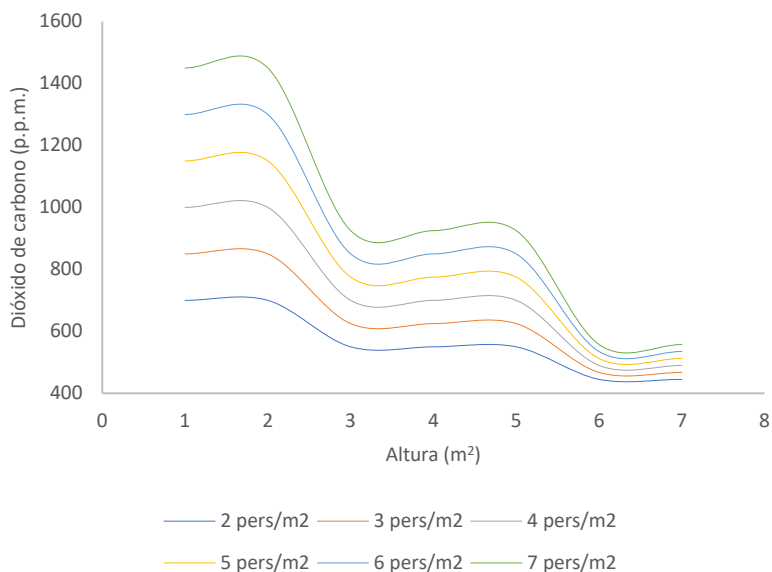
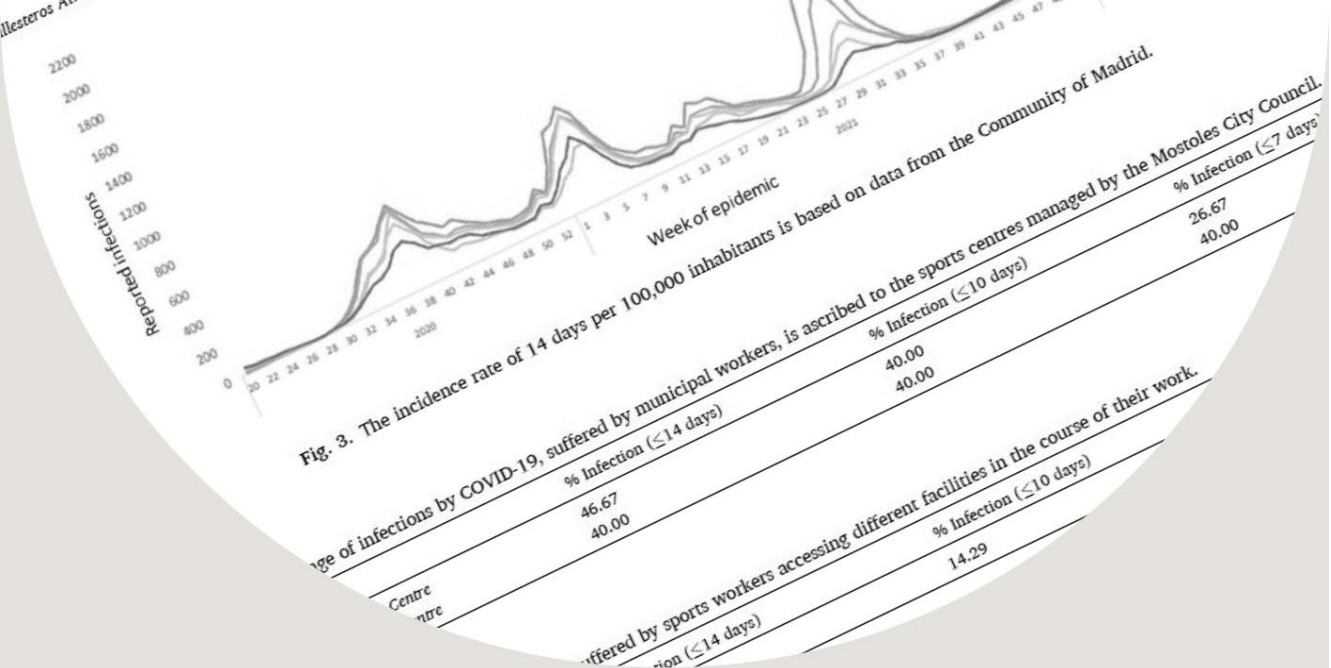


Figura 27. Comportamiento del Dióxido de Carbono en Altura. Modelo Gas Pesado

El Modelo de Gas Ligero asume una dilución más eficiente de las emisiones de los gases, y un comportamiento similar hasta los 5,0 metros de altura. Este comportamiento es debido a que los gases pesados tienden a descender al suelo, donde la velocidad efectiva del viento es menor como consecuencia del rozamiento con el suelo.



7

Capítulo

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CAPÍTULO 7: DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

7.1 INTRODUCCIÓN

El análisis de los resultados en ambientes interiores es diferente de los efectuados en exteriores, ya que, en estos últimos, al tratarse de público en eventos de ocio que en muchos casos se realizaban en entornos no delimitados sin requerir control de entrada, no es posible establecer una vinculación entre las condiciones del recinto con la transmisión de enfermedades.

Finalmente, a través del concepto de *“Concentración de Fondo”*, se establece la concentración necesaria de aire exhalado para que se produzca la infección por SARS-CoV-2.

7.2 AMBIENTES INTERIORES

Se han analizado doce centros municipales que, además de disponer en la mayor parte de los casos de ventilación forzada, se mantiene la posibilidad de ventilación natural mediante la apertura de ventanas practicables. Los datos de las características de los edificios, así como los aforos y la superficie máxima de apertura de las ventanas, han sido facilitados por la propia administración pública (Figura 5.13 a 5.18).

El 53,0% de las 183 ubicaciones analizadas no tienen posibilidad de ventilación natural y de estas, la ventilación cruzada supone únicamente el 21,65 % siendo la única que puede proporcionar un caudal de aire suficiente para superar los límites de ventilación y ocupación propuestos.

De hecho, el 53,38 % de las ubicaciones con posibilidad de disponer de ventilación cruzada pueden albergar la ocupación máxima para la que fueron diseñadas, con una calidad de aire Categoría IDA 2. Además, el 57,14 % pueden llegar a las tres renovaciones de aire por hora y el 28,57%, incluso, a las cinco renovaciones a la hora.

Tan solo el 6,58 % de las ubicaciones con las ventanas localizadas sobre la misma pared permiten alcanzar los aforos establecidos. Se trata en todos los casos de despachos con pequeños aforos ubicados en plantas elevadas.

De la totalidad de los recintos que disponen de ventanas practicables, únicamente un 7,21 % no sería necesario reducir los aforos para conseguir la

calidad de aire requerida en los niveles de seguridad I, II, III, y el 8,24 para el nivel IV, mientras que el 11,0% cumple la ocupación IDA^{249,250}.

Conocidas las condiciones de ventilación con relación a la ocupación de los centros municipales del Ayuntamiento de Móstoles, se estudia la incidencia del SARS-CoV-2 entre la plantilla de trabajadores de dichos edificios públicos. Para ello, se analiza la Tasa de Incidencia a catorce días por cien mil trabajadores (Figura 7.1), en base a las bajas producidas por SARS-CoV-2, y se compara con los datos de la Comunidad de Madrid (Figura 7.2).

Para poder discriminar las infecciones producidas en el ámbito laboral de las producidas en el ámbito privado y, por ende, consecuencia directa de las condiciones de ventilación, se aplica un límite temporal coincidente con las diferentes cuarentenas establecidas para evitar la transmisión de la enfermedad en pasajeros procedentes de otros países a su llegada a España, es decir, catorce días según Orden SND/403/2020²⁵¹ y diez días según Orden SND/413/2021²⁵², o bien la de siete días según Decreto 867/2021 Prórroga²⁵³, establecida por el Gobierno Argentino.

²⁴⁹ Ballesteros-Álvarez, J. M., Romero-Barriuso, A., Villena-Escribano, B. M., Rodríguez-Saiz, A., González-Gaya, C. (2024) Investigating the effectiveness of a new indoor ventilation model in reducing the spread of disease: A case of sports centers amid the COVID-19 pandemic. *Heliyon*, 10(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27877>

²⁵⁰ Ministerio de la Presidencia (2007) Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios. Gobierno de España. Madrid, España. <https://www.boe.es/boe/dias/2007/08/29/pdfs/A35931-35984.pdf>

²⁵¹ Ministerio de Sanidad (2020) Orden SND/403/2020, de 11 mayo, sobre las condiciones de cuarentena a las que deben someterse las personas procedentes de otros países a su llegada a España, durante la situación de crisis sanitaria ocasionada por el COVID-19. Gobierno de España. Madrid, España. <https://www.boe.es/buscar/pdf/2020/BOE-A-2020-4932-consolidado.pdf>

²⁵² Ministerio de Sanidad (2021) Orden SND/413/2021, de 27 de abril, sobre las condiciones de cuarentena a las que deben someterse las personas procedentes de la República de la India a su llegada a España, durante la situación de crisis sanitaria ocasionada por el COVID-19. Gobierno de España. Madrid, España. <https://www.boe.es/eli/es/o/2021/04/27/snd413/dof/spa/pdf>

²⁵³ Presidencia de la Nación (2021) Decreto 867/2021, DECNU-2021-867-APN-PTE Emergencia Sanitaria. República Argentina. Buenos Aires, Argentina. <https://www.boletinoficial.gob.ar/detalleAviso/primera/255070/20211224>

