

Estimación del aforo en un salón de clases según su tamaño y capacidad de ventilación en tiempos de pandemia por el coronavirus SARS-CoV-2

Estimativa da capacidade de uma sala de aula de acordo com seu tamanho e capacidade de ventilação em tempos de pandemia pelo coronavírus SARS-CoV-2

Estimation of Classroom Capacity Based on Its Size and Ventilation Capacity during the SARS-CoV-2 Coronavirus Pandemic

Angélica Mares-Rodríguez, Rosa María Flores-Serrano, Armando González-Sánchez

Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Cita: Mares-Rodríguez A, Flores-Serrano RM, González-Sánchez A. Estimación del aforo en un salón de clases según su tamaño y capacidad de ventilación en tiempos de pandemia por el coronavirus SARS-CoV-2. Rev. Salud ambient. 2022; 22(1):91-99.

Recibido: 18 de enero de 2022. **Aceptado:** 18 de abril de 2022. **Publicado:** 15 de junio de 2022.

Autor para correspondencia: Armando González-Sánchez

Correo e: agonzalezs@iingen.unam.mx
Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Financiación: Este grupo no ha contado con ningún tipo de financiación para el desarrollo de su trabajo.

Declaración de conflicto de intereses: Los autores declaran que no existen conflictos de intereses que hayan influido en la realización y preparación de este trabajo.

Declaraciones de autoría: Todos los autores contribuyeron al diseño del estudio y a la redacción del artículo. Asimismo todos los autores aprobaron su versión final.

Resumen

Se llevó a cabo un análisis basado en un modelo de balance de masa de CO_2 en un salón de clases de cierto volumen ($V_{\text{salón}}$). El modelo consideró los parámetros de velocidad de producción de CO_2 por persona y la capacidad de renovar el aire interior (ACH), obteniendo una ecuación que se puede usar para estimar el número de alumnos que (al mismo tiempo) pueden usar un salón de clases de tamaño definido ($V_{\text{salón}}$) sin alcanzar el nivel de concentración de CO_2 máximo permisible, que minimizaría el riesgo de transmisión aérea del virus SARS-CoV-2.

Palabras clave: aire interior; plantel educativo; SARS-CoV-2; transmisión aérea; ventilación.

Resumo

Realizou-se uma análise baseada num modelo de balanço de massa de CO_2 numa sala de determinado volume (V_{sala}). O modelo considerou os parâmetros taxa de produção de CO_2 por pessoa e a capacidade de renovação do ar interior (ACH), obtendo uma equação que pode ser usada para estimar o número de alunos que (ao mesmo tempo) podem usar uma sala de aula de tamanho definido (V_{sala}) sem atingir o nível máximo permitido de concentração de CO_2 , o que minimizaria o risco de transmissão aérea do vírus SARS-CoV-2.

Palavras-chave: ar interior; estabelecimentos de ensino; SARS-CoV-2; transmissão aérea; ventilação.

Abstract

An analysis was conducted based on a model of CO_2 mass balance inside a classroom of a certain volume ($V_{\text{classroom}}$). The model considered the parameters of CO_2 production rate per person and indoor air renewal capacity (air changes per hour,

or ACH), an equation being obtained that can be used to estimate the number of students that can use (at the same time) a classroom of a defined size ($V_{\text{classroom}}$) without the maximum allowable CO_2 concentration level being reached, which would minimize the risk of airborne transmission of the SARS-CoV-2 virus.

Keywords: indoor air; educational facility; SARS-CoV-2; airborne transmission; ventilation.

INTRODUCCIÓN

En marzo de 2020, la Organización Mundial de la Salud (OMS) declaró la emergencia sanitaria mundial por la propagación del virus SARS-CoV-2 (*Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2*, por sus siglas en inglés; en español: coronavirus tipo 2 del síndrome respiratorio agudo grave), causante de la enfermedad COVID-19 (acrónimo del inglés *coronavirus disease 2019*; en español: enfermedad por coronavirus de 2019). Algunos autores han identificado hasta 43 síntomas diferentes¹, siendo los más importantes, por la frecuencia con que se presentan, fiebre, falta de apetito, tos, expectoración, dificultad para respirar, molestias (opresión) en el pecho, fatiga y diarrea. Estos síntomas pueden variar en cantidad e intensidad, dependiendo de factores que aún no son bien entendidos; entre los factores de riesgo que se han mencionado se encuentran la edad, el género y las comorbilidades (sobre todo condiciones cardiovasculares preexistentes)². Su medio de contagio es de persona a persona por medio de secreciones respiratorias que se propagan principalmente por vía aérea. Otra vía de propagación es el fómite, aunque se estima actualmente³ que el riesgo de contagio por esta vía es solo de 1 en 10 000. Por esta razón surge el interés sobre la ruta de transmisión área, ya que representa un riesgo alto de propagación del virus, considerando que esta vía genera partículas llamadas aerosoles, con tamaño inferior a 5 μm de diámetro y dinámicas de flujo en el aire que incluyen chorros turbulentos, evaporación y sedimentación⁴.

