

ANÁLISIS DE LA VENTILACIÓN EN INTERIORES MEDIANTE SIMULACIÓN CFD PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AIRE

ANALYSIS OF INDOOR VENTILATION USING CFD SIMULATION TO IMPROVE AIR QUALITY

Micaela B. Del Sole^a, Santiago Aguilar Ferraro^a, Ariel N. Gamarra^b, Jorge E. Colman Lerner^c, Atilio A. Porta^a, Erica Y. Sanchez^d

^aCentro de investigación de Medio Ambiente (CIM, CCT CONICET La Plata-FCE UNLP), Blvd. 120 e/ 63 y 64, La Plata 1900, Argentina.

^bLaboratorio de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental, Universidad Nacional de La Plata, La Plata 1900, Argentina.

^cCentro de Investigación y Desarrollo en Ciencias Aplicadas (CINDECA, CCT CONICET La Plata-FCE UNLP), 47 e/1 y 115, La Plata 1900, Argentina.

^dCentro de Investigaciones en Física e Ingeniería del Centro de la Provincia de Buenos Aires (CIFICEN, UNCPBA-CONICET-CICPBA), Tandil, Argentina.

Palabras clave: Ventilación en interiores, Calidad del aire, Simulación CFD.

Resumen. La calidad del aire y la ventilación en interiores son vitales para la salud, especialmente en entornos educativos. La ventilación adecuada en aulas mejora el confort térmico, la calidad del aire y el rendimiento académico. Tras la crisis del petróleo en los años 70, se priorizó la eficiencia energética, lo que redujo la ventilación natural y afectó la calidad del aire interior. La pandemia de COVID-19 ha subrayado la importancia de revisar los sistemas de ventilación, ya que la ventilación deficiente puede facilitar la propagación de enfermedades. Este estudio evaluó la ventilación en aulas de escuelas públicas en Argentina mediante simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Las mediciones de velocidad y presión dinámica se compararon con los resultados del modelo CFD, calculando la tasa de renovación de aire por hora (ACH). Aunque los resultados indicaron una ventilación adecuada, se identificaron áreas con estancamiento y recirculación de aire, sugiriendo la necesidad de mejoras. Se propuso añadir una ventana basculante para optimizar la circulación. La simulación CFD es eficaz para evaluar y optimizar la ventilación antes de cambios reales, reduciendo costos y mejorando la calidad del aire en aulas.

Keywords: Indoor ventilation, Air quality, CFD simulation.

Abstract. Air quality and indoor ventilation are crucial for health, particularly in educational settings. Proper classroom ventilation enhances thermal comfort, air quality, and academic performance. After the 1970s oil crisis, energy efficiency became a priority, reducing natural ventilation and impacting indoor air quality. The COVID-19 pandemic highlighted the need to review ventilation systems, as inadequate ventilation can aid disease spread. This study assessed ventilation in Argentine public school classrooms using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations. Velocity and dynamic pressure measurements were compared with CFD model results, calculating air change rate per hour (ACH). Despite adequate ventilation findings, areas of stagnation and recirculation prompted the proposal of a pivoting window to enhance air circulation.

1 INTRODUCCIÓN

La ventilación en interiores desempeña un papel fundamental en la calidad del aire y la salud humana. Es especialmente relevante considerando que gran parte de la población moderna, especialmente los ancianos y los niños, pasa la mayor parte de su tiempo en espacios cerrados. Numerosos estudios han demostrado que los niveles de ventilación en las aulas tienen un impacto significativo en el confort térmico, la calidad del aire interior y la salud de los estudiantes. Estos factores, a su vez, se reflejan en su capacidad de aprendizaje y rendimiento académico (Eicker, 2010; Puteh et al., 2012). Investigaciones recientes han revelado que el hacinamiento en entornos de vida y aprendizaje ha llevado a que más de la mitad de los escolares sufran de alergias y asma en los edificios escolares convencionales (Karimipannah et al., 2007). Además, se ha comprobado que un suministro insuficiente de aire exterior aumenta el riesgo de síndrome del edificio enfermo, quejas por parte de los estudiantes y altas tasas de absentismo (Deng et al. 2007; Seppänen & Fisk 2004; Sun et al. 2011).