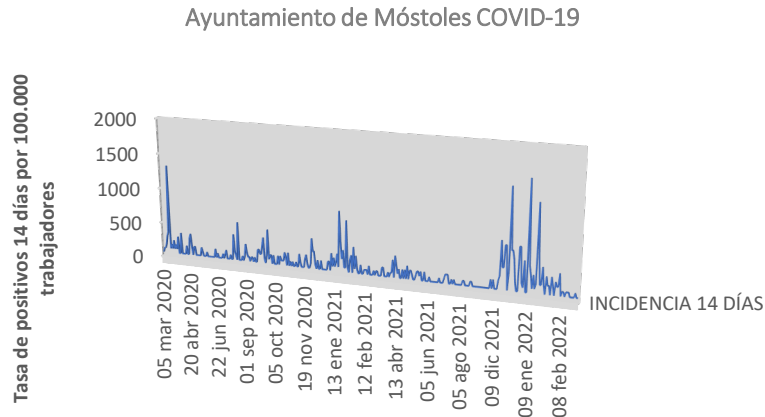


Figura 28. Tasa de Incidencia a 14 días por 100.000 trabajadores Ayuntamiento de Móstoles

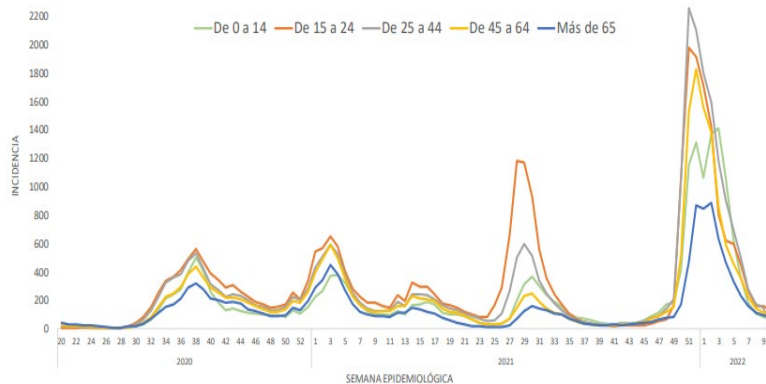


Figura 29. Tasa de incidencia a 14 días por 100.000 habitantes Comunidad de Madrid²⁵⁴

Se observa que la tendencia es coincidente con las diferentes olas sufridas en la Comunidad de Madrid para las personas con edades comprendidas entre los 25 y 64 años. Es preciso indicar que la comparación se realiza con los datos registrados en la Comunidad de Madrid, debido a que no todos los trabajadores municipales del Ayuntamiento de Móstoles viven necesariamente en el municipio. La semana 20 del año 2020, la incidencia en la Comunidad de Madrid se situó en 600, valor totalmente coincidente con la incidencia de los trabajadores del Ayuntamiento de Móstoles. Lo mismo ocurrió entre enero y marzo del 2020, con una incidencia de 800, en abril del 2021 con una incidencia

²⁵⁴ Consejería de Sanidad (2022) Dirección General de Salud Pública. Servicio de Epidemiología. Informe epidemiológico vigilancia de COVID-19: Infección por SARS-CoV-2. Comunidad de Madrid. Madrid, España. <https://goo.su/NTatR>

CAPÍTULO 7

de 400 y entre diciembre del 2021 y marzo del 2022, en este caso, con una incidencia entre 1600 y 1800.

Los resultados obtenidos en los centros municipales que disponen de ventilación forzada se muestran en el Apartado 7.5 (Tabla 7.4) y los centros que disponen de ventilación natural en el Apartado 7.6 (Tabla 7.5).

Los resultados obtenidos entre los trabajadores municipales que acceden a múltiples instalaciones y centros municipales se muestran en el Apartado 7.7 (Tabla 7.6), mientras que los resultados obtenidos entre los trabajadores municipales que realizan actividades laborales en la vía pública se muestran en el Anexo M. apartado 7.8 (Tabla 7.7).

De los registros obtenidos se puede afirmar que los servicios donde el porcentaje es más elevado se corresponden con actividades de atención directa con el público. En consecuencia, la probabilidad de que la infección se haya producido por contacto con compañeros en el centro de trabajo es más baja. Por otra parte, apenas se observa variación entre el porcentaje de las infecciones producidas con una carencia de diez y siete días.

La mayoría de las bajas por SARS-CoV-2, se han producido con una carencia temporal superior a las cuarentenas implantadas para evitar la transmisión del virus, lo que implica que la infección no se ha producido en el ámbito laboral. Para una diferencia superior a 14 días entre infecciones, en el 67,03 % de los centros se considera que no se han producido infecciones en el ámbito laboral, mientras que, considerando una diferencia temporal de diez y siete días, el 71,43 % y el 75,52 % respectivamente, no se considerarían infecciones causadas por las condiciones de ventilación de los centros de trabajo.

Los resultados porcentuales de las infecciones que se pueden considerar como consecuencia de las condiciones de ventilación son los siguientes (Tabla 7.1).

Tabla 46. Porcentaje de Infecciones por Centro, con las Carencias Temporales

< 14 días			< 10 días			< 7 días		
Número de Centros			Número de Centros			Número de Centros		
< 75 %	< 50 %	< 25 %	< 75 %	< 50 %	< 25 %	< 75 %	< 50 %	< 25 %
1,10	0,00	0,00	11,00	4,39	3,30	27,47	19,78	17,58

Por último, indicar que no se han tenido en cuenta los registros de los trabajadores de la Policía Municipal y de los Servicios Sociales, debido a que su actividad se desarrolla fundamentalmente en el exterior de los edificios municipales, con tareas relacionadas con la atención a los ciudadanos.

7.3 AMBIENTES EXTERIORES

Se comparan los resultados obtenidos en Ambientes Exteriores, con la estimación realizada a través de los modelos elaborados a partir de la Norma UNE EN 60079-10²⁵⁵ (Tabla 7.2).

Tabla 47. Densidades de Ocupación Estimada y Real, a Diferentes Alturas, en Actos Multitudinarios

Altura (m)	10 septiembre (21:00 h)		13 septiembre (11:00 h)		14 septiembre (11:00 h)		15 septiembre (20:00 h)	
	Modelo		Modelo		Modelo		Modelo	
	Gas Ligero	Gas Pesado	Gas Ligero	Gas Pesado	Gas Ligero	Gas Pesado	Gas Ligero	Gas Pesado
2	1,2	0,1	1,5	0,1	1,5	0,1	1,2	0,1
3	1,2	0,1	2,5	0,6	2,5	0,6	2,5	0,1
4	2,5	0,6	4,1	2,8	2,5	0,6	2,5	0,6
5	2,5	0,6	4,1	2,8	4,1	2,8	3,2	0,6
6	3,2	1,3	5,3	5,8	5,3	5,8	4,1	1,3
7	5,3	5,8	5,3	5,8	5,3	5,8	4,1	5,8
8	5,3	5,8	---	---	5,3	5,8	5,3	5,8

*Densidad de ocupación: dos personas/m²

Se observa que ambos modelos ofrecen valores más restrictivos que los reales, siendo el comportamiento de gas ligero el que ofrece valores más aproximados. Hay que tener en cuenta que los días en los que se realizan las mediciones, la velocidad de aire era elevada.

Por último, señalar que, de los análisis realizados, se puede observar que el dióxido de carbono se comporta a nivel de suelo, de acuerdo con los patrones de dilución de un gas pesado, mientras que, en altura, se asemeja más al de un gas ligero. Como consecuencia, es posible poder determinar la densidad de ocupación de un recinto al aire libre, dependiendo de la actividad que se desarrolle y la altura a la que se encuentre.

7.4 CONCENTRACIÓN DE FONDO: PORCENTAJE DE AIRE EXHALADO NECESARIO PARA PRODUCIR UNA INFECCIÓN POR SARS-COV-2

La “*Concentración de Fondo*” es un parámetro que indica la concentración media de una sustancia dentro del volumen de estudio, después de un periodo

²⁵⁵ EN 60079-10-1:2022 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

de tiempo durante el cual se ha establecido un estado estable entre las emisiones y el flujo de aire inducido por la ventilación. UNE EN 60079-10-1²⁵⁶.

$$X_b = \frac{f \cdot Q_g}{Q_g + Q_2} \rightarrow \frac{f \cdot Q_g}{Q_2} \quad 7.1$$

Ecuación 7.1. Concentración de Fondo

La frecuencia de renovación de aire y el flujo de ventilación se encuentran relacionados.

$$Q_2 = C_0 \cdot V_z \quad 7.2$$

Ecuación 7.2. Caudal resultante de la Ventilación y la Exhalación de los ocupantes

Donde:

- X_b = Concentración de fondo (vol. / vol.)
- Q_g = Caudal volumétrico del escape (m^3/s)
- Q_1 = Caudal volumétrico de aire que entra (m^3/s)
- Q_2 = Caudal volumétrico de la mezcla (m^3/s) $Q_2 = Q_1 + Q_g$
- C_0 = Frecuencia de la renovación de aire (s^{-1})
- V_z = Volumen de estudio (m^3)
- f = Factor que depende del grado de mezcla del aire. Es un factor de seguridad relacionado con la ineficiencia de la mezcla, permitiendo imperfecciones de los patrones de flujo de aire en un espacio real con obstáculos
- $f = 1$ implica que la mezcla es uniforme lo que implica que en el exterior del recinto considerado, se tiene la misma concentración de fondo que dentro del mismo
- $f > 1$ implica la existencia de un gradiente de concentraciones de fondo, su valor puede estar comprendido entre 1,5 en mezclas ligeramente ineficientes y 5 para mezclas muy ineficientes

Se considera una mezcla ligeramente ineficiente, aunque evaluamos el exterior, y en consecuencia la entrada de aire fresco en el volumen considerado es inmediata, se prevé la presencia de otras personas que obstaculizan el movimiento del aire alrededor del foco emisor.

