










## Modelo gráfico-matemático para estimar el nivel de concentración de CO<sub>2</sub> como indicador de la transmisión del SARS-CoV-2.

### Graphical-mathematical model to estimate CO<sub>2</sub> concentration level as an indicator of SARS-CoV-2 transmission.

Razura-Carmona, F. F.<sup>1</sup> , Navidad-Murrieta, M. S.<sup>1</sup> , Barajas-Carrillo, V.W.<sup>1</sup> ,  
Covantes-Rosales C.E.<sup>1</sup> , Díaz-Resendiz, K. J. G.<sup>1</sup> , Toledo-Ibarra, G. A.<sup>1</sup> ,  
Ventura-Ramón, G. H.<sup>1</sup> , Ojeda-Durán, A. J.<sup>1</sup> , Casas-Rodríguez J. O.<sup>2</sup>,  
Girón-Pérez, M. I.<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup> Laboratorio Nacional para la Investigación en Inocuidad Alimentaria (LANIIA)-Unidad Nayarit. Secretaría de Investigación y Posgrado. Universidad Autónoma de Nayarit, Tepic, Nayarit, México. ZC: 63000

<sup>2</sup> Dirección de Servicios Generales. Universidad Autónoma de Nayarit, Tepic, Nayarit, México. ZC: 63000.



**Please cite this article as/Como citar este artículo:** Razura-Carmona, F. F., Navidad-Murrieta, M. S., BarajasCarrillo, V.W., Covantes-Rosales C.E., Díaz-Resendiz, K. J. G., Toledo-Ibarra, G. A., Ventura-Ramón, G. H., Ojeda-Durán, A. J., Casas-Rodríguez J. O., Girón-Pérez, M. I. (2023). Graphical-mathematical model to estimate CO<sub>2</sub> concentration level as an indicator of SARS-CoV-2 transmission. *Revista Bio Ciencias*, 10 e1412. <https://doi.org/10.15741/revbio.10.e1412>

#### Article Info/Información del artículo

Received/Recibido: August 31<sup>th</sup> 2022.

Accepted/Aceptado: February 02<sup>th</sup> 2023.

Available on line/Publicado: February 17<sup>th</sup> 2023.

#### RESUMEN

Los primeros casos documentados de la enfermedad por Coronavirus de 2019 (COVID-19) en la ciudad de Wuhan (provincia de Hubei, China) fueron causados por el Síndrome Respiratorio Agudo Severo Coronavirus (SARS-CoV-2), los estudios mencionan que la transmisión viral es más común en interiores y en ambientes mal ventilados en comparación con espacios al aire libre o con abundante flujo de aire. En este contexto, esta investigación tuvo como objetivo estimar, a través de un modelo matemático (diseño de Box-Behnken), el tiempo y la ocupación requerida en un espacio físico para alcanzar niveles de CO<sub>2</sub> que superen el nivel de riesgo establecido como condición segura de 700 ppm para la transmisión de SARS-CoV-2. Con esto, se encontró que la ventilación natural es la mejor opción para reducir la concentración de CO<sub>2</sub>, considerando la ocupación/m<sup>3</sup> y el tiempo, permitiendo un flujo de aire constante; se sugiere el uso de aire acondicionado para controlar la temperatura en habitaciones sin ventilación natural; no obstante, este tipo de equipos no están diseñados para reducir la concentración de CO<sub>2</sub>. Por lo tanto, su uso en habitaciones con puertas y ventanas abiertas conduce a una vida útil más corta, por lo que se debe considerar su funcionamiento en condiciones especiales.

**PALABRAS CLAVE:** SARS-CoV-2, dióxido de carbono, modelo matemático, calidad del aire, ventilación, ocupación.

#### \*Corresponding Author:

Manuel Ivan Girón-Pérez. Laboratorio Nacional para la Investigación en Inocuidad Alimentaria (LANIIA). Nayarit, México.