Es importante destacar que la crisis del petróleo en los años 70 impulsó un enfoque en la eficiencia energética en la industria de la construcción. Esto resultó en la implementación de legislaciones que promovían la construcción de edificios más herméticos y térmicamente aislados. Sin embargo, este enfoque en el ahorro de energía ha llevado a una disminución de la ventilación natural, ya que se ha dejado de lado la práctica de abrir ventanas y puertas, generando una reducción significativa en la calidad del aire en interiores.

La pandemia de COVID-19 ha subrayado aún más la importancia de revisar los sistemas de ventilación en espacios interiores. En el contexto existen dos tipos principales de ventilación: la ventilación natural y la ventilación mecánica. Varios estudios han demostrado que la ventilación en interiores está estrechamente relacionada con el riesgo de contagio de enfermedades respiratorias (WHO, 2009; Yang et al., 2015). Una ventilación inadecuada puede favorecer la acumulación de partículas virales en el aire, mientras que una ventilación adecuada contribuye a la eliminación de patógenos (Bolashikov & Melikov, 2009; Correia et al., 2020; Curseu et al., 2009). Por lo tanto, es necesario emplear estrategias específicas de diseño del flujo de aire para reducir y controlar la exposición a infecciones transmitidas por el aire en espacios interiores. Es importante señalar que los sistemas de ventilación mecánica, si no se diseñan ni utilizan correctamente, pueden agravar la transmisión o propagación de enfermedades transmitidas por el aire. En contraste, la ventilación natural, especialmente la ventilación cruzada, ha demostrado ser altamente eficiente y beneficiosa en este sentido. Además, es menos costosa y ampliamente utilizada en países en vías de desarrollo, principalmente en zonas cálidas y templadas.

La tasa de renovación del aire (ACH, por sus siglas en inglés) es un parámetro importante para evaluar el rendimiento de la ventilación de los edificios y la calidad del aire interior (Zhu et al., 1999). Existen varias formas sencillas de determinar la tasa de renovación de aire. En este trabajo, se aplicará el método de anemometría. La *guía de Harvard* (Allen et al., 2020) recomienda 5-6 renovaciones de aire por hora para aulas de 100 m² con 25 estudiantes de 5-8 años, y establece una clasificación mostrada en la Fig. 1. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta es una estimación y que existen otros factores que pueden afectar la tasa de ventilación real, como la presencia de obstáculos en el flujo de aire o la presión diferencial (Kohanski & Waring, 2020; Minguillón et al., 2020; Morawska, 2005; Sheikhnejad & Yigitcanlar, 2020). Para abordar estos casos, es apropiado utilizar la simulación de Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD), que permite la solución simultánea de ecuaciones de conservación de masa, momento y energía, y considerar las condiciones turbulentas causadas por obstáculos como bancos, estudiantes, maestros, entre otros.



Figura 1: Niveles de tasa de renovación por hora (ACH). Parámetros basados en el estándar americano ASHRAE 62.1, el cual recomienda entre 5 y 6 renovaciones de aire por hora para un aula tipo de 100 m² con 25 estudiantes entre 5 y 8 años.

Con esta motivación, en este trabajo se evalúa la ventilación en los edificios escolares que utilizan ventilación natural, particularmente en las escuelas públicas de Argentina, mediante la modelización numérica. El objetivo es evaluar y validar la ventilación en un aula representativa utilizando herramientas de simulación de CFD, como paso previo para identificar opciones y mejoras que permitan optimizar la ventilación en las aulas. Además, se comparan los resultados obtenidos de ACH comúnmente utilizadas para evaluar la calidad de la ventilación.

En este sentido, la sección 2 describe la metodología para desarrollar el modelo CFD validado y el proceso de optimización. La sección 3 presenta los resultados y las discusiones del marco de optimización aplicado, y la sección 4 resumen las observaciones finales y las sugerencias para futuras investigaciones.