La Concentración de Fondo media depende de la magnitud relativa de los flujos de emisión y de la ventilación, pero el tiempo que tarda en estabilizarse es inversamente proporcional a la frecuencia de renovación de aire, de acuerdo con lo establecido en la Norma UNE EN 60079-10-1²⁵⁷. Se evalúa la Concentración de Fondo en exteriores.

$$Q_g = N^{\circ} \text{ de personas emitiendo} \cdot qCO_2 \cdot 10^{-3}$$

$$Q_2 = C \cdot 15^3$$

²⁵⁶ EN 60079-10-1:2022 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

²⁵⁷ EN 60079-10-1:2022 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

$$X_b = Densidad\ de\ ocupaci3n \cdot 1,14 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{qCO_2}{C_0}$$

El n3mero de renovaciones de aire del cubo considerado depende de la velocidad de aire.

$$C_0 = \frac{w}{15}$$

$$X_b = Densidad\ de\ ocupaci3n \cdot \frac{qCO_2}{58,48 \cdot w}$$

La densidad de ocupaci3n a menos de 2,0 metros de altura se establece conforma a la Norma UNE EN 60079-10.

La Concentraci3n de Fondo para la densidad de ocupaci3n calculada, es decir, el volumen emitido por las personas en relaci3n al volumen de aire circundante, son los siguientes (Tabla 7.3).

Tabla 48. Concentraci3n de Fondo, para la Densidad de Ocupaci3n Calculada

75% (Vol./Vol.)	50% (Vol./Vol.)	25% (Vol./Vol.)	(Allen et al., 2020) (Vol./Vol.)
7,87·10 ⁻⁴	9,23·10 ⁻⁴	1,10·10 ⁻³	1,29·10 ⁻³

Los resultados implican que, con los criterios establecidos para la ventilaci3n en el M3todo *Steady State* CO₂²⁵⁸, para que se produzca la infecci3n por SARS-CoV-2 es necesario que el 0,13 % de aire provenga exhalaciones de personas. Con los l3mites propuestos en el presente estudio, el referido porcentaje se sit3a en el 0,079 % para el Q_{requerido} 75%, del 0,092 % para Q_{requerido} 50% y del 0,11 % Q_{requerido} 25%, respectivamente.

7.5 RESULTADOS DE INFECCIONES: TRABAJADORES EN CENTROS CON VENTILACI3N FORZADA

A continuaci3n, se muestran los resultados obtenidos en los centros municipales del Ayuntamiento de M3stoles que disponen de ventilaci3n forzada (Tabla 7.4).

²⁵⁸ Allen, J. Spengler, J., Jones, E., Cedeno-Laurent, J. (2020) How School Buildings Influence Student Health. Thinking and Performance. Harvard T.H. Chan Healthy Buildings Program. Cambridge, United States. <https://schools.forhealth.org/>

Tabla 49. Porcentaje de Infecciones COVID-19. Edificios Ventilación Forzada

Edificios	% de Infecciones Producidas		
	< 14 días	< 10 días	< 7 días
Polideportivo Villafontana	46,67	40,00	26,67
Polideportivo Las Cumbres	40,00	40,00	40,00
Área de mujer	64,71	52,94	52,94
Biblioteca	50,00	43,75	43,75
Centro Norte Universidad	0,00	0,00	0,00
Conservatorio	57,89	42,11	36,84
Consumo	42,86	42,86	42,86
Cultura	0,00	0,00	0,00
Hacienda	0,00	0,00	0,00
Medio Ambiente	28,57	14,29	14,29
Modernización y Calidad	0,00	0,00	0,00
O.A.C.	50,00	37,50	37,50
Oficina de Atención al Vecino	0,00	0,00	0,00
Servicio de Prevención	0,00	0,00	0,00
Servicios informáticos	0,00	0,00	0,00
Teatro el Bosque	33,33	26,67	20,00

7.6 RESULTADOS DE INFECCIONES: TRABAJADORES EN CENTROS CON VENTILACIÓN NATURAL

Seguidamente, se muestran los resultados obtenidos en los centros municipales del Ayuntamiento de Móstoles que disponen de Ventilación Natural ([Tabla 7.5](#)).

Tabla 50. Porcentaje de Infecciones por COVID-19. Edificios con Ventilación Natural

Edificios Ayuntamiento de Móstoles	% de Infecciones Producidas		
	< 14 días	< 10 días	< 7 días
Concejalía de Deportes	50,00	37,50	37,50
Archivo	0,00	0,00	0,00
Área de Empleo	0,00	0,00	0,00
Asesoría Jurídica	0,00	0,00	0,00
Centro Cultural Villa de Móstoles	14,29	14,29	14,29
Centro Sociocultural Caleidoscopio	0,00	0,00	0,00
Centro Sociocultural El Soto	0,00	0,00	0,00
Comunicación	0,00	0,00	0,00
Concejalía Patrimonio y Movilidad	0,00	0,00	0,00
Concejalía de Deportes	50,00	37,50	37,50
Concejalía de Igualdad	0,00	0,00	0,00
Concejalía de Limpieza Ciudad	0,00	0,00	0,00
Concejalía Medio Ambiente	0,00	0,00	0,00
Concejalía Presidencia, Seguridad y Comunicación	0,00	0,00	0,00
Concejalía de R.R.H.H., Tecnológico y Financieros	0,00	0,00	0,00
Contratación	25,00	25,00	25,00
Derechos Sociales y Mayores	0,00	0,00	0,00
Gestión Tributaria	33,33	0,00	0,00
Educación	0,00	0,00	0,00
Extinción de Incendios	72,22	61,11	61,11
Facturas	0,00	0,00	0,00
Festejos	0,00	0,00	0,00
Gabinete de Alcaldía	0,00	0,00	0,00
Padrón Municipal	0,00	0,00	0,00
Grupo Mas Madrid	0,00	0,00	0,00
Grupo Popular	0,00	0,00	0,00
Grupo Podemos	0,00	0,00	0,00
Grupo Socialista	0,00	0,00	0,00
Igualdad y Cooperación	42,86	28,57	28,57
Infraestructuras	0,00	0,00	0,00
Inspección Fiscal	0,00	0,00	0,00
Intervención	0,00	0,00	0,00
Junta Distrito I	0,00	0,00	0,00
Junta de Distrito II	0,00	0,00	0,00
Junta de Distrito III	60,00	40,00	20,00
Junta de Distrito IV	0,00	0,00	0,00
Junta de Distrito V	0,00	0,00	0,00
Juventud	41,18	35,29	35,29

CAPÍTULO 7

Mantenimiento de la Ciudad	0,00	0,00	0,00
Mayores	0,00	0,00	0,00
Museo de la Ciudad	0,00	0,00	0,00
Organismos de Gobierno	20,00	0,00	0,00
Participación Ciudadana	0,00	0,00	0,00
Patrimonio	0,00	0,00	0,00
Centro de Acogida de Animales Abandonados	25,00	0,00	0,00
Personal	33,33	11,11	11,11
Gestión Urbanística	0,00	0,00	0,00
Prensa	0,00	0,00	0,00
Presidencia	0,00	0,00	0,00
Presupuestos y contabilidad	0,00	0,00	0,00
Registro y Estadística	0,00	0,00	0,00
Rentas	0,00	0,00	0,00
Sanciones	0,00	0,00	0,00
Sanidad	16,67	16,67	0,00
Secretaría	0,00	0,00	0,00
Taller Mecánico	0,00	0,00	0,00
Tesorería	14,28	14,28	14,28
Unidad de Sanciones	0,00	0,00	0,00
Urbanismo	0,00	0,00	0,00

7.7 RESULTADOS DE INFECCIONES: TRABAJADORES QUE ACCEDEN A MÚLTIPLES INSTALACIONES Y CENTROS MUNICIPALES

Los resultados obtenidos entre los trabajadores municipales que acceden a múltiples instalaciones y centros municipales del Ayuntamiento de Móstoles se muestran en las [Tablas 7.6](#).

Tabla 51. Porcentaje de Infecciones por COVID-19. Trabajadores Diferentes Instalaciones

Trabajadores Ayuntamiento de Móstoles	% de Infecciones Producidas		
	< 14 días	< 10 días	< 7 días
Operario de Deportes	35,71	14,29	14,28
Albañil / Carpintería / Pintura	0,00	0,00	0,00
Cerrajería	0,00	0,00	0,00
Electricidad	28,57	28,57	28,57
Fontanería	0,00	0,00	0,00
Guardas	0,00	0,00	0,00
Grupo Logístico	28,57	14;28	14;28
Inspectores / Verificadores	0,00	0,00	0,00
Limpieza de Edificios Municipales	0,00	0,00	0,00
Mantenimiento de Edificios Públicos***	76,00	70,00	60,00
Ordenanzas y Conserjes****	61,90	59,52	42,86

7.8 RESULTADOS DE INFECCIONES: TRABAJADORES QUE SU TRABAJO SE DESARROLLA FUNDAMENTALMENTE EN LA VÍA PÚBLICA

Los resultados obtenidos entre los trabajadores municipales del Ayuntamiento de Móstoles, que desarrollan su trabajo fundamentalmente en la vía pública se muestran en la [Tabla 7.7](#).