E-mail: [ivangiron@uan.edu.mx](mailto:ivangiron@uan.edu.mx)

---

## ABSTRACT

---

The first documented cases of Coronavirus disease of 2019 (COVID-19) in Wuhan city (Hubei province, China) were caused by Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 (SARS-CoV-2), studies mention viral transmission is more common in indoor and poorly ventilated environments compared to outdoor environments or environments with abundant airflow. In this context, this research aimed to estimate, through a mathematical model by a Box-Behnken design, the time and occupancy required in a physical space to reach CO<sub>2</sub> levels that exceed the risk level established as a safer condition of 700 ppm for SARS-CoV-2 transmission. According to the proposed mathematical model, it is possible to predict safe conditions. With this, it was found that natural ventilation is the best option to reduce CO<sub>2</sub> concentration, considering the occupancy/m<sup>3</sup> and time, allowing a constant airflow; the use of air conditioners to control the temperature in rooms without natural ventilation is suggested; notwithstanding, these types of equipment are not designed to reduce CO<sub>2</sub> concentration. Thus, their use in rooms with open windows and doors leads to a shorter equipment lifetime, for this reason, its operation in special conditions, such as in rooms without natural ventilation should be considered.

---

**KEY WORDS:** SARS-CoV-2, carbon dioxide, mathematical model, air quality, ventilation, occupancy.

---

## Introducción

En la actualidad, a más de tres años después de los primeros casos documentados de la Enfermedad por Coronavirus 2019 (COVID-19), en la ciudad de Wuhan (Hubei, China), causada por el Coronavirus del Síndrome Respiratorio Agudo Severo 2 (SARS-CoV-2), y declarada como evento pandémico en marzo de 2020 por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2022), alcanzó una amenaza para la salud pública mundial debido a la alta tasa de transmisión. Hasta el 30 de enero de 2023 se han notificado en todo el mundo 670.246.742 casos confirmados y 6.830.068 muertes (Johns Hopkins, 2022). Por lo tanto, es importante promover la investigación científica con enfoques multidisciplinarios para comprender los factores subyacentes de las vías de transmisión del SARS-CoV-2 a fin de reducir la propagación de este agente etiológico.

Inicialmente, se formularon hipótesis sobre diferentes vías de transmisión del SARS-CoV-2; actualmente está demostrado que la vía de transmisión es el aire exhalado por las personas infectadas (Chin *et al.*, 2020; Buryukov *et al.*, 2020; Belluco *et al.*, 2021; Chatterjee *et al.*, 2021), a través de micropartículas cargadas de virus ( $\phi = 0,1 - 100 \mu\text{m}$ ), que pueden permanecer en suspensión en el aire durante minutos o incluso horas (Ranga, 2021; Coldrick *et al.*, 2022; Port *et al.*, 2022). Además, Oba *et al.* (2021) describieron la relación entre el tamaño de las partículas y la

carga viral. Donde, los sujetos infectados que presentaban valores de Cycle thresh-old (Ct) < 37 de genes específicos como el gen de la envoltura (E); por lo tanto, las gotas de saliva expulsadas contendrán un mayor número de virus con potencial de infección.

Así, la transmisión viral es más probable en ambientes interiores y poco ventilados en comparación con ambientes exteriores o con abundante flujo de aire (Li *et al.*, 2021; Coyle *et al.*, 2021). Por lo tanto, el riesgo de transmisión del SARS-CoV-2 puede aumentar en entornos saturados de exhalaciones humanas, como ocurre en los espacios interiores. Dado que un gran segmento de la población realiza sus actividades diarias en espacios cerrados, es crucial controlar factores como la ventilación, la interacción humana y el comportamiento para prevenir y controlar la transmisión del SARS-CoV-2 (Azuma *et al.*, 2020).

Teniendo en cuenta estos antecedentes, el monitoreo del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en espacios interiores se sugiere como un enfoque práctico y de bajo costo para estimar indirectamente el riesgo de transmisión del SARS-CoV-2 (Peng & Jiménez, 2021). El aumento de la concentración de este gas en interiores se debe generalmente a la exhalación humana y a una ventilación deficiente. En un estudio citado por Di Gilio *et al.* (2021), se propone que las concentraciones interiores de CO<sub>2</sub> no deben superar las 700 ppm en espacios interiores. Por lo tanto, un límite de <700 ppm puede utilizarse como indicador para la referencia de zonas con menor riesgo de infección por SARS-CoV-2. De ahí que esta investigación tuviera como objetivo estimar, mediante un modelo matemático, el tiempo y la ocupación necesarios en un espacio físico para alcanzar niveles de CO<sub>2</sub> que superen el nivel de riesgo establecido para la transmisión del SARS-CoV-2.