Uno de los efectos colaterales de la pandemia ha sido el rezago educativo de algunos estudiantes, ya que, debido a los mecanismos de transmisión antes descritos, una de las primeras medidas que se tomaron a nivel mundial para tratar de controlar la propagación del coronavirus fue la suspensión de clases presenciales que en la mayoría de los casos fueron sustituidas por clases en línea. Dependiendo de aspectos como el nivel económico de los países y el avance tecnológico⁵, esta medida fue más o menos exitosa. En 2020, Naciones Unidas⁶ propuso cuatro pasos para tratar de revertir este rezago educativo: 1) reabrir las escuelas; 2) dar prioridad a la educación en las decisiones de financiación; 3) dirigir la acción hacia aquellos a los que es más difícil llegar; y 4) construir hoy el futuro de la educación.

Por ello se busca mayor investigación sobre la dispersión del patógeno y cómo se puede disminuir la propagación del mismo, con un enfoque particular en recintos escolares⁷, dado que los alumnos permanecen por periodos prolongados y con ocupaciones altas, lo cual los expone a partículas del aire contaminadas. Además, si no existe una adecuada ventilación y un buen distanciamiento, estos hechos contribuyen a la diseminación del virus⁸.

TRASMISIÓN DEL VIRUS POR VÍA AÉREA

Como ya se dijo, la vía más importante de transmisión del virus SARS-CoV-2 son los aerosoles, debido a que tienen la capacidad de mantenerse suspendidos en el aire por varios minutos o incluso horas, y con esto propagarse de individuos infectados a individuos sanos presentes en un espacio⁹.

Las gotículas son pequeñas partículas formadas básicamente por agua, que son exhaladas por una persona. Estas gotas son producidas por los seres humanos al respirar, hablar, estornudar, toser y cantar, y cuando son emitidas por un individuo infectado, pueden ser inhaladas por un individuo sano, produciendo muy probablemente un contagio¹⁰. Las gotas de mayor tamaño seguirán una trayectoria balística depositándose en superficies o directamente en ojos, nariz y boca de un interlocutor, mientras que las gotas llamadas aerosoles son de un tamaño inferior a 5 μm y, por lo tanto, permanecen boyantes y pueden difundirse por largas distancias si reducen su tamaño por diversos factores como la evaporación, la humedad y la temperatura¹¹.

Cuando los aerosoles se acumulan en un espacio interior poco ventilado o de plano cerrado, el riesgo de contagio por SARS-CoV-2 es alto y se incrementa aún más cuando el tiempo de exposición es prolongado¹². Una medida de prevención es mover los aerosoles en el aire interior poco ventilado, siendo una forma práctica de hacerlo la renovación del mismo con aire exterior fresco. Los parámetros que se deben considerar son el flujo del aire, el tamaño del recinto, la posición de las personas, sistema de distribución del aire y la posible presencia de corrientes de aire naturales¹³.

Actualmente existe evidencia suficiente sobre la trasmisión del virus mediante aerosoles^{14,15}, por consiguiente, se deben plantear medidas para su control fáciles de implementar, teniendo como objetivo principal los salones de clase, para de esta manera contribuir al regreso seguro de los alumnos a las clases presenciales. Por lo anterior es muy importante estimar cuántos individuos pueden permanecer en una misma aula y con qué período de tiempo. Una condición necesaria es determinar la tasa de ventilación dentro del recinto, con el objetivo de disminuir la posible concentración viral emitida en los aerosoles por los ocupantes del salón, en caso de que estuvieran infectados uno o varios de ellos. Si es necesario incrementar el número de ocupantes, al estimado previamente se deben proponer nuevas estrategias de ventilación que incrementen la tasa de renovación de aire del recinto.