2 METODOLOGÍA

Con el propósito de examinar la ventilación natural en un aula representativa de una escuela pública en Argentina, se llevó a cabo un estudio en los establecimientos educativos de la ciudad de La Plata, provincia de Buenos Aires. Se seleccionaron tres tipos de aulas que, debido a sus características (tipo y ubicación de ventanas y puertas), son representativas de la mayoría de las aulas. Sin embargo, en este trabajo se presentará una de ellas.

2.1 Caso de estudio

El aula elegida para este estudio está equipada con ventanas basculantes, cada una con un tamaño de 1,05 m x 0,35 m, situadas hacia una de las avenidas de la ciudad. La puerta se encuentra en la pared opuesta a las ventanas, con unas dimensiones de 2,40 m x 1,02 m, y se abre hacia un pasillo cerrado (Fig.2). Se realizaron medidas de velocidad de viento de entrada en las ventanas y salida en la puerta. Al mismo tiempo, se tomaron medidas de presión dinámica en dichos puntos.



Figura 2: Ventana basculante del aula de estudio

2.2 Descripción del modelo CFD y configuración de la simulación.

2.2.1 Geometría y mallado

El modelo CFD fue implementado utilizando ANSYS Fluent. La geometría tridimensional (CAD) fue generada en SpaceClaim, basada en las dimensiones obtenidas a partir de mediciones directas en el área de estudio (Fig. 3). El mallado se construyó mediante ANSYS Meshing, evaluando tres niveles de refinamiento con el fin de asegurar la independencia de la solución respecto al mallado. Se seleccionó la malla con menor cantidad de elementos que aún garantizaba dicha independencia. Las mallas evaluadas presentaron una alta calidad, según los indicadores estadísticos de *Skewness* y *Orthogonal Quality*. Se utilizó un mallado tetraédrico con una resolución de 0,15 metros, resultando en un total de $1,98 \times 10^6$ elementos (Fig. 3). Las superficies consideradas en la simulación se representaron sin deslizamiento y adiabáticas, entendiendo que es una simplificación al sistema real.