Tabla 52. Porcentaje de infecciones por COVID-19. Trabajadores en Vía Pública

Trabajadores Ayuntamiento de Móstoles	% de Infecciones Producidas		
	< 14 días	< 10 días	< 7 días
Alcantarillado / Red de riego	0,00	0,00	0,00
Alumbrado público	0,00	0,00	0,00
Desatrancos	0,00	0,00	0,00
Parques y jardines	25,00	25,00	25,00

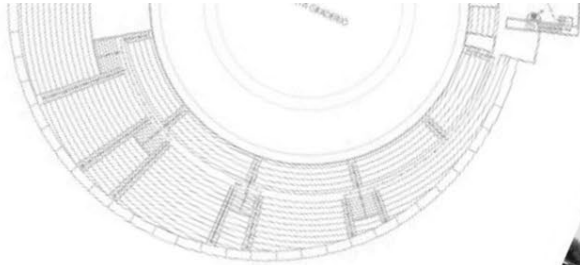


Figure 1. The images, presented in a linear sequence from left to right (The image on the left depicts the evacuation floor plan. The image on the right depicts the exterior view of the bullring).

These spaces must be designed to ensure the safety of the audience and to prevent the transmission of infection. The importance of these spaces must be ascertained through a thorough analysis of the amount of importance to ascertain the

8

Capítulo

CONCLUSIONES

CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES

La metodología de análisis desarrollada en esta Tesis Doctoral permite relacionar el grado de infectividad de una enfermedad transmitida a través del aire que se desea controlar en un recinto, con los caudales de ventilación que deben activarse en el mismo, mediante la implementación del concepto de “*Concentración de Fondo*”.

Se ha desarrollado una herramienta útil, no solo para hacer frente al virus causante de la última pandemia mundial, sino también para facilitar la gestión en futuras crisis, y poder controlar la calidad del aire en edificios críticos, como los hospitales y centros asistenciales, estableciendo la densidad de ocupación de los espacios. Además, incorpora la posibilidad de disponer de valores de ocupación considerando a las personas de forma individual, en función de las actividades físicas que estén desarrollando, así como otras referencias tales como la estatura, el peso, e, incluso, mediante la monitorización de sus frecuencias cardíacas.

Cabe señalar que, durante los tres años de pandemia, ningún organismo oficial ha publicado la concentración mínima de virus en el aire necesaria para generar una infección, ni ha puesto a disposición de los investigadores métodos de análisis biológicos en aire para ninguna de las variantes y mutaciones producidas. La investigación realizada ha demostrado que la concentración peligrosa en aire del SARS-CoV-2 se sitúa en $6,70 \cdot 10^{-3}$ vol/vol²⁵⁹, lo cual permite poder controlar la transmisión a través de la limitación de la ocupación de los espacios, mediante comparación directa con cualquier otro patógeno o contaminante que se trasmite a través del aire.

El presente trabajo muestra que la ventilación establecida en la Metodología *Steady State* CO₂ es asumible únicamente en espacios interiores asimilables a oficinas, con aforos limitados, donde la densidad de ocupación es de 1p/10 m². En ubicaciones con posibilidad de una mayor densidad de población, como puede ser una biblioteca (1p/2 m²)²⁶⁰, sigue siendo necesario alcanzar las cinco (5) renovaciones de aire a la hora para disponer de una calidad de aire de Categoría IDA 2²⁶¹.

²⁵⁹ Ballesteros-Álvarez, J.M., Romero-Barriuso, A., Villena-Escribano, B.M., Rodríguez-Saiz, A., González-Gaya, C. (2024) Investigating the effectiveness of a new indoor ventilation model in reducing the spread of disease: A case of sports centres amid the COVID-19 pandemic. *Heliyon*, 10(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27877>

²⁶⁰ Boulard, T., Meneses, J. F., Mermier, M., Papadakis, G. (1996) The mechanisms involved in the natural ventilation of greenhouses. *Agric. For. Meteorol.* 79 (1-2), 61-77. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(95\)02266-X](https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02266-X)

²⁶¹ Ministerio de la Presidencia (2007) Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios. Gobierno de España. Madrid, España. <https://www.boe.es/boe/dias/2007/08/29/pdfs/A35931-35984.pdf>

Los análisis realizados permiten afirmar que el CO₂ se comporta a nivel de suelo siguiendo los patrones de dilución de un gas pesado, mientras que en altura se asemeja más al de un gas ligero.

La literatura científica ha puesto de relieve la importancia de la ventilación natural como principal aliado en la prevención de las enfermedades y la mejora en la eficiencia energética de los edificios. Mediante el análisis de las posibilidades de ventilación natural que ofrece un edificio singular, como es el caso de la Biblioteca Central Almudena Grandes de Móstoles, España, se desarrolla una metodología que permite, en entornos a priori no controlados, establecer las bases que aseguren la calidad de aire deseada en función del aforo previsto.

El estudio muestra las capacidades disponibles en once centros municipales del Ayuntamiento de Móstoles con posibilidad de apertura de ventanas, constatando que la ventilación cruzada permite alcanzar una calidad de aire adecuada en la mayoría de los casos, y poniendo de manifiesto la capacidad de la ventilación natural para crear ambientes seguros frente a la transmisión de enfermedades como la COVID-19, mediante la reducción de aforos.

Se ha demostrado que las aperturas cenitales son de vital importancia para la mejora de la capacidad de ventilación en los edificios, cobrando especial relevancia en los meses más fríos, momento de mayor amplitud térmica entre el ambiente interior y exterior. Esta situación, unida a unas condiciones climáticas más desfavorables para la ventilación tradicional a través de las ventanas por la carencia de viento, es especialmente acusada en los periodos de inversión térmica, habituales en zona climáticas del interior de la Península Ibérica donde se ubican los edificios objeto de estudio²⁶².

La metodología propuesta también posibilita predecir el aforo óptimo en eventos multitudinarios celebrados al aire libre, de forma que se puedan garantizar las condiciones de salubridad y la seguridad sanitaria de las personas, permitiendo a los Servicios de Protección Civil gestionar los aforos en función de la calidad del aire deseada, incluso en situaciones de restricción sanitaria como las vividas durante la Pandemia del COVID-19. Esta propuesta de gestión posibilita determinar los valores de ventilación necesarios en función de la naturaleza de las actividades desarrolladas, incluso considerando eventos en recintos con personas situadas a diferente altura.

²⁶² Ballesteros-Álvarez, J. M., Romero-Barriuso, Á., Villena-Escribano, B. M., Rodríguez-Sáiz, Á., González-Gaya, C. (2025). Enhancing Indoor Air Quality Through Natural Ventilation: Insights from Municipal Building in Mostoles, Spain. *Dyna* 100(4) 2254-2833.
<https://www.revistadyna.com/articulos>

Otro aspecto singular de la investigación realizada es la posibilidad de determinar la densidad de ocupación en actos multitudinarios como las Fiestas Patronales, los conciertos al aire libre e, incluso, en recintos abiertos en altura, como las Plazas de Toros o los Estadios de Fútbol, de forma que, de acuerdo con su ocupación, se controle la calidad del aire.

Considerando que la densidad máxima en un evento multitudinario es de cuatro (4) personas por metro cuadrado, con los resultados obtenidos en la investigación se puede concluir que, en una localización superior a cinco (5) metros de altura en el exterior, no se produciría la transmisión del SARS-CoV-2 en eventos de ocio²⁶³.

Finalmente, es importante señalar que existe la posibilidad de adaptación de los resultados a ubicaciones concretas, asumiendo un mayor nivel de ocupación, tanto en la fase de diseño, optando por la utilización de valores característicos de velocidad de viento a los que se aplica expresiones matemáticas que predicen su comportamiento en función de la cercanía al terreno²⁶⁴, como durante el desarrollo del mismo, mediante la implementación de un sistema de control del aforo basado en la concentración de CO₂. Este sistema es de especial aplicación al desarrollo de eventos multitudinarios en situaciones de riesgo que requieran un mayor control de la calidad de aire, como ha ocurrido recientemente durante la crisis sanitaria del SARS-CoV-2.

8.1 LIMITACIONES

El método de trabajo expuesto en esta Tesis Doctoral adolece de varias limitaciones. En primer lugar, los resultados se han validado comparando la incidencia del virus en la población general y los datos de los contagios sufridos por los trabajadores durante su estancia en los centros municipales. La discriminación entre los contagios ocurridos en el ámbito laboral y los ocurridos en el ámbito privado, se ha hecho aplicando un límite temporal coincidente con las cuarentenas establecidas para evitar la transmisión de la enfermedad, es decir, si dos trabajadores municipales que desempeñaban sus funciones en el mismo centro de trabajo se contagiaban del virus con una diferencia horaria mayor a la establecida por la cuarentena, esto implica que el contagio se produjo en el ámbito privado. Así, se han considerado como tales todas las infecciones

²⁶³ Romero-Barriuso, Á., Ballesteros-Álvarez, J. M., Villena-Escribano, B. M., Rodríguez-Sáiz, Á., & González-Gaya, C. (2025) Occupancy and Air Quality Model for Outdoor Events: A Strategy for Preventing Disease Transmission at Mass Events. *Buildings*, 15(5), 677. <https://doi.org/10.3390/buildings15050677>

²⁶⁴ Asfour, O. (2006) Ventilation Characteristics of Buildings Incorporating Different Configurations of Curved Roofs and Wind Catchers, September 2006, School of the Built Environment Institute of Architecture. Nottingham University, United Kingdom. https://eprints.nottingham.ac.uk/56210/1/PHD_Omar%20Asfour.pdf

que se producen en el lugar de trabajo, pero posiblemente también algunas que se hayan producido en el ámbito privado. Esto implica que el error cometido siempre ha sido en el sentido de la seguridad, considerando los valores de ventilación como menos seguros de lo que realmente son. Además, solo se han podido obtener datos de contagios entre trabajadores municipales, en ningún caso de usuarios. En el caso de los Centros Deportivos, los usuarios son los que protagonizan las mayores densidades de ocupación, realizando actividades con mayor riesgo de contagio viral por emisión de carga, en caso de que alguno de los usuarios estuviera infectado.