SISTEMAS DE VENTILACIÓN

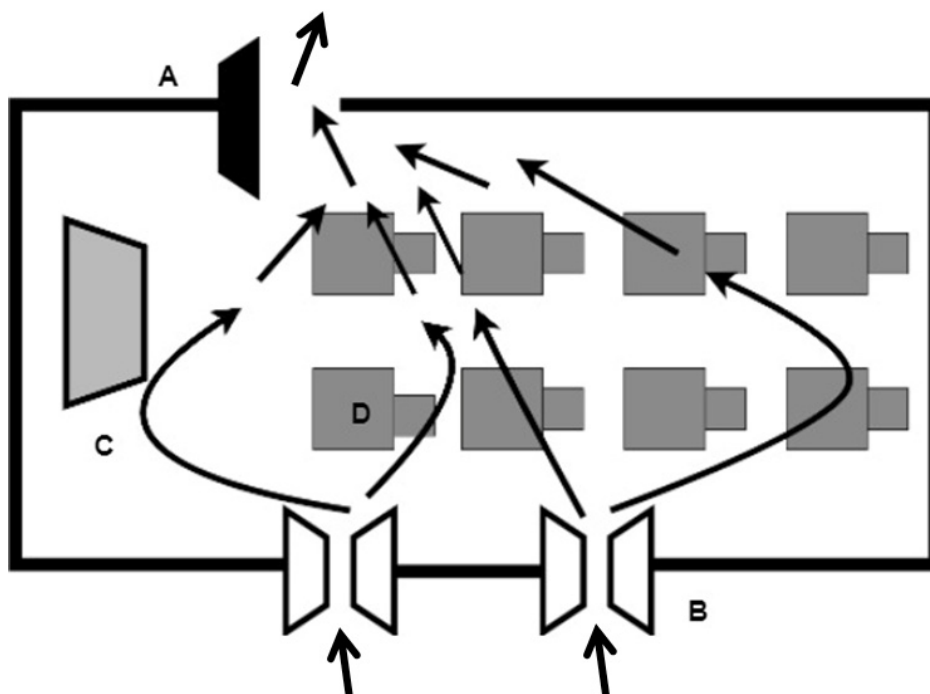
La ventilación es un proceso en el cual se deja entrar aire exterior a un espacio cerrado, ya sea por medios mecánicos o naturales y, en casos especiales, es

necesario agregar filtros que limpien el aire antes de ser introducido¹³. Las estrategias de ventilación se deben adaptar según los diseños de los edificios. Los sistemas de ventilación se pueden clasificar en tres categorías basándonos en las fuerzas que ayudan a promoverla.

I. Ventilación natural: consiste en aumentar la renovación del aire con fuerzas naturales promovidas por el viento, que desplazan el aire viciado sin necesidad de medios mecánicos. La figura 1 muestra un arreglo típico de ventilación cruzada natural en un salón de clases, la cual se ejecuta cuando las ventanas y puertas dispuestas en lados opuestos del recinto se mantienen abiertas simultáneamente⁴.

Los sistemas de ventilación natural son económicos porque funcionan con las fuerzas naturales, sin embargo, este tipo de ventilación depende de condiciones climatológicas, como la velocidad del viento y la temperatura; además, al mantener ventanas o puertas abiertas, el ruido exterior puede producir malestar e incomodidad, sobre todo si se trata de espacios dedicados al sector educativo, y esto podría interferir con el aprendizaje de los alumnos.

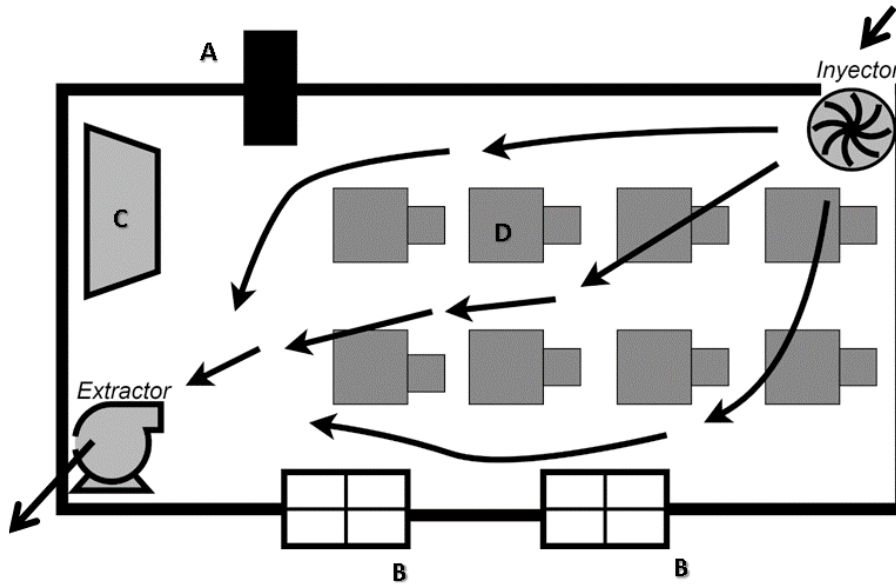
Figura 1. Ventilación natural. A, Puerta; B, Ventana; C, Pizarra/Pantalla; D, Pupitre



II. Ventilación mecánica (forzada): se promueve mediante la aplicación de fuerzas motrices mecánicas que incluyen el uso de inyectores de aire o extractores (ver figura 2), y deben ser especificados de acuerdo con el tamaño del salón de clases y el aforo necesario.