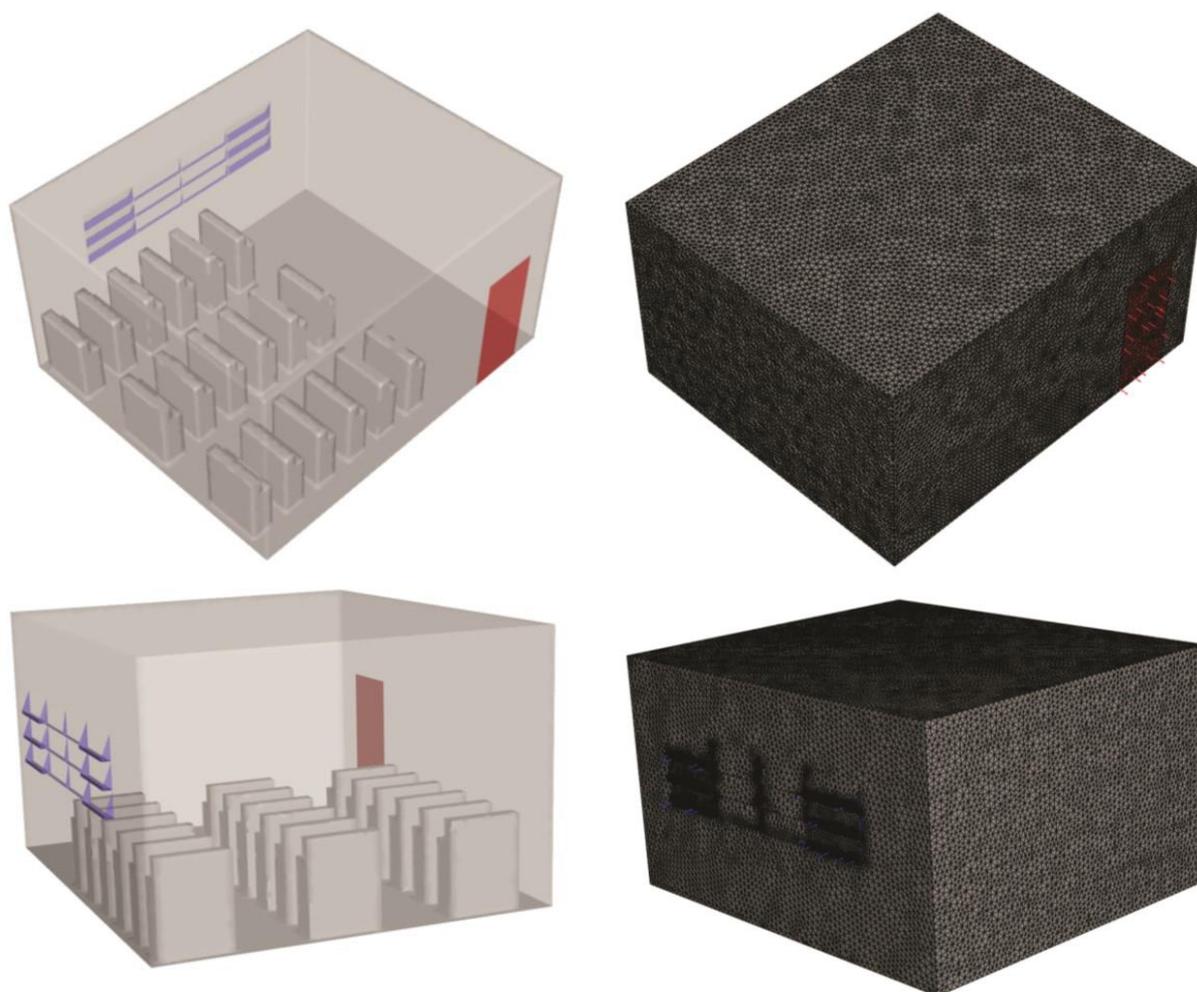


Figura 3: Izquierda: Geometría del aula, con azul se marca la zona *inlet* y con rojo, *outlet*. Derecha: Configuración del mallado.

2.2.2 Configuración de la simulación

La configuración de la simulación computacional busca representar de manera precisa los aspectos fluidodinámicos del aula en estudio. Se optó por una modelización en estado estacionario, empleando el modelo de turbulencia RANS $k-\varepsilon$ *realizable* con tratamiento mejorado de pared, ya que este ofrece un equilibrio entre precisión y recursos computacionales, en comparación con una simulación LES (*Large Eddy Simulation*), siendo adecuado para este estudio tras su validación (Arjmandi & Fallahpour, 2022).

Para resolver las ecuaciones de conservación, se utilizó el método de acoplamiento presión-velocidad con el algoritmo COUPLE, mientras que el esquema de discretización espacial fue de segundo orden *upwind* para todas las ecuaciones, siguiendo la metodología descrita por Mou & Khoo (2021).

En cuanto a las condiciones de contorno, se estableció una velocidad de entrada (*inlet*) en las aberturas de las ventanas, las cuales se modelaron como puntos de ingreso de flujo. La velocidad aplicada, 0,4 m/s, fue determinada como el promedio de las mediciones realizadas in situ en el aula. Además, se definió una condición de salida (*outlet*) con presión atmosférica

en la abertura opuesta, para permitir el flujo de aire. Estas condiciones garantizan una representación precisa de la dinámica de flujo dentro del aula y permiten obtener resultados confiables en la simulación.

Se analizaron tres escenarios de circulación del flujo dentro del aula, con diferentes configuraciones de aberturas (ventana y puerta), con el fin de evaluar la efectividad de la ventilación en cada caso. A continuación, en la Tabla 1, se detallan las condiciones de borde para los escenarios A, B y C:

Condiciones de Borde	Escenario A (Aula con ventanas y puerta abiertas)	Escenario B (Aula con ventana basculante, ventana y puerta)	Escenario C (Aula con ventana basculante, puerta cerrada)
Ventana Inlet	Velocidad 0,4 m/s	Velocidad 0,4 m/s	Velocidad 0,4 m/s
Puerta Outlet	Puerta abierta: Presión atmosférica (outlet)	Puerta abierta: Presión atmosférica (outlet)	Puerta cerrada: No hay flujo
Otras Aberturas		Ventana basculante adicional (inlet con 0,4 m/s)	Ventana basculante adicional (inlet con 0,4 m/s)

Tabla 1. Condiciones de borde aplicadas en los escenarios A, B y C para la simulación CFD.