La principal limitación que presenta el método está relacionada con la variabilidad de las condiciones ambientales exteriores, y la posibilidad de poder determinar la capacidad de ventilación requerida en los recintos, con el objetivo de asegurar un ambiente saludable para las personas en condiciones de vulnerabilidad²⁶⁵. Para evitar esta situación, se han estandarizado las condiciones de ventilación natural^{266,267}, cuyos parámetros restrictivos implican un alto nivel de seguridad en los resultados, ofreciendo varias alternativas para que la calidad de aire requerida se adapte al mayor número posible de necesidades²⁶⁸.

En consecuencia, los resultados obtenidos nos permiten concluir que la aplicación del método desarrollado en la investigación de la Tesis Doctoral permite obtener resultados satisfactorios, tanto en los centros municipales estudiados, como en la variada tipología de eventos analizados.

Como conclusión, se puede afirmar que el método desarrollado es una herramienta novedosa, dado que no solo permite establecer los caudales de ventilación necesarios para prevenir la transmisión de enfermedades a través del aire en función de su infectividad, sino también de las características y la actividad que se esté desarrollando. Es posible aplicarla tanto en recintos interiores dotados únicamente con ventilación natural, así como en espacios exteriores. En ambos casos, el control se realiza mediante la determinación de los aforos que se pueden establecer con antelación.

²⁶⁵ Burdzik, R., Chema, W., Celiński, I. (2023) A study on passenger flow model and simulation in aspect of COVID-19 spreading on public transport bus stops, *J. Public Transport.*, 25, 2023, 100063. <https://doi.org/10.1016/j.jpubtr.2023.100063>

²⁶⁶ EN 60079-10-1:2022 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

²⁶⁷ EN 202007:2006 Application guide of EN 60079-10. Electrical apparatus for explosive gas atmospheres. Classification of hazardous areas. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

²⁶⁸ Allen, J., Spengler, J., Jones, E.; Cedeno-Laurent, J. (2020) How School Buildings Influence Student Health, Thinking and Performance. Harvard T.H. Chan Healthy Buildings Program. <https://schools.forhealth.org/>



search (sêrch)
chercher), L. circăre,
To go over and exam-
to find something;
to seek (out).
investigation.
inquiring; inve-
examination.
by a ball-

9

Capítulo

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

CAPÍTULO 9: FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

La investigación desarrollada en esta Tesis Doctoral permite disponer de una herramienta eficaz para establecer restricciones de ocupación de los recintos, en función del riesgo de infectividad por transmisión de enfermedades a través del aire, tanto en situaciones de ventilación controlada como natural, y en ambientes interiores como exteriores. Además, se adapta al tipo de actividad física que se esté desarrollando, por lo que, se estima de utilidad para hacer frente a futuras crisis sanitarias, pudiendo ser aplicado tanto en entornos con personas vulnerables, como en el caso de los centros hospitalarios y asistenciales.

Cabe destacar que la Norma UNE-EN 8996:21 permite en el futuro disponer de valores exactos de ocupación adaptados a la actividad que se realiza en el centro de trabajo, aplicando el estudio de forma individualizada, teniendo en cuenta la altura y el peso de cada individuo que accede a la instalación. Además, se podrían establecer las ratios de ocupación monitorizando la frecuencia cardíaca de los usuarios que estén realizando actividades deportivas.

En consecuencia, de acuerdo con estos postulados, la investigación de esta Tesis Doctoral puede servir de punto de partida para futuras investigaciones en múltiples campos de actividad como, por ejemplo:

1. En el campo sanitario mediante la implementación del concepto de *“Concentración de Fondo”*, que permite una adaptación por comparación entre la concentración peligrosa en el aire calculada del SARS-CoV-2, y la de la nueva patología o sustancia peligrosa a la que se quiera hacer frente.
2. En la Arquitectura, especialmente en edificios residenciales, en los que se podrán asegurar las condiciones de ventilación en interiores sin necesidad de considerar en el diseño sistemas de climatización.
3. En los Planes de Seguridad para actividades y eventos celebrados tanto en recintos cerrados como al aire libre, en los que se podrá determinar la densidad de ocupación en función de la calidad del aire que se desee disponer.
4. El método de cálculo propuesto puede también ser adaptado a los contaminantes ambientales, estableciendo caudales de ventilación y densidades de ocupación referidos a su toxicidad y a su comportamiento.

Para que todas estas aplicaciones se hagan realidad, es necesario seguir profundizando en las investigaciones, mediante la monitorización de los espacios y el análisis de las consecuencias de los elementos dañinos e infecciosos en el aire.

CAPÍTULO 9

Los resultados obtenidos en esta investigación deben ser completados mediante la utilización de *Computational Fluid Dynamics* (CDF), para realizar un estudio más profundo sobre la mecánica de fluidos utilizando métodos numéricos de simulación, con el objetivo de predecir el comportamiento de los líquidos y gases dispersos en el ambiente. De igual forma, es necesario orientar las investigaciones en la implementación de aplicaciones domóticas que controlen simultáneamente la apertura de los elementos de ventilación natural, incluidos los exutorios y el funcionamiento del sistema de climatización a partir de la monitorización de la concentración de dióxido de carbono.

También es importante estudiar con más profundidad la influencia de otros parámetros como la temperatura, la humedad, la concentración de materia particulada y los compuestos orgánicos volátiles, de forma que se asegure la calidad del aire deseada con el menor gasto energético posible.

- 10

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAPÍTULO 10: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFEC-Asociación de Fabricantes de Equipos de Climatización. (2021). Recomendaciones de Ventilación para Centros Educativos. Grupo de Trabajo de Ventilación en Centros Educativos de la AFEC. Madrid, España.

<https://goo.su/FLV4TO>

Aldawoud, A. (2017) Windows design for maximum cross ventilation in buildings. *Adv. Build. Energy Res.*, 11, 67-86.

<https://doi.org/10.1080/17512549.2016.1138140.28>

Allen, J., Spengler, J., Jones, E., Cedeno-Laurent, J. (2020) How School Buildings Influence Student Health. Thinking and Performance. Harvard T.H. Chan Healthy Buildings Program. Cambridge, United States. <https://schools.forhealth.org/>

Allen, J., Macomber, J. D. (2022). Healthy Buildings: How indoor spaces can make you sick or keep you well. Harvard University Press.

Altomonte, S., Allen, J., Bluysen, P. M., Brager, G., Hescong, L., Loder, A., Schiavon, S., Weitch, J. A., Wang, L., P. Wargocki, P. Ten questions concerning well-being in the built environment. *Build. Environ.* 180 (2020) 106949.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106949>

Arribas, J. (2023) Humanity Is Facing Its Sustainability: Will Technological Progress Make the Future Unsustainable? In Science, Technology and Innovation in the History of Economic Thought, 241-256. Cham: Springer Nature Switzerland.

https://10.1007/978-3-031-40139-8_12

Asfour, O. (2006) Ventilation Characteristics of Buildings Incorporating Different Configurations of Curved Roofs and Wind Catchers, September 2006, School of the Built Environment Institute of Architecture. Nottingham University, United Kingdom. https://eprints.nottingham.ac.uk/56210/1/PHD_Omar%20Asfour.pdf

Asociación Española de Normalización (UNE) (2024) La normalización en el ámbito de las atmósferas explosivas (ATEX). <https://goo.su/5YkaYZ>

Ballesteros-Álvarez, J. M., Romero-Barriuso, A., Villena-Escribano, B. M., Rodríguez-Saiz, Á., González-Gaya, C. (2024) Investigating the effectiveness of a new indoor ventilation model in reducing the spread of disease: A case of sports centers amid the COVID-19 pandemic. *Heliyon*, 10(6).

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27877>

Ballesteros Álvarez, J. M., Romero Barriuso, Á., Villena Escrivano, B. M., Rodríguez Sáiz, Á., González Gaya, C. (2024). Safety conditions in battery rooms for renewable energy systems: dimensioning, ventilation, and classification of ATEX areas. In: Torres González, M., Rubio Bellido, C. (eds.) Towards Low and Positive Energy Buildings. Green Energy and Technology. Springer, Cham. 59-71.

https://doi.org/10.1007/978-3-031-70851-0_4

Ballesteros-Álvarez, J. M., Romero-Barriuso, Á., Villena-Escribano, B. M., Rodríguez Sáiz, Á. (2024). Estimación del tiempo máximo de permanencia de los equipos de intervención en un incendio: temperatura ambiental [Estimation of the maximum time spent by fire intervention teams: room temperature]. *Anales de Edificación*, 10 (3), 21-26. <http://dx.doi.org/10.20868/ade.2024.5485>

Ballesteros-Álvarez, J. M., Romero-Barriuso, Á., Rodríguez-Sáiz, Á., Villena-Escribano, B. M. (2025). Natural ventilation strategies to prevent airborne disease transmission in public buildings. *Eng.*, 6 (8), 197. <https://doi.org/10.3390/eng6080197>

Ballesteros-Álvarez, J. M., Romero-Barriuso, Á., Villena-Escribano, B. M., Rodríguez-Sáiz, Á., González-Gaya, C. (2025). Enhancing Indoor Air Quality Through Natural Ventilation: Insights from Municipal Building in Mostoles, Spain. (2025). *Dyna*. 254-2833. <https://www.revistadyna.com/articulos>

Boulard, T., Meneses, J. F., Mermier, M., Papadakis, G. (1996) The mechanisms involved in the natural ventilation of greenhouses. *Agric. For. Meteorol.*, 79, 61-77. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(95\)02266-X](https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02266-X)

Burdzik, R., Chema, W., Celiński, I. (2023) A study on passenger flow model and simulation in aspect of COVID-19 spreading on public transport bus stops, J. *Public Transport.*, 25, 2023, 100063. <https://doi.org/10.1016/j.jpubtr.2023.100063>

Calì, D., Korsholm, R., Müller, D., Olesen, B. (2016) Analysis of occupant's behavior related to the use of windows in German households. *Build. Environ.*, 103, 54-69. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.03.024>

CIBSE (1998) Energy efficiency in buildings. London. The Chartered Institution of Building Services Engineers.