La ventilación mecánica se aplicará en el caso de que la renovación de aire por medios naturales no resulte suficiente para el uso seguro de los recintos educativos¹⁶. Este sistema ofrece dinámicas de control de flujo del aire renovado, pero a costos económicos y ambientales

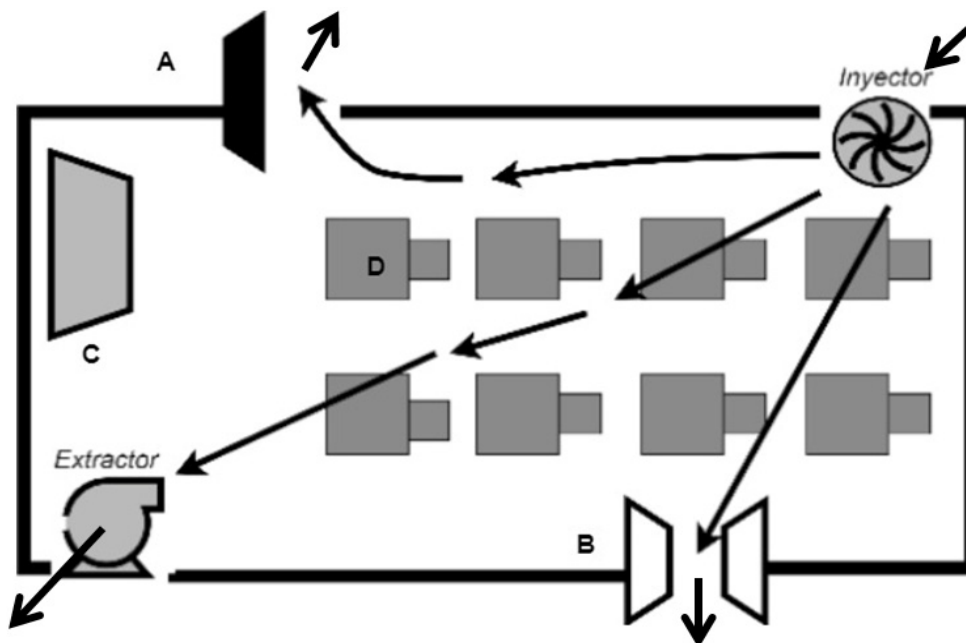
Figura 2. Ventilación mecánica. A, Puerta; B, Ventana; C, Pizarra/Pantalla; D, Pupitre



más elevados si se le compara con la ventilación natural, porque se requiere del uso de energía⁷. En este sentido, además debe sumarse el costo energético de acondicionar este flujo de aire exterior que es inyectado al recinto escolar (calefacción o refrigeración y control de humedad, según las condiciones climatológicas de la localidad). Este consumo puede aumentar desproporcionadamente a mayor tamaño del recinto educativo (salones, auditorios y similares), lo cual podría convertir esta opción como inviable bajo condiciones de altas tasas de renovación.

III. Ventilación híbrida: este tipo de ventilación se muestra esquemáticamente en la figura 3. Esta configuración permite la combinación de sistemas mecánicos y naturales para mejorar las tasas de ventilación¹⁶. Los conductos de extracción se deben colocar de manera vertical y lejanos al inyector, para incitar la presión diferencial y aprovechar la profundidad del recinto, donde, además, las puertas y ventanas abiertas deben estar en una posición que permita el movimiento pasivo del aire a través del recinto educativo¹⁷. Los sistemas híbridos de ventilación pueden reducir el

Figura 3. Ventilación híbrida. A, Puerta; B, Ventana; C, Pizarra/Pantalla; D, Pupitre



consumo energético al combinar dos mecanismos de ventilación, además de aumentar los ciclos de vida de los dispositivos de ventilación, los cuales podrían utilizarse con menos potencia al asistirse con ventilación natural¹⁸.

MONITOREO DE LA CONCENTRACIÓN DE CO₂ COMO INDICADOR DE LA CALIDAD DEL AIRE INTERIOR

El monitoreo de la concentración de CO₂ es una herramienta que ayuda a evaluar directamente la calidad de aire en espacios interiores. Los seres humanos al respirar y exhalar liberan CO₂ y aerosoles en forma simultánea al aire circundante. Debido a la dificultad

técnica de medir los aerosoles en el aire interior se utiliza al CO₂ como indicador de la calidad de aire interior¹⁷. Por tanto, cuando el aire está poco renovado o “viciado” se incrementa el riesgo de contraer una enfermedad cuya vía de contagio es aérea, como es el caso de la COVID-19¹⁹⁻²¹.