2.3 Cálculo y evaluación de la tasa de renovación de aire por hora (ACH)

Se calculó la ACH mediante el caudal de aire que fluye a través de las ventanas, $G[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$. Una vez calculados los caudales que entran por cada una de las ventanas se puede obtener el valor de la tasa de renovación de aire como (Ecuación 1):

$$ACH = 3600[\text{s} \cdot \text{h}^{-1}] \cdot \frac{G}{V_{\text{aula}}} [\text{h}^{-1}] \quad (1)$$

donde V_{inv} es el volumen del aula $[\text{m}^3]$ (Molina Aiz, 2010). (1)

Por último, se comparó el valor obtenido con los niveles de ACH basados en el estándar americano ASHRAE 62.1 (Fig.1)

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Comparación de Resultados: Simulaciones CFD vs. Mediciones In Situ

Posteriormente de la obtención de las medidas *in situ* en el aula y de igual manera la obtención de resultados en las simulaciones se procede a analizar los resultados para comprobar así la fiabilidad del programa *Ansys Fluent* en este tipo de estudios.

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos de la simulación y los medidos en el aula. Cabe destacar que no se compara el valor de la velocidad del viento en la ventana, ya que este se ingresó como valor de entrada (*inlet*) en la simulación.

	Puerta		Ventanas
	Presión [Pa]	Velocidad [m/s]	Presión [Pa]
Simulación CDF	0,1130363	0,42899404	0,1035848
Medida in situ	0,11	0,4	0,10

Tabla 2. Resultados obtenidos en la simulación CFD y medidos en el aula de estudio.

El rendimiento del modelo se cuantificó mediante varios parámetros estadísticos que permiten evaluar la capacidad del modelo CFD para reproducir las condiciones reales medidas en el aula. Los parámetros utilizados son el sesgo fraccional (FB, *fractional bias*), el error medio cuadrático normalizado (NMSE, *normalized meansquare error*), la fracción de predicción que está dentro de un factor de dos de las observaciones (FAC2, *factor of two of the observations*). Las ecuaciones se presentan a continuación:

$$FB = \frac{\bar{O} - \bar{M}}{0.5(\bar{M} + \bar{O})}, \quad (2)$$

$$NMSE = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i O_i)}, \quad (3)$$

$$FAC2 = \text{fraction of data that satisfy } 0.5 \leq \frac{M_i}{O_i} \leq 2.0, \quad (4)$$

Siendo M el valor obtenido de la modelización y O el valor observado.

Estos parámetros estadísticos se compararon con los rangos de aceptación propuestos por Chang y Hanna (2004) y Hanna y Chang (2012), que son referencias clave en la evaluación del desempeño de modelos de calidad del aire. Los resultados obtenidos muestran un buen rendimiento del modelo, ya que todos los valores calculados se encuentran dentro de los rangos aceptados para estudios de este tipo.

	Evaluación de la simulación			Criterio de Aceptación	
	Puerta		Ventanas	Chang and Hanna (2004)	Hanna and Chang (2012)
	Presión	Velocidad	Presión		
FB	0,027	0,07	0,035	FB <0.3	FB <0.67
NMSE	0,0007	0,005	0,001	NMSE<1.5	NMSE<1.5
FAC2	1,028	1,07	1,036	FAC2>0.5	FAC2>0.3

Tabla 3. Parámetros estadísticos calculados a partir de la evaluación de la simulación y los criterios de aceptación propuestos por Chang y Hanna (2004) y Hanna y Chang (2012). Todos los parámetros son adimensionales

Los parámetros estadísticos calculados muestran que el modelo CFD utilizado en este estudio

logra una alta correspondencia con las condiciones medidas in situ, validando así la fiabilidad y precisión del modelo de simulación implementado en ANSYS Fluent para este tipo de estudios de ventilación. Estos resultados están respaldados por su cumplimiento con los rangos de aceptación ampliamente reconocidos en la literatura, lo que refuerza la validez del enfoque adoptado.