## Material y Métodos

El modelo se construyó para un entorno interior tipo aula, con unas dimensiones de 6,21 m de longitud, 7,93 m de anchura y 2,9 m de altura (142,8 m<sup>3</sup>). Se utilizaron simultáneamente tres espacios físicos, en los que se sentaron 15 personas/espacio durante 50 min, simulando una clase escolar normal. Durante este tiempo, todas las personas llevaban cubrebocas.

Antes de la prueba, todos los participantes n = 48 (23 hombres y 25 mujeres) con una edad media de 35 ± 7 años fueron medidos antropométricamente (peso y altura), para calcular el índice de masa corporal (BMI), mediante la ecuación (1) y así distribuir homogéneamente a las personas en cada espacio físico.

$$\text{BMI} = \text{Peso}(\text{kg}) / (\text{Altura})^2 (\text{m}^2) \quad (1)$$

Además, para evitar incluir en este ensayo a cualquier portador asintomático de SARS-CoV-2, un día antes del ensayo se recogió una muestra de saliva (2 mL) de todos los participantes según el protocolo descrito previamente por Girón-Pérez *et al.* (2021), se analizó el gen E mediante qRT-PCR y la presencia del virus mediante el protocolo adaptado de Berlín (Corman *et al.*, 2020; Girón-Pérez *et al.*, 2021). Todos los pacientes fueron debidamente informados, aceptaron el uso de la información con fines científicos y firmaron un consentimiento informado

antes de las medidas de los parámetros antropométricos y la recolección de muestras. Este estudio fue aprobado por el panel local de bioética con el número de registro CEBN/03/20.

Una vez iniciada la prueba, se monitoreó permanentemente la concentración de CO<sub>2</sub> ambiental durante la sesión, utilizando un equipo de calidad del aire interior (LANGKOU, LKO2, China), con un intervalo de medida de CO<sub>2</sub> de 400 a 5000 ppm, resolución de 1 ppm, intervalo de temperatura de -10 a 50 °C, medidor de partículas (PM) 0,5/1/10, el tiempo de lectura de 1,5 s y los cambios de PM de 5 s.

En cada ensayo se consideraron tres factores: 1) Tiempo (min), 2) Porcentaje de personas que ocuparon el área (15 personas/área, 1 personas/9m<sup>3</sup>), y 3) Tipo de ventilación (WV: sin ventilación, NV: ventilación natural, NV+AC: ventilación natural más aire acondicionado). Se asignaron tres niveles a cada una de las variables (Tabla 1) y se aplicó un modelo estadístico Box Behnken 3<sup>3</sup> con un total de 15 experimentos por triplicado.

**Tabla 1. Estudio experimental utilizado para monitoreo de CO<sub>2</sub>, a) factores y niveles implementados en el estudio, b) combinaciones obtenidas por el diseño experimental Box Behnken 3<sup>3</sup>.**

No.	Factores	Niveles		
1	Tiempo (min)	15	30	50
2	Porcentaje de ocupación de personas por área	0	25	50
3	Tipo de ventilación	WV	NV	NV+AC

Tratamientos	Factores		
	Tiempo	Ocupación (%)	Tipo de ventilación
1	15	0	NV
2	15	25	NV
3	15	25	WV
4	15	50	NV+AC
5	30	0	WV
6	30	0	NV
7	30	25	NV
8	30	25	NV
9	30	25	NV
10	30	50	WV
11	30	50	NV+AC
12	50	0	NV
13	50	25	WV
14	50	25	NV+AC
15	50	50	NV

WV: sin ventilación, NV: ventilación natural, NV+AC ventilación natural más aire acondicionado (Minisplit 110v Mirage 12000 unidades térmicas británicas (BTU)).

Los datos se analizaron mediante un diseño de experimentos multifactorial, luego se obtuvo una ecuación predictiva para la estimación de CO<sub>2</sub> mediante gráficos de superficie de respuesta con las combinaciones de tiempo-ventilación (T/V) y ventilación-ocupación (V/O), considerando un límite de CO<sub>2</sub> < 700 ppm, ventilación ideal, y las condiciones de ocupación (%) se obtuvieron mediante un diagrama de Pareto y comparación de medias,  $\alpha = 0,05$  utilizando el software Statistica® versión 12, California, USA.