Existen medidas que recomienda la OMS para disminuir el riesgo de transmisión del virus SARS-CoV-2, entre estas se encuentra mantener concentraciones de CO₂ inferiores a 1 000 ppmv (partes por millón volumen) en el aire interior de recintos cerrados²². La tabla 1 describe los niveles de riesgo de contagio según la concentración de CO₂ alcanzada en el aire interior.

Tabla 1. Correlación del riesgo de contagio del virus SARS-CoV-2 con la concentración de CO₂ en espacios cerrados. Adaptado de Di Gilio y col.²²

Concentración de CO ₂ (ppmv)	<700	700 a 800	800 a 1 000	>1 000
Nivel de riesgo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto

METODOLOGÍA

EVALUACIÓN DE LA VENTILACIÓN

Como medida de mitigación de los contagios en un plantel educativo y específicamente dentro de los salones de clase, se debe implementar la ventilación por medios naturales o mecánicos²². En las figuras 1, 2 y 3 se presentan algunos esquemas de ventilación en un salón de clases junto con algunos parámetros que la caracterizan para cada sistema.

La ventilación del salón se puede cuantificar por la tasa de renovación de aire, que significa el número de veces que se recambia el volumen del aire interior del aula en una hora (ACH, del inglés *Air Change per Hour*) de acuerdo con la ecuación 1.

$$\text{Tasa de renovación (ACH)} = \frac{\text{Flujo de aire FRESCO}}{\text{Volumen de SALÓN}}$$

(ecuación 1)

Donde:

Tasa de renovación (ACH) (h) = número de veces que se recambia el volumen del aire interior de un espacio (salón de clases) en una hora.

Flujo de aire fresco (m³/h) = volumen de aire que ingresa en un espacio (salón de clases) por unidad de tiempo.

Volumen de salón (m³) = volumen del salón o espacio cerrado a evaluar.

Una vez evaluada la ACH, cuyos valores deben ser estimados experimentalmente^{23,24}, y conociendo el volumen del salón, se puede proceder a calcular los aforos recomendados, entendiendo como aforo el número de personas que pueden estar en un mismo espacio al mismo tiempo.

ESTIMACIÓN DE USUARIOS DE SALONES DE CLASES SEGÚN SU TAMAÑO Y TASA DE RENOVACIÓN DE AIRE

Se llevó a cabo un análisis basado en un modelo de balance de masa de CO₂ en un salón de clases de cierto volumen (V_{salón}) y suponiendo estado estacionario²⁵ cuya expresión matemática se muestra en la ecuación 2.

$$V_{\text{salón}} * \text{ACH} * ([\text{CO}_2] - [\text{CO}_{2\text{aire}}]) = R_{\text{CO}_2} * \text{NAS} \quad (\text{ecuación 2})$$

Donde:

V_{salón} (m³) = volumen del salón de clases.

ACH (Tasa de renovación) (h) = número de veces que se recambia el volumen del aire interior de un espacio (salón de clases) en una hora.

[CO₂] (g CO₂/m³_{aire}) = concentración de CO₂ en estado estacionario dentro del salón de clases.

$[CO_{2\text{ aire}}]$ ($g\ CO_2/m^3_{\text{aire}}$) = concentración de CO_2 en el aire fresco exterior.

R_{CO_2} ($g\ CO_2/persona \cdot h$) = rapidez de producción de CO_2 por persona por hora²⁵, considerando el valor típico de tasa de producción de CO_2 de adultos con un peso corporal promedio de 70 kg = 28,88.

NAS (personas) = Número de alumnos (personas) en un espacio (salón de clases).

Tabla 2. Parámetros del modelo para estimar los aforos en un salón de clases

Parámetro	Valor	Referencia
Concentración de CO_2 del aire FRESCO.	400 ppmv	Concentración de CO_2 en aire fresco
Concentración de CO_2 del aire viciado.	800 ppmv	Concentración de CO_2 máxima permisible según REHVA ²⁶ , que indica ventilación no suficiente
Rapidez de producción de CO_2 por persona (70 kg*).	28,88 g CO_2 / persona h	Penman ²⁵
Tasa de renovación de aire (ACH**)	Mayor a 3	REHVA ²⁶

*Peso promedio de un adulto²⁵.