3.2 Cálculo y evaluación de la tasa de renovación de aire por hora (ACH)

El cálculo de ACH arrojó un valor de 21,8, considerando una velocidad de entrada de viento de 0,4 m/s , lo que indica una buena ventilación. Sin embargo, es importante destacar que este valor se obtuvo considerando todas las ventanas y la puerta abiertas, una condición que rara vez se presenta durante las clases debido al ruido, el calor o el frío que puede ingresar al aula.

Si se realiza el cálculo con la velocidad promedio que se registró con la puerta estaba cerrada, que era de 0,1 m/s, el ACH alcanza un valor de 5,5 (bueno).

Guiándonos por el cálculo de la tasa de ventilación, ACH, la ventilación del aula estudiada sería óptima para el dictado de clases. Sin embargo, como se mencionaba anteriormente, este parámetro es una estimación y no contempla la presencia de obstáculos en el flujo de aire como el mobiliario del aula, que pueden afectar a la ventilación real. Analizando las líneas de flujo de la simulación se puede ver que la circulación del aire no es efectiva, ya que se observan zonas de estancamiento del flujo y recirculación del aire (Fig. 4).

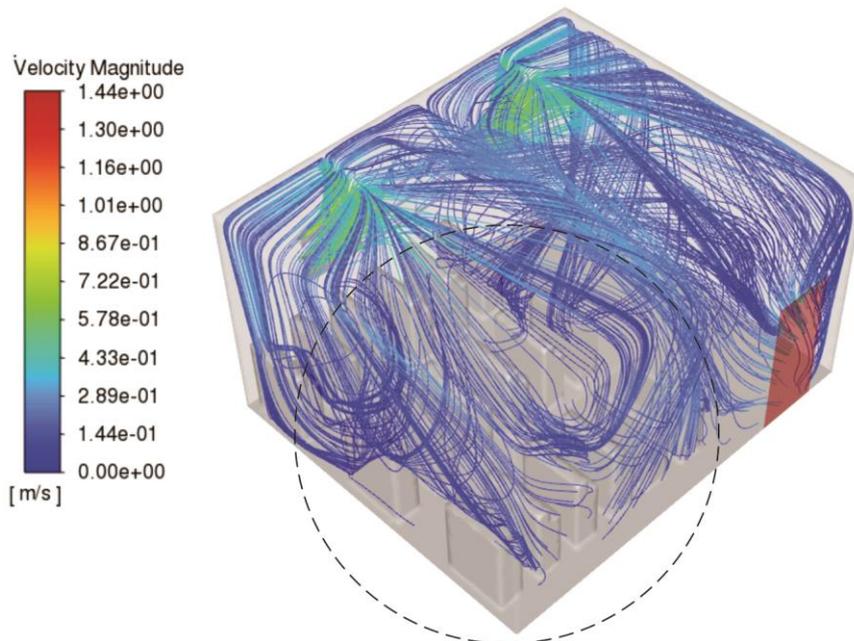


Figura 4: Simulación en CFD, se muestran las líneas de corriente del flujo. Se indica con un círculo punteado la zona de estancamiento y recirculación del aire.

Se realizaron modificaciones en el aula buscando mejorar la circulación efectiva del aire, para ello se agregó una ventana basculante sobre la pared donde se ubica la puerta Fig. 5.