Cincinelli, A., Martellini, T. (2017) Indoor air quality and health. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 14(11), 1286. <https://doi.org/10.3390/ijerph14111286>

Colas, A., Baudet, A., Le Cann, P., Blanchard, O., Gangneux, J. P., Baurès, E., Florentin, A. (2022) Quantitative Health Risk Assessment of the Chronic Inhalation of Chemical Compounds in Healthcare and Elderly Care Facilities. *Toxics*, 10(3), 141. <https://doi.org/10.3390/toxics10030141>

Consejería de Sanidad (2022) Dirección General de Salud Pública. Servicio de Epidemiología. Informe epidemiológico vigilancia de COVID-19: Infección por SARS-CoV-2. Comunidad de Madrid. Madrid, España. <https://goo.su/NTatR>

De Jonge, P. L. (2017) Carbon dioxide generation rates for building occupants. *Indoor Air* 27(5), 868-879. <https://doi.org/10.1111/ina.12383>

Dimitroulopoulou, S., Dudzinska, M., Gunnarsen, L., Hägerhed, L., Maula, H., Singh, R., Toyinbo, O., Haverinen, U. (2023) Indoor air quality guidelines from across the world: An appraisal considering energy saving, health, productivity, and comfort. *Environ. Intern.*, 179, 108127.

<https://www.researchgate.net/publication/372822490>

Elkabalawy, M., Al-Sakkaf, A., Mohammed, E., Alfalah, G. (2024) CRISP-DM-Based Data-Driven Approach for Building Energy Prediction Utilizing Indoor and Environmental Factors. *Sustainability*, 16, 7249.

<https://doi.org/10.3390/su16177249>

EN 100011:1991 Air conditioning. ventilation for an acceptable quality of the air in air conditioning of rooms. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

EN 13779:2005 Ventilación de edificios no residenciales. Requisitos de prestaciones de los sistemas de ventilación y acondicionamiento de recintos. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

EN ISO 7730:2006 Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local (ISO 7730:2005). European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

EN 20207:2006 IN Application Guide of EN 60079-10. Electrical Apparatus for Explosive Gas Atmospheres. Classification of Hazardous Areas. European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium

EN 16798-3:2018 Eficiencia energética de los edificios. Ventilación de los edificios. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium

EN 12101-2:2021 Smoke and heat control systems - Part 2: Natural smoke and heat exhaust ventilators, European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

EN 8996:2021 Ergonomics of the thermal environment - Determination of metabolic rate. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

EN 60079-10-1:2022 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.

Espejel, D. E., López, I. L. (2013) Determination of rates of natural ventilation in a greenhouse using theoretical models and tracer gases. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.*, 4(2) 185-198. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v4n2/v4n2a1.pdf>

CAPÍTULO 10

European Union Scientific Committee on Health and Environmental Risks (SCHER). European Commission. Brussels, Belgium. <https://goo.su/fzB06r>

European Union (2004) Environment & Health Action Plan 2004-2010. Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee. <https://goo.su/iRji>

European Union (2008). Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. <https://short.do/MHpAut>

European Union (2022). Decision (EU) 2022/591 of the European Parliament and of the Council of 6 April 2022 on a General Union Environment Action Programme to 2030. <https://goo.su/3uzUxz6>

Fabi, V., Korsholm, R., Corgnati, S. (2015) Verification of stochastic behavioral models of occupant's interactions with windows in residential buildings. *Build. Environ.*, 94, 371-383. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.08.016>

Felgueiras, F., Mourão, Z., Moreira, A., Fonseca, M. (2023) Indoor environmental quality in offices and risk of health and productivity complaints at work: A literature review. *J. Hazard. Mater. Adv.*, 10, 100314. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2023.100314>

Fukawa, Y., Ohba, M., Akamatsu, N., Onoda, R., Ikeuchi, K., Minami, K., Takahashi, N., Watanabe, F., Lida, T., Kaneko, Y., Tanabe, S. (2024) Influence analysis of environmental factors on the subjective well-being of office workers in Japan: A structural equation modeling approach. *Build. Environ.*, 262, 15, 11827. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111827>

Galičič, A., Rožanec, J., Kuček, A., Medved, S., Eržen, I. (2024) Assessment of Perceived Indoor Air Quality in the Classrooms of Slovenian Primary Schools and Its Association with Indoor Air Quality Factors for the Design of Public Health Interventions. *Atmosphere*, 15, 995. <https://doi.org/10.3390/atmos15080995>

García, C., Bluyssen, P. M. Assessing Indoor Air Quality and Ventilation to Limit Aerosol Dispersion. Literature Review. *Buildings*, 2023, 13, 742. <https://doi.org/10.3390/buildings13030742>

Gens, A., Hurley, J. F., Tuomisto, J. T., Friedrich, R. (2014) Health impacts due to personal exposure to fine particles caused by insulation of residential buildings in Europe. *Atmos. Environ.*, 84, 213-221. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.11.054>

Goshua, A., Akdis, C. A., Nadeau, K. C. (2022) World Health Organization global air quality guideline recommendations: Executive summary. *Allergy*, 77(7), 1955-1960. <https://doi.org/10.1111/all.15224>

Hao, Y., Guo, Y., Li, S., Luo, S., Jiang, X., Shen, Z., Wu, H. (2022) Towards achieving the sustainable development goal of industry: How does industrial agglomeration affect air pollution? *Innov. Green Develop.*, 1(1), 100003.

<https://doi.org/10.1016/j.igd.2022.100003>

H.A.U.S. Healthy Buildings GBCE (2020) Salud, espacios, personas. Green Building Council España. <https://gbce.es/documentos/Salud-Espacios-Personas.pdf>

Heiselberg, P. (2016) Natural Ventilation Design. *Int. J. Vent.*, 2, 295-312.

<https://doi.org/10.1080/14733315.2004.11683674>

Hernández, P., Erkoreka A., Gonzalez, Giraldo, C., Mora, L., Eguía, P. (2024) Measurement uncertainty and behavior analysis of indoor air quality variables of thermal zones of an in use mechanically ventilated building. *Build. Environ.*, 262, 111842. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111366>

Huang, K., Feng, G., Li, H., Shui Yu, S. (2014) Opening window issue of residential buildings in winter in north China: A case study in Shenyang. *Energy Build.*, 84, 567-574. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.005>

Jan, R., Roy, R., Satsangi, S. (2017) Exposure assessment of children to particulate matter and gaseous species in school environments of Pune, India. *Build. Environ.*, 111, 207-217. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.008>

Jefatura del Estado (1995) Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales. Gobierno de España. Madrid, España.

<https://www.boe.es/eli/es/l/1995/11/08/31/con>

Jefatura del Estado (2005) Ley 28/2005, de 26 de diciembre, de medidas sanitarias frente al tabaquismo y reguladora de la venta, el suministro, el consumo y la publicidad de los productos del tabaco. BOE-A-2005-21261. Gobierno de España. Madrid, España.

<https://www.boe.es/eli/es/l/2005/12/26/28/con>

Jefatura del Estado (2007) Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera. Gobierno de España. Madrid, España.

<https://www.boe.es/buscar/pdf/2007/BOE-A-2007-19744-consolidado.pdf>

Jefatura del Estado (2010) Ley 42/2010, de 30 de diciembre, por la que se modifica la Ley 28/2005, de 26 de diciembre, de medidas sanitarias frente al tabaquismo y reguladora de la venta, el suministro, el consumo y la publicidad de los productos del tabaco. BOE-A-2010-20138. Gobierno de España. Madrid, España. <https://www.boe.es/eli/es/l/2010/12/30/42>

Jeong, B., Jeong, J., Park, J. S. (2016) Occupant behavior regarding the manual control of windows in residential buildings. *Energy Build.*, 127(1), 206-216.

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.097>

Jerrett, M. (2022) Air pollution as a risk for death from infectious respiratory disease. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, 205(12), 1374-1375.

<https://doi.org/10.1164/rccm.202202-0351ED>

Jiang, Z., Kobayashi, T., Yamanaka, T., Sandberg, M., Yamasawa, H., Miyazawa Shohei, M. (2024) The similitude of indoor airflow in natural ventilation for a reduced scale model: Investigation of no isothermal flow fields by RANS simulation. *Build. Environ.*, 262, 111842.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111842>

Jiřík, V., Římanová, V., Janulková, T., Siemiatkowski, G., Osrodka, L., Krajny, E. (2024) Lifetime losses due to cardiovascular and respiratory diseases attributable to air pollution in polluted and unpolluted areas. *Int. J. Environ. Health Res.*, 34(3), 1525-1539. <https://doi.org/10.1080/09603123.2023.2225426>

Johnson, D.L., Lynch, R.A., Floyd, E. L., Wang, J., Bartels, J. N. (2018) Indoor air quality in classrooms: Environmental measures and effective ventilation rate modelling in urban elementary schools. *Build. Environ.*, 136, 185-197.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.040>

Karumuna, B. V., Hao, L. (2024) CO₂ Concentration Assessment for Infection Monitoring and Occupancy Analysis in Tanzanian COVID-19 Isolation Centers. *Buildings*, 14, 2139. <https://doi.org/10.3390/buildings14072139>

Kelly, F.J., Fusell, J. C. (2019) Improving indoor air quality, health and performance within environments where people live, travel, learn and work. *Atmos. Environ.*, 200, 90-109. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.11.058>

Keswani, A., Akselrod, H., Anenberg, S. C. (2022) Health and clinical impacts of air pollution and linkages with climate change. *NEJM Evid.* 1(7).