**ACH = Air Change per Hour.

El modelo consideró los valores de los parámetros mostrados en la tabla 2, obteniendo la ecuación 2 que se puede usar para estimar el número de alumnos que (al mismo tiempo) pueden usar un salón de clases de tamaño definido ($V_{\text{salón}}$) sin alcanzar el nivel de concentración de CO_2 máximo permisible. Si se rebasa ese nivel, quiere decir que la ventilación no es suficiente para ese número de estudiantes y deben tomarse decisiones, como, por ejemplo, aumentar las medidas de ventilación, reducir el número de alumnos, reducir el tiempo de permanencia en el espacio o una combinación de todas estas medidas. Es decir, debe gestionarse el riesgo.

$$NAS = PCLP * V_{\text{salón}} * ACH \quad (\text{ecuación 3})$$

Donde:

PCLP (persona h/m^3_{aire}) = Constante de proporcionalidad correspondiente a la velocidad de producción de CO_2 por alumno y considerando el límite permisible de exposición a CO_2 (hasta 800 ppmv) = 0,0191.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla 3 muestra el intervalo de número de estudiantes ocupantes de un recinto de cierto tamaño y el intervalo de tasas de renovación de aire necesarias para mantener los estándares de calidad de aire que minimizan el riesgo de transmisión del virus mediante aerosoles, esto con base en la concentración de CO_2 como indicador de la calidad de aire.

Tabla 3. Rango de número de ocupantes en un aula correspondientes a las renovaciones de aire. ACH = Air Change per Hour

Aforo dentro del aula (estudiantes)	Volumen del salón de clases (m^3)	Tasa de renovación de aire ACH (1/h)
10 - 30	200	3 a 8
20 - 60	400	3 a 8
35 - 90	600	3 a 8
55 - 120	800	3 a 8

Con la finalidad de ubicar la condición de aforo, de volumen de salón y la capacidad de ventilación (ACH) que aplique a cada situación real, se empleó la ecuación 3 para estimar el número de estudiantes dentro del salón de clases para diferentes volúmenes de recintos típicos escolares variando de 200 m^3 a 800 m^3 , cuyos resultados se muestran en la figura 4.

Se observa la relación proporcional entre el tamaño del salón de clases y el número de alumnos ocupantes del mismo. No obstante, esta relación de proporcionalidad es función de las tasas de renovación de aire, lo que significa que un mismo tamaño de salón puede admitir diferentes aforos, dependiendo estrictamente de las tasas de renovación de aire. Las estimaciones con respecto al área de salón de clases se muestran en la figura 5, donde se consideró una altura de 3 m para el cálculo del área.

Se sugiere al lector usar la figura 4 o la figura 5 para establecer el aforo del salón de clases de volumen o área conocidos, considerando la capacidad de ventilación del

Figura 4. Número de estudiantes dado en un volumen de salón de clases y renovaciones necesarias para mantener la calidad del aire dentro del recinto

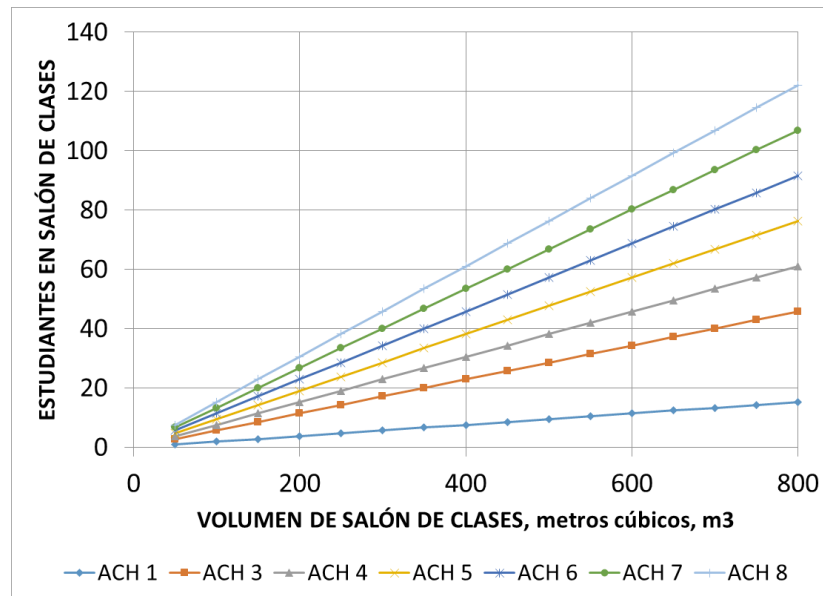
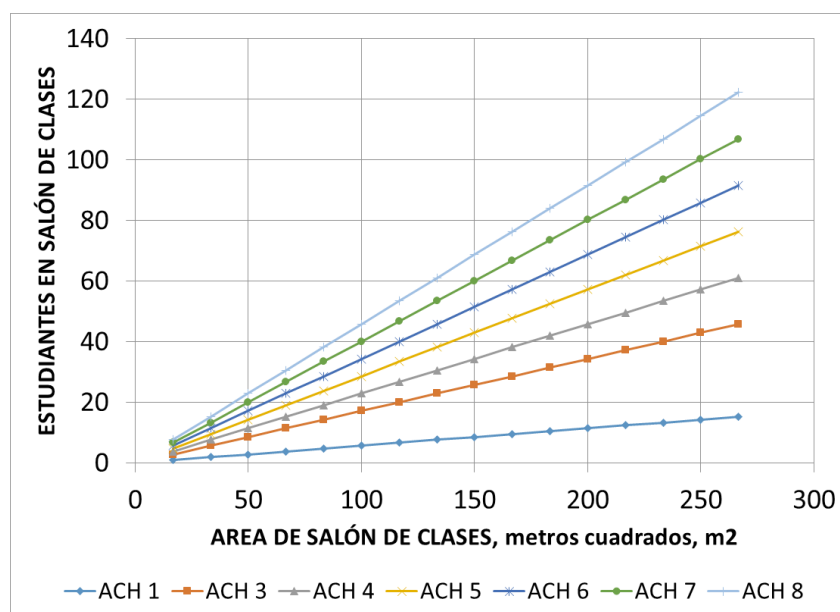