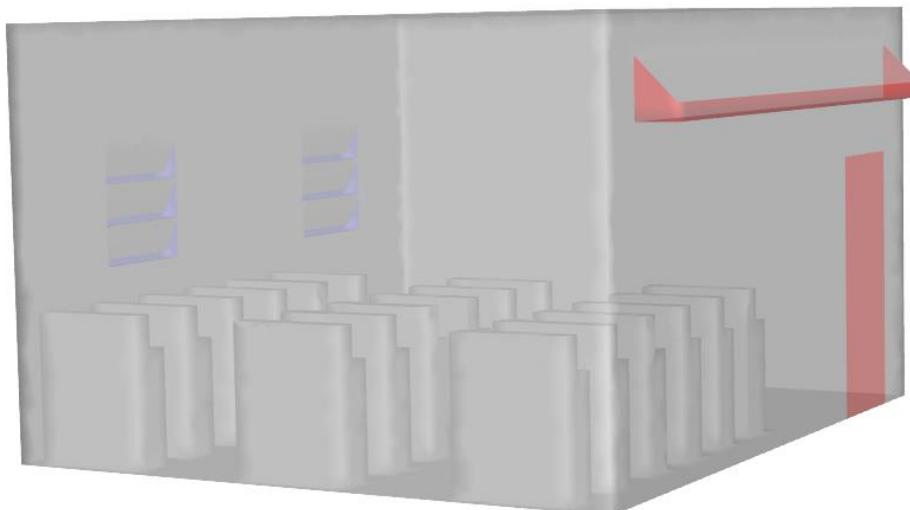


Figura 5: Geometría del aula modificada para mejorar la circulación del aire.

Analizando las líneas de circulación en tres escenarios (Fig. 6): el aula actual con ventana y puerta abierta (a), el aula con el agregado de la ventana basculante, con las ventanas y puerta abierta (b) y el aula con la modificación, pero la puerta cerrada (c); se puede ver como mejora la circulación efectiva, siendo la mejor situación el escenario B. En el escenario A se puede observar dos celdas de circulación, de las cuales la de la parte superior (más lejos de la puerta) presenta un estancamiento y una recirculación del aire, dificultando el recambio de aire en esa zona.

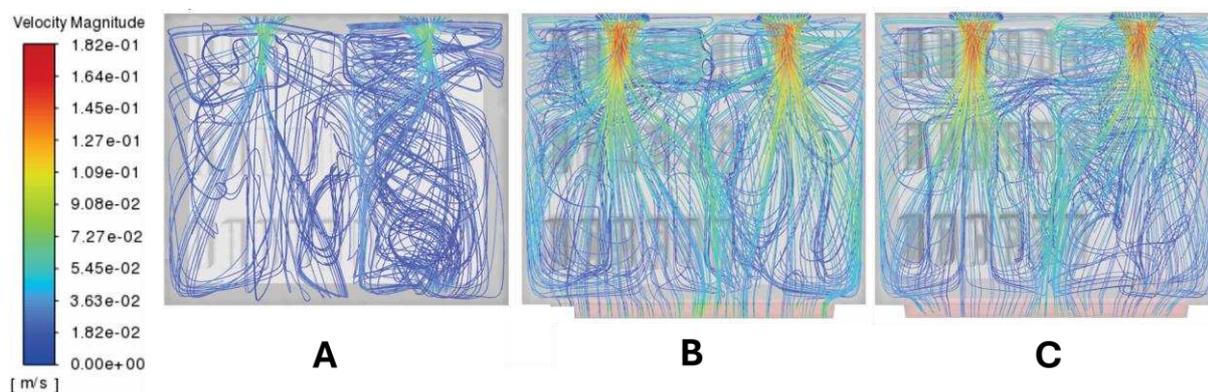


Figura 6: Líneas de circulación a) aula actual con puerta abierta; b) aula con la modificación de la ventana y puerta abierta; b) aula con la modificación de la ventana y puerta cerrada.

4 CONCLUSIONES

Si bien los cálculos sencillos de ACH resultan útiles para evaluar la ventilación en las aulas, no proporcionan información sobre la circulación del aire. En este estudio se demuestra que la CFD, es una herramienta excelente para visualizar la circulación del aire, lo cual mejora la distribución de otros parámetros críticos como la temperatura y el dióxido de carbono (CO_2), que influyen en el confort del entorno escolar. Queda evidenciado que no es suficiente evaluar la tasa de ventilación de las aulas, sino que es necesario considerar la

circulación efectiva del aire.