<https://evidence.nejm.org/doi/10.1056/EVIDra2200068>

Kotzias, D. (2022) Exposure to volatile organic compounds in indoor/outdoor environments and methodological approaches for exposure estimates the European paradigm. *J. Hazard. Mater. Adv.*, 8, 100197.

<https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100197>

Kumar, P., Singh, A. B., Arora, T., Singh, S., Singh, R. (2023) Critical review on emerging health effects associated with the indoor air quality and its sustainable management. *Sci. Total Environ.*, 872, 162163.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162163>

Laboratorio Oficial J.M. Madariaga (LOM) Breve Guía Sobre Productos e Instalaciones en Atmósferas Explosivas. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España. https://www.guemisa.com/articulos/Breve_guia_ATEX.pdf

Li, M., Bekö, G., Zannoni, N., Pugliese, G., Carrito, M., Cera, N., Moura, C., Wargocki, P., Vasconcelos, P., Nobre, P., Wang, N., Ernale, L., J. Willians, J. (2022)

Human metabolic emissions of carbon dioxide and methane and their implications for carbon emissions. *Sci. Total Environ.*, 833, 155241.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155241>

Lu, X., Pang, Z., Fu, Y., O'Neill, Z. (2022) The nexus of the indoor CO₂ concentration and ventilation demands underlying CO₂-based demand-controlled ventilation in commercial buildings: A critical review. *Build. Environ.*, 218, 109116. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109116>

Mai, J. L., Yang, W. W., Zeng, Y., Guan, Y. F., Chen, S. J. (2024) Volatile organic compounds (VOCs) in residential indoor air during interior finish period: Sources, variations, and health risks. *Hyg. Environ. Health*, 9, 100087.

<https://doi.org/10.1016/j.heha.2023.100087>

Malki, L., Adzic, F., Roberts, B., Hathway, E. A., Iddon, C., Mustafa, M., Cook, M. (2022) Measurement and rapid assessment of indoor air quality at mass gathering events to assess ventilation performance and reduce aerosol transmission of SARS-CoV-2. *Build. Serv. Eng. Res. Technol.*, 44(2), 113-133.

<https://www.researchgate.net/publication/366354932>

Markovic, R., Grintal, E., Wölki, D., Frisch, J., Van Treeck, C. (2018) Window opening model using deep learning methods. *Build. Environ.*, 145, 319-329.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.024>

Maury-Micolier, A., Huang, L., Taillandier, F., Sonnemann, G., Joliet, O. (2023) A life cycle approach to indoor air quality in designing sustainable buildings: Human health impacts of three inner and outer insulations. *Build. Environ.*, 230, 109994.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.109994>

Medina, E. K. (2019) La contaminación del aire, un problema de todos. *Revista de la Facultad de Medicina*. Universidad Nacional de Colombia, 67(2), 189-191.

<https://doi.org/10.15446/revfacmed.v67n2.82160>

Mentese, S., Mirici, N. C., Elbir, T., Palaz, E., Mumcuoğlu, D. T., Cotuker, O., Kakar, C., Oymak, S., Otkun, M. T. (2020) A long-term multi-parametric monitoring study: Indoor air quality (IAQ) and the sources of the pollutants, prevalence of sick building syndrome (SBS) symptoms, and respiratory health indicators. *Atmos. Pollut. Res.*, 11(12), 2270-2281.

<https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.07.016>

Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (2017) Plan Nacional de Calidad del Aire 2017-2019 (Plan Aire II). Gobierno de España. Madrid, España. <https://goo.su/MibENG>

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2013). Plan Nacional de Calidad del Aire y Protección de la Atmósfera 2013-2016: Plan Aire. Gobierno de España. Madrid, España.

<https://www.boe.es/buscar/pdf/2013/BOE-A-2013-5428-consolidado.pdf>

Ministerio de Ciencia e Innovación (2020) Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua, IDAEA-CSIC. Guía para la Ventilación en Aulas. Gobierno de España. Madrid, España.

<https://goo.su/M9z4e>

Ministerio de Medio Ambiente (2004) Estrategia Española de Calidad del Aire (2004)., Gobierno de España. Madrid, España. <https://goo.su/dVCz2j>

Ministerio de la Presidencia (2003) Real Decreto 681/2003, de 12 de junio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo.

<https://www.boe.es/buscar/pdf/2003/BOE-A-2003-12099-consolidado.pdf>

Ministerio de la Presidencia (2007) Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios. Gobierno de España. Madrid, España.

<https://www.boe.es/boe/dias/2007/08/29/pdfs/A35931-35984.pdf>

Ministerio de la Presidencia (2011) Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire. Gobierno de España. Madrid, España.

<https://www.boe.es/buscar/pdf/2011/BOE-A-2011-1645-consolidado.pdf>

Ministerio de la Presidencia (2021). Real Decreto 178/2001 de Modificación del Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE). Gobierno de España. Madrid, España.

<https://www.boe.es/eli/es/rd/2021/03/23/178/dof/spa/pdf>

Ministerio de Sanidad (2020). Orden SND/403/2020, de 11 mayo, sobre las condiciones de cuarentena a las que deben someterse las personas procedentes de otros países a su llegada a España, durante la situación de crisis sanitaria ocasionada por el COVID-19. Gobierno de España. Madrid, España.

<https://www.boe.es/buscar/pdf/2020/BOE-A-2020-4932-consolidado.pdf>

Ministerio de Sanidad (2021). Orden SND/413/2021, de 27 de abril, sobre las condiciones de cuarentena a las que deben someterse las personas procedentes de la República de la India a su llegada a España, durante la situación de crisis sanitaria ocasionada por el COVID-19. Gobierno de España. Madrid, España.

<https://www.boe.es/eli/es/o/2021/04/27/snd413/dof/spa/pdf>

Ministerio de Sanidad y Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico (2021) Plan Estratégico de Salud y Medio Ambiente 2022-2026. Gobierno de España. Madrid, España.

https://www.sanidad.gob.es/ciudadanos/pesma/docs/241121_PESMA.pdf

Ministerio de Trabajo (1993) Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST) Sistema simplificado de evaluación de riesgos de accidente (NTP 330). NIPO: 211-94-008-1. Gobierno de España. Madrid, España. <https://goo.su/y1U1c>

Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales (1997) 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. Gobierno de España. Madrid, España. <https://www.boe.es/eli/es/rd/1997/04/14/486/con>

Ministerio de Trabajo y Economía Social (2014) Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST) NTP 1011: Determinación del metabolismo energético mediante tablas. Gobierno de España. Madrid, España. <https://goo.su/o7LDc>

Ministerio de Trabajo y Economía Social (2001) Instituto de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). Guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo. Gobierno de España. Madrid, España. <https://goo.su/knTQb>

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Gobierno de España. Madrid, España. <https://www.aemet.es/es/portada>

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2020) Recomendaciones de operación y mantenimiento de los sistemas de climatización y ventilación de edificios y locales para la prevención de la propagación del SARS-CoV-2. Gobierno de España. Madrid, España. <https://shre.ink/5R6Y>.

Ministerio de Vivienda (2006) Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. Gobierno de España. Madrid, España. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2006/03/17/314>

Moore, F. (1993) Environmental control systems: heating cooling lighting. McGraw-Hill, Inc. New York, United States.

Morrison, G. (2015) Recent Advances in Indoor Chemistry. *Build. Environ.*, 2, 33-40. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s40518-015-0026-9.pdf>

Normalización Española (2024). La normalización en el ámbito de las atmósferas explosivas (ATEX). Asociación Española de Normalización. Madrid, España. <https://goo.su/0qV80>

Nyembwe, J., Munanga, J., Simões, N., da Silva, M. G. (2024) Ventilation Strategies to Mitigate Air Pollution Impact on Hospital Professionals in Intensive Care Units in the Democratic Republic of Congo. *Buildings*, 14, 1996. <https://doi.org/10.3390/buildings14071996>

Huang, K., Feng, G., Li, H., Yu, S. (2014) Opening window issue of residential buildings in winter in north China: A case study in Shenyang. *Energy Build.*, 84, 567-574. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.005>

Ohba, M., Lun, I. (2010) Overview of natural cross ventilation studies and the latest simulation design tools used in building ventilation-related research. *Adv. Build. Energy Res.*, 4, 127-166. <https://doi.org/10.3763/aber.2009.0405>

Pannia, P. G. (2023) Effects of air pollution on children's health, *Arch. Argent. Pediatr.*, 121(1), 1-2. <http://dx.doi.org/10.5546/aap.2022-02847>

Parhizkar, H., Taddei, P., Weziak-Bialowolska, D., McNeely, E., Spengler, J., Cedeño, J.G. (2023) Objective indoor air quality parameters and their association to respiratory health and well-being among office workers. *Build. Environ.*, 246(1), 110984. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110984>

Pei, J., Yin, Y., Junjie, J. (2016) Long-term indoor gas pollutant monitor of new dormitories with natural ventilation. *Energy Build.*, 129, 514-523. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.033>

Pei, J., Yin, Y., Liu, J., Dai, X. (2020) An eight-city study of volatile organic compounds in Chinese residences: Compounds, concentrations, and characteristics. *Sci. Total Environ.*, 698, 134137. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134137>