### **Evaluación de la ecuación predictiva**

La ecuación predictiva obtenida se evaluó en tres ambientes interiores tipo aula de la Universidad Autónoma de Nayarit (108 m<sup>3</sup>) considerando 50 % de ocupación (30 personas), con la puerta y ventanas abiertas durante 120 min realizando actividades normales de oficina. La concentración de CO<sub>2</sub> se registró cada 5 min. Este estudio se realizó por triplicado.

### **Resultados y Discusiones**

Más de un año después del inicio de la pandemia de COVID-19, la OMS aceptó que la inhalación de gotas de corto alcance predomina en la transmisión del SARS-CoV-2 (OMS, 2022); sin embargo, la transmisión en interiores es mayor que en espacios exteriores. En relación con esto, Li *et al.* (2021) utilizaron un modelo continuo macroscópico simple para evaluar cómo la tasa de ventilación de una habitación afecta significativamente a la exposición a corto plazo al riesgo de transmisión de la infección por el aire. Sugiriendo que, el transporte aéreo de gotas a corto y largo alcance, considerando que la ventilación, y la ocupación, son cruciales para la seguridad y la calidad del aire. Por lo tanto, el modelado matemático ha sido una herramienta importante para estimar las condiciones seguras del aire ambiental.

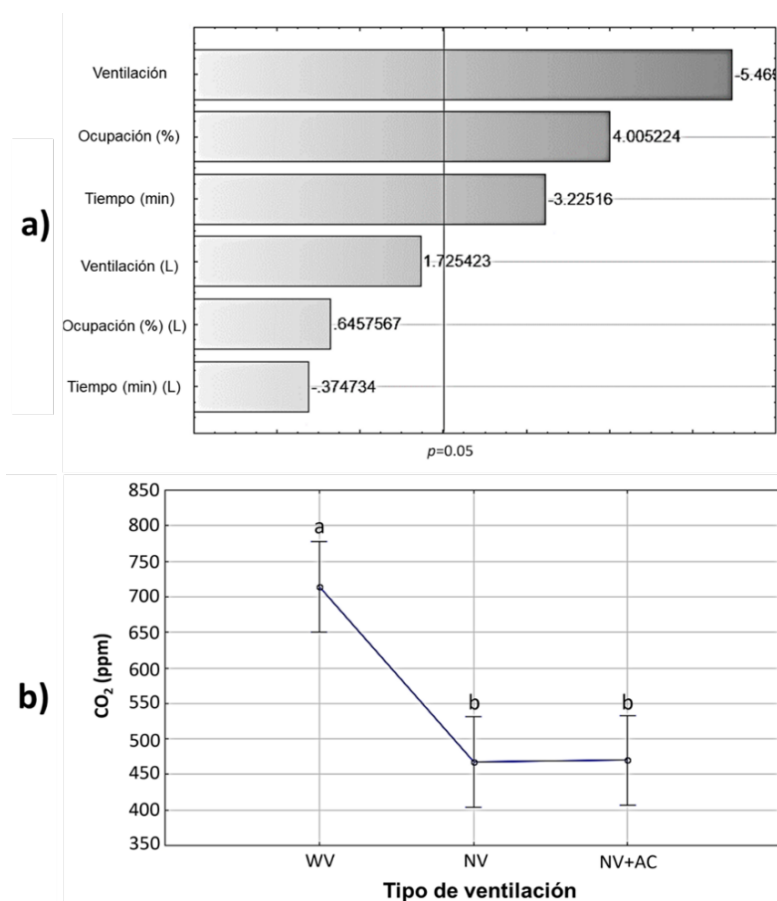
### **Evaluación de la importancia de los factores**

El impacto de los factores ( $p = 0,05$ ) se muestra en la Figura 1a, el diagrama de Pareto con efectos estandarizados mostró que la ventilación, el porcentaje de ocupación y el tiempo (min) pueden afectar independientemente a la concentración de CO<sub>2</sub>; por lo tanto, si se altera cualquiera de estos factores, la variable dependiente se verá afectada (ventilación > ocupación > tiempo). Sin embargo, si se superan los niveles de CO<sub>2</sub> (> 700 ppm), esos factores no mostraron una respuesta al comportamiento del CO<sub>2</sub>. Por lo que, los niveles de CO<sub>2</sub> no disminuirán a menos que aumente la ventilación o disminuya la ocupación. El SARS-CoV-2 puede transmitirse principalmente por contacto cercano o por gotitas depositadas en las superficies. No obstante, no se puede ignorar el riesgo de transmisión aérea, especialmente en espacios interiores, donde el riesgo de infección es alto, aproximadamente del 2 % en un espacio con una tasa de ventilación común (500-2500 m<sup>3</sup>/h por infectador durante 0,25 h) (Dai & Zhao, 2020).