Además, se destaca el gran potencial de la simulación CFD, que permite realizar simulaciones de posibles mejoras y analizar las diferentes opciones antes de implementarlas, lo que ayuda a reducir costos.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, J., Spengler, J., Jones, E., & Cedeno-Laurent, J. (2020). 5-step guide to checking ventilation rates in classrooms. *Harvard Healthy Buildings Program*. Disponible: <https://schools.forhealth.org/ventilation-guide/>
- Arjmandi, H., Amini, R., & Fallahpour, M. (2022). Minimizing the respiratory pathogen transmission: Numerical study and multi-objective optimization of ventilation systems in a classroom. *Thermal Science and Engineering Progress*, 28, 101052.
- Bolashikov, Z. D., & Melikov, A. K. (2009). Methods for air cleaning and protection of building occupants from airborne pathogens. *Building and Environment*, 44(7), 1378-1385.
- Chang, J. C., & Hanna, S. R. (2004). Air quality model performance evaluation. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 87(1-3), 167-196.
- Correia, G., Rodrigues, L., Gameiro da Silva, M., Gonçalves, T. (2020). Airborne route and bad use of ventilation systems as non-negligible factors in SARS-CoV-2 transmission, *Med. Hypotheses*. 141 109781
- Curseu, D., Popa, M., Sirbu, D., & Popa, M. S. (2009). Engineering control of airborne disease transmission in health care facilities. In *International Conference on Advancements of Medicine and Health Care through Technology: 23–26 September, 2009, Cluj-Napoca, Romania* (pp. 1-4). Springer Berlin Heidelberg.
- Deng D.Y., Cai J.Y., and Zhou Y.Y. (2007). Measured CO2 pollutant and air fresh volume in classroom. *Environmental Science and Technology*, 30(9), 45-49.
- Eicker, U. (2010). Cooling strategies, summer comfort and energy performance of a rehabilitated passive standard office building. *Applied Energy* 87 2031–2039.
- Hanna, S., Chang, J. (2012). Acceptance criteria for urban dispersion model evaluation. *Meteorol. Atmos. Phys.* 116 (3–4), 133–146.
- Karimipannah, T., Awbi, H.B., Sandberg, M., Blomqvist, C. (2007). Investigation of air quality, comfort parameters and effectiveness for two floor level air supply systems in classrooms. *Building and Environment* 42 647–655.
- Kohanski, M. A., Lo, L. J., & Waring, M. S. (2020). Review of indoor aerosol generation, transport, and control in the context of COVID-19. In *International forum of allergy & rhinology* (Vol. 10, No. 10, pp. 1173-1179).
- Minguillón, M. C., Querol, X., Felisi, J. M., & Garrido, T. (2020). Guía para ventilación de las aulas CSIC. Disponible en <https://digital.csic.es/handle/10261/221538>
- Molina Aiz, F. D. (2010). *Simulación y modelación de la ventilación en invernaderos de almería mediante la utilización de dinámica computacional de fluidos* (Doctoral dissertation, Universidad de Almería).
- Morawska, L. (2005). Droplet fate in indoor environments, or can we prevent the spread of infection?. In *Indoor Air 2005: Proceedings of the 10th International Conference on Indoor Air Quality and Climate* (pp. 9-23). Tsinghua University Press.
- Mou, J., Cui, S., & Khoo, D. W. Y. (2021). Numerical investigation of airflow field and CO2 distribution inside a seminar room for sensor placement. *Measurement: Sensors*, 18, 100119.
- Puteh, M., Ibrahim, M.H., Adnan, M. Cheahmad, C.N., Noh, N.M.(2012). Thermal comfort in classroom: constraints and issues. *Procedia—Social and Behavioural Sciences* 46 1834–1838.

- Seppänen O. A. and Fisk W. J. (2004). Summary of human responses to ventilation. *Indoor Air*, 14(s7), 102-118.
- Sheikhnejad, Y., & Yigitcanlar, T. (2020). Scientific landscape of sustainable urban and rural areas research: A systematic scientometric analysis. *Sustainability*, 12(4), 1293.
- Sun Y., Zhang Y., and Bao L. (2011). Ventilation and dampness in dorms and their associations with allergy among college students in China: a case-control study. *Indoor Air*, 21, 277– 283.
- World Health Organization (WHO). (2009). Natural ventilation for infection control in health care settings. World Health Organization. Disponible en <https://iris.who.int/handle/10665/44167>
- Yang, J., Sekhar, S. C., Cheong, K. W. D., & Raphael, B. (2015). Performance evaluation of a novel personalized ventilation-personalized exhaust system for airborne infection control. *Indoor Air*, 25(2), 176-187.
- Zhu N., Tian Z., and Wang K.H.1999. Use of tracer gas measurement in HVAC systems. *HVAC*, 29(2), 58-62.