Persily, A. (2017) Carbon dioxide generation rates for building occupants. *Indoor Air*, 27(5) (2017) 868–879. <https://doi.org/10.1111/ina.12383>

Presidencia de la Nación (2021) Decreto 867/2021, DECNU-2021-867-APN-PTE Emergencia Sanitaria. República Argentina. Buenos Aires, Argentina. <https://www.boletinoficial.gob.ar/detalleAviso/primera/255070/20211224>

Rafaj, P., Kiesewetter, G., Gül, T., Schöpp, W., Cofala, J., Klimont, Z., Pueohit, P., Heyes, C., Amann, J., Borken, J. Cozzi, L. (2018) Outlook for clean air in the context of sustainable development goals, *Glob. Environ. Change.*, 53, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.08.008>

Rodríguez, M., Seseña, S., Valiente, N., Llanos, M., Rodríguez, A. (2024) Indoor air quality in elder. *Build. Environ.*, 262, 111832. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111832>

Romero-Barriuso, Á., Ballesteros-Álvarez, J. M., Villena-Escribano, B. M., Rodríguez-Saiz, Á., González-Gaya, C. (2025) Occupancy and air quality model for outdoor events: A strategy for preventing disease transmission at mass events. *Buildings*, 15 (5), 677. <https://doi.org/10.3390/buildings15050677>

- Romero-Barriuso, Á., Ballesteros-Álvarez, J. M., Villena-Escribano, B. M., Fuentes-Bargues, J. L., González-Gaya, C. (2025) Estimating maximum dwell time for firefighting teams based on ambient temperature and radiant heat exposure. *Fire*, 8(3), 89. <https://doi.org/10.3390/fire8030089>
- Romero-Barriuso, Á., Ballesteros-Álvarez, J. M., Villena-Escribano, B. M., Rodríguez-Sáiz, Á., González-Gaya, C. (2025). Enhancing Indoor Air Quality Through Natural Ventilation: Insights from Municipal Building in Mostoles, Spain. *Dyna*, 100 (4). 371-377. <http://dx.doi.org/10.52152/D11406>
- Sandberg, M. (2004) An Alternative View on the Theory of Cross Ventilation. *Int. J. Vent.*, 2, 409-418. <https://doi.org/10.1080/14733315.2004.11683682>
- Saraiva, T. S., De Almeida, M., Bragança, L., Barbosa, M. T. (2018) Environmental comfort indicators for school buildings in sustainability assessment tools. *Sustainability*, 10(6), 1849. <https://doi.org/10.3390/su10061849>
- Shajahan, A., Culp, C. H., Williamson, B. (2019) Effects of indoor environmental parameters related to building heating, ventilation, and air conditioning systems on patients' medical outcomes: A review of scientific research on hospital buildings. *Indoor Air*, 29(2), 161-176. <https://doi.org/10.1111/ina.12531>
- Standard ASHRAE 62.1 (2019). Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. The American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. American National Standards Institute. United States. <https://spain-ashrae.org/directriz-ashrae-62-1-2019/>
- Sharma, A. K., Sharma, M., Sharma A. K., Sharma, M., Sharma, M. (2023) Mapping the impact of environmental pollutants on human health and environment: A systematic review and meta-analysis, *J. Geochem. Explor.*, 255, 107325. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2023.107325>
- Steinemann, A., Wargocki, P., Rismanchi, B. (2018) Ten questions concerning green buildings and indoor air quality. *Build. Environ.*, 112(1), 351-358. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.010>
- Takigawa, T., Wang, B. L., Sakano, N., Wang, D. H., Ogino, K., Kishi, R. (2009) A longitudinal study of environmental risk factors for subjective symptoms associated with sick building syndrome in new dwellings. *Sci. Total Environ.*, 407(19), 5223-5228. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.06.023>
- Takigawa, T., Saijo, Y., Morimoto, K., Nakayama, K., Shibata, E., Tanaka, M., Yoshimura, T., Chikara, H., Kishi, R. (2012) A longitudinal study of aldehydes and volatile organic compounds associated with subjective symptoms related to sick building syndrome in new dwellings in Japan. *Sci. Total Environ.*, 417, 61-67. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.12.060>

Touati, K., Benzaama, M. H., El Mendili, Y., Le Guern, M., Streiff, F., Goodhew, S. (2023) Indoor Air Quality in Cob Buildings: In Situ Studies and Artificial Neural Network Modeling. *Buildings*, 13(11), 2892.

<https://doi.org/10.3390/buildings13112892>

United States Environmental Protection. United States Federal Government Agency. Washington, D.C., United States of America. <https://www.epa.gov/>

Vornanen-Winqvist, C., Järvi, K., Andersson, M. A., Duchaine, C., Létourneau, V., Kedves, O., Salonen, H. (2020) Exposure to indoor air contaminants in school buildings with and without reported indoor air quality problems. *Environ. Int.*, 141, 105781. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105781>

Walker, I. S., Wilson, D. J. (1993) Evaluating models for superposition of wind and stack effect in air infiltration. *Build. Environ.*, 28 (2), 201-210.

[https://doi.org/10.1016/0360-1323\(93\)90053-6](https://doi.org/10.1016/0360-1323(93)90053-6)

Weschler C. J. (2011) Chemistry in indoor environments: 20 years of research. *Indoor Air.*, 1, 205-2018. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2011.00713.x>

Wolf, S., Calì, D., Krogstie, J., Madsen, H. (2019) Carbon dioxide-based occupancy estimation using stochastic differential equations. *Appl. Energy*, 236, 32-41.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.078>

World Health Organization. COVID-19 Epidemiological Update. Edition 172.

<https://short.do/OHOa3m>

World Health Organization (2021). WHO Global Air Quality Guidelines. WHO European Centre for Environment and Health. Bonn, Germany.

<https://goo.su/FzaaOo>

Xiang, H., Li, J. (2024) Impact of Night Ventilation on Indoor Thermal Environment of Residential Buildings under the Dual Carbon Target: A Case Study of Xi'an.

Buildings, 14, 2459. <https://doi.org/10.3390/buildings14082459>

Xie, Z., Zhu, Y., Cao, B. (2024) Multi-fanning based simulated natural wind environment and its comfort performance under warm to hot conditions. *Build. Environ.*, 262, 111792.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111792>

Yang, S., Mahecha, S. D., Moreno, S. A., Licina, D. (2022) Integration of indoor air quality prediction into healthy building design. *Sustain.*, 14(13), 7890.

<https://doi.org/10.3390/su14137890>

Yang, X., Zhang, J., Cheng, Y., Weng, X., Yin, R., Guo, L., Cheng, Z. (2024) A Method to Optimize Dormitory Environments Based on Personnel Behavior Regulation.

Buildings, 14, 2111. <https://doi.org/10.3390/buildings14072111>

Zhang, D., Marco, M., Bluysen, P. (2022) A review on indoor environmental quality in sports facilities: Indoor air quality and ventilation during a pandemic. *Indoor. Build. Environ.*, 0(0) 1–21.

<https://www.researchgate.net/publication/366488822>

Zhang, X., Du, J., David Chow, D. (2023) Association between perceived indoor environmental characteristics and occupants' mental wellbeing, cognitive performance, productivity, satisfaction in workplaces: A systematic review. *Build. Environ.*, 246, 110985. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110985>

Zeeshan, M., Hashmi, I., Zahid, U., Bhatti, M. F. (2018) Microbial quality assessment of indoor air in a large hospital building during winter and spring seasons. *Build. Environ.*, 135, 68-73.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.010>

Zhai, Z., Johnson, M. H., Mankibi, M. E., Stathopoulos, N. (2016). Review of natural ventilation models. *Int. J. Vent.*, 15(3-4), 186-204.

<https://doi.org/10.1080/14733315.2016.1214390>

Zuraimi, M. S., Pantazaras, A., Chaturvedi, K. A., Yang, J. J., Tham, K. W., Lee, S. E. (2017) Predicting occupancy counts using physical and statistical CO₂ based modeling methodologies. *Build. Environ.*, 123, 517-528.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.027>



Capítulo

EPÍLOGO

Epílogo

Como cierre a este documento, me encuentro en la necesidad de señalar que esta tesis surgió de manera espontánea para dar respuesta a una necesidad vital, la adaptación del ser humano a la nueva realidad surgida tras el devastador COVID-19. Se ha construido como un ser vivo que se adapta y evoluciona en respuesta a su entorno, cuyas ramificaciones han llevado a desarrollar estudios muy alejados de su origen, pero siempre basándose en los mismos principios: el comportamiento de las sustancias químicas en el aire y la adaptación de la normativa ATEX a otros campos del conocimiento para proporcionar nuevas respuestas y enriquecerlos.

Aunque no fuese la idea original, que aquellos primeros trabajos desarrollados en el Ayuntamiento de Móstoles terminasen constituyendo la presente Tesis Doctoral, la vida, en ocasiones, tiene giros inesperados y gracias a la influencia de quienes creyeron en mí ayudándome en este crecimiento, mis tutores Dr. D. Ángel Rodríguez Saiz y Dr. D. Álvaro Romero Barriuso, fui moldeando la trayectoria llevándome hasta donde estoy.

Asumiendo la responsabilidad de contribuir al desarrollo y mejora de la sociedad, espero que el presente trabajo de investigación genere una base sólida para abordar futuros desafíos que mejoren el bienestar de las personas.

Tesis Doctoral

2026

AUTOR: **D. JESÚS MANUEL BALLESTEROS ÁLVAREZ**

DIRECTORES: DR. D. ÁNGEL RODRÍGUEZ SAIZ
DR. D. ÁLVARO ROMERO BARRIUSO