### **Evaluación de los tipos de ventilación**

Las comparaciones de medias de los niveles de ventilación se muestran en la Figura 1b, en la que se observan dos grupos estadísticos con diferencias significativas: sin ventilación (WV)

y con ventilación natural (NV) / ventilación natural + ventilación artificial (aire acondicionado) (NV + AC). Por lo tanto, no existen diferencias significativas ( $\alpha = 0,05$ ) al implementar el uso de aire acondicionado en un ambiente interior tipo aula. El ángulo de dispersión de las microgotas exhaladas está influido por la estructura de la cavidad bucal, el movimiento y el calor corporal, y aumenta en función de la tasa de flujo exhalado; por lo tanto, en un entorno cerrado, el aire circundante de la sala contiene gotitas exhaladas, cuya concentración depende de la tasa de ventilación (Li *et al.*, 2021). Esto se ve respaldado por un modelo validado de dinámica de fluidos computacional de las gotas y la emisión de aerosoles durante las exhalaciones, que concluye que la dispersión microbiana depende de la ventilación y la distancia entre las personas (Coldrick *et al.*, 2022).



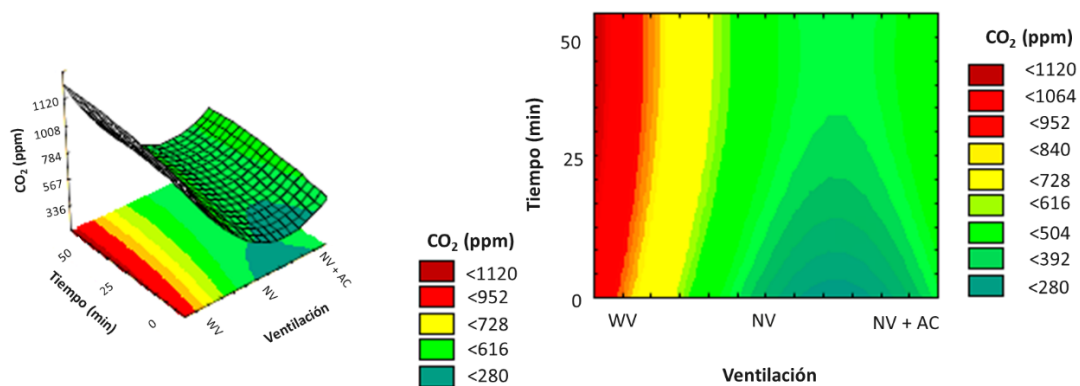
**Figura 1. Resultados estadísticos.**

a) Diagrama de Pareto con efectos normalizados sobre la variable dependiente concentración de CO<sub>2</sub> (ppm) y los factores del modelo Box Behnken 3<sup>3</sup>, b) análisis de comparación de medias de los tipos de ventilación (niveles) WV (sin ventilación) a, NV (ventilación natural) b, VN+AC (ventilación natural + aire acondicionado) b. Las barras verticales denotan intervalos de confianza del 95 %, calculados  $p < 0,00001$ .