Figura 5. Número de estudiantes dado en el área del salón de clases y renovaciones necesarias para mantener la calidad del aire dentro del recinto



salón. Esta última se puede estimar experimentalmente mediante el método de sublimación de hielo seco (CO₂ en estado sólido)²⁷ o considerando valores predefinidos y reportados por González-Sánchez y Rodríguez-Álvarez²⁴.

Los resultados mostrados en las figuras 4 y 5 también se pueden expresar como una tasa de renovación de aire específica, estimando en promedio que un salón de clases debe ingresar 8 l aire/hora por persona que ocupa

el salón. Este valor es similar al señalado por Shaughnessy y colaboradores²⁸ quienes realizaron un monitoreo de 54 escuelas de educación básica (primaria) en Estados Unidos de América, en las que se determinaron las tasas de ventilación con respecto a la concentración de CO₂.

Una buena ventilación permitirá el remplazo de aire viciado con aire fresco, cuya velocidad depende estrictamente de los aforos y del tamaño del salón.


Promover una buena ventilación de recintos como aulas escolares permite incrementar proporcionalmente aforos. La buena ventilación representa una medida práctica y de bajo costo para reducir el riesgo de contagio de enfermedades transmitidas por aerosoles como es el caso de la COVID-19.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México por el apoyo brindado a todo el personal de esta entidad académica para enfrentar la difícil situación derivada de la pandemia de COVID-19, y la oportunidad para realizar monitoreos de CO₂ usando hielo seco en algunas instalaciones.

REFERENCIAS

- Gaojing Q, Junwen C, Guoxin H, Meiling Z, Hui Y, Haoming Z, et al. A Quantitative exploration of symptoms in COVID-19 patients: an observational cohort study. *Int. J. Med. Sci.* 2021; 18(4):1082-95.
- Biswas M, Rahaman S, Biswas TK, Haque Z, Ibrahim B. Association of Sex, Age, and Comorbidities with Mortality in COVID-19 Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Intervirology* 2020; 64:36-47.
- Centers for Disease Control and Prevention (CDC). Science Brief: SARS-CoV-2 and Surface (Fomite) Transmission for Indoor Community Environments. National Center for Immunization and Respiratory Diseases (NCIRD), Division of Viral Diseases. [actualizado el 5 de abril de 2021; citado el 17 noviembre 2021]. Disponible en: <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/more/science-and-research/surface-transmission.html>.
- Jayaweera M, Perera H, Gunawardana B, Manatunge J. Transmission of COVID-19 virus by droplets and aerosols: A critical review on the unresolved dichotomy. *Environ. Res.* 2020; 188:109819.
- Hevia F. La emergencia educativa: recuento de daños de los efectos negativos de la pandemia por Covid-19 en la educación y algunas recomendaciones. *Ichan Tecolotl* [actualizado en 2021; citado el 14 diciembre 2021]. Disponible en: <https://ichan.ciesas.edu.mx/la-emergencia-educativa-recuento-de-danos-de-los-efectos-negativos-de-la-pandemia-por-covid-19-en-la-educacion-y-algunas-recomendaciones/>.
- Guterres A. Construir hoy el futuro de la educación. Naciones Unidas [actualizado en 2021; citado el 14 diciembre 2021]. Disponible en: <https://www.un.org/es/coronavirus/articles/future-education-here>.
- Lipinski T, Ahmad D, Serey N, Jouhara H. Review of ventilation strategies to reduce the risk of disease transmission in high occupancy buildings. *Int. J. Thermofluids* 2020; 7(8):100045.
- Park S, Choi Y, Song D, Kim K. Natural ventilation strategy and related issues to prevent coronavirus disease (COVID-19) airborne transmission in a school building. *Sci. Total Environ.* 2021; 1:789.
- Balachandar V, Mahalaxmi I, Kaavya J, Vivekanandhan G, Ajithkumar S, Arul N. COVID-19: emerging protective measures. *Eur. Rev. Med. Pharmacol. Sci.* 2020; 24(6):3422-5.
- Azuma K, Yanagi U, Kagi N, Kim H, Ogata M, Hayashi M. Environmental factors involved in SARS-CoV-2 transmission: effect and role of indoor environmental quality in the strategy for COVID-19 infection control. *Environ. Health Prev. Med.* 2020; 25(66):1-16.
- Redrow J, Mao S, Celik I, Posada JA, Feng Z-G. Modeling the evaporation and dispersion of airborne sputum droplets expelled from a human cough. *Build. Environ.* 2011; 46(10):2042-51.
- Vargas M, Ruiz M., Rodríguez M, Moreno G. Transmisión del SARS-CoV-2 por gotas respiratorias, objetos contaminados y aerosoles (vía aérea). Revisión de evidencia. *Soc. Esp. San. Amb. y AEA.* 2020; 1:3-48.
- Ding E, Zhang D, Bluysen P. Ventilation regimes of school classrooms against airborne transmission of infectious respiratory droplets. *Build. Environ.* 2022; 207:108484.
- Pavilion B, Ierardi AM, Levine L, Mirer F, Kelvin EA. Estimating aerosol transmission risk of SARS-CoV-2 in New York City public schools during reopening. *Environ. Res.* 2021; 195:110805.
- Morawska L, Tang JW, Bahnfleth W, Bluysen PM, Boerstra A, Buonanno G, et al. How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised? *Environ. Int.* 2020; 142:105832.
- Montazami A. BB 101: Guidelines on ventilation, thermal comfort, and indoor air quality in schools. Government Digital Service GOV.UK [actualizado el 23 de agosto de 2018; citado el 14 diciembre 2021]. Disponible en: <https://www.gov.uk/government/publications/building-bulletin-101-ventilation-for-school-buildings>.
- Kosik WJ. Design strategies for hybrid ventilation. *ASHRAE J.* 2001; 18-24.
- González L, Ochoa M, Ocejo J, Ocejo, F. La ventilación de las viviendas en el vigente código técnico de la edificación (cte): Sistemas mecánicos e híbridos. *Proceedings from the 14th International Congress on Project Management and Engineering. Comunicaciones presentadas al XIV Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos.* 2010 30 Jun - 2 Jul; Madrid, España.
- Zivelonghi A, Lai M. Mitigating aerosol infection risk in school buildings: the role of natural ventilation, volume, occupancy and CO₂ monitoring. *Build. Environ.* 2021; 204:108139.
- Rudnick S, Milton D. Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration. *Ind. Air.* 2003; 13(3):237-45.
- Peng Z, Jimenez JL. Exhaled CO₂ as a COVID-19 infection risk proxy for different indoor environments and activities. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 2021; 8(5):392-7.
- Di Gilio A, Palmisani J, Pulimeno M, Cerino F, Cacace M, Miani A, et al. CO₂ concentration monitoring inside educational buildings as a strategic tool to reduce the risk of SARS-CoV-2 airborne transmission. *Environ. Res.* 2021; 202:111560.
- Di Gilio A, Farella G, Marzocca A, Giua R, Assennato G, Tutino M, et al. Indoor/outdoor air quality assessment at school near the steel plant in Taranto (Italy). *Adv. Meteorol.* 2017; 2017:1526209.
- González A, Álvarez R. La ventilación en espacios cerrados, COVID, durante la pandemia por COVID. 2021.
- Penman JM. An experimental determination of ventilation rate in occupied rooms using atmospheric carbon dioxide concentration. *Build. Environ.* 1980; 15(1):45-7.

- 
26. REHVA. How to operate and use building services in order to prevent the spread of the coronavirus disease (COVID-19) virus (SARS-CoV-2) in workplaces. 2020; 17:1-7.
 27. IIUNAM. Evaluación de la ventilación en la Sala Nezahualcóyotl. Youtube [actualizado en 2021; citado el 18 noviembre 2021]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=XYcgYDp-pYI>.
 28. Shaughnessy RJ, Haverinen-Shaughnessy U, Nevalainen A, Moschandreas D. A preliminary study on the association between ventilation rates in classrooms and student performance. *Indoor Air*. 2006; 16(6):465-8.