## Evaluación de interacción entre factores

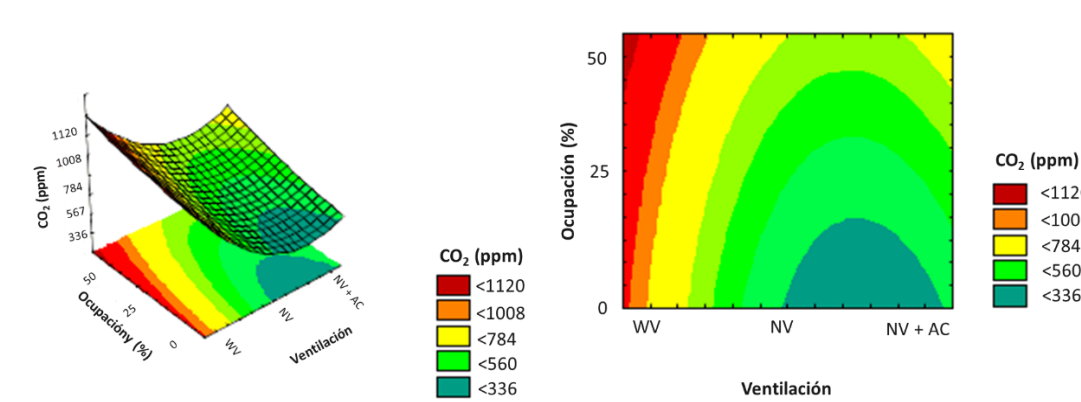
El estudio de las combinaciones entre factores permite predecir comportamientos e impactos relacionados sobre las variables evaluadas. La Figura 2 muestra los gráficos de superficie de respuesta de los factores (T/V), donde se observa que cuanto mayor es la ventilación, más aumenta el tiempo de ocupación. Sin embargo, esto puede estar relacionado con el tercer factor estudiado (% de ocupación). Los espacios interiores deben ventilarse adecuadamente en función de la ocupación, o bien debe preverse una ocupación máxima para los espacios con un índice de ventilación limitado. La ocupación máxima debe determinarse midiendo la tasa de ventilación o mediante el control en tiempo real de la concentración de CO<sub>2</sub>.

Para confirmar el impacto de la interacción T/V, la Figura 3 muestra un comportamiento similar para V/O, lo que evidencia que el factor dominante es la ventilación; por lo tanto, se consideró como un factor fijo en su nivel máximo, ya que bajo esta condición el modelo matemático puede estimar el mayor tiempo o porcentaje de ocupación. Resultados similares se obtuvieron considerando tres variables de control para limitar la exposición al SARS-CoV-2 en ambientes interiores: ventilación, distanciamiento físico y uso de cubrebocas (mascarillas de algodón de 3 capas) que contribuyeron a reducir la exposición a los aerosoles (Coyle *et al.*, 2021).



**Figura 2. Gráfico de superficie de respuesta del análisis de datos de los factores eje y: concentración de CO<sub>2</sub> (ppm), eje x: tiempo (min), eje z: ventilación**





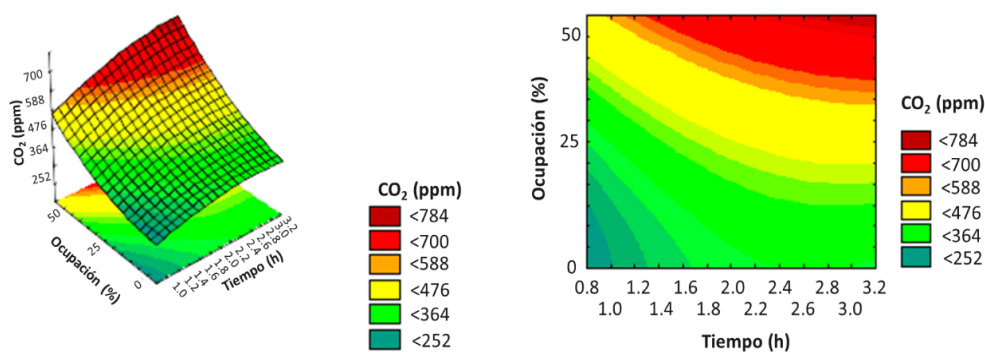
**Figura 3. Gráfico de superficie de respuesta del análisis de datos de los factores eje y: concentración de CO<sub>2</sub> (ppm), eje x: ocupación (%), eje z: ventilación.**

### Ecuación predictiva

Una vez establecido el factor dominante, la Figura 4 muestra el comportamiento de los datos asociados a la concentración de CO<sub>2</sub>, resultando un modelo predictivo en función del tiempo y del porcentaje de ocupación del área, a partir de estos factores se estima la ecuación (2), donde z = CO<sub>2</sub>, x = tiempo, y = ocupación (%). El resultado óptimo obtenido fue del 50 % de ocupación y un tiempo límite de 1 h y 45 min.

$$z = x(-0.0001xy^2 + 0.0054xy - 0.0499x + 0.0027y^2 + 1.0942) + y(0.1525y + 0.0572x + 9.1821) + 500.0926$$

(2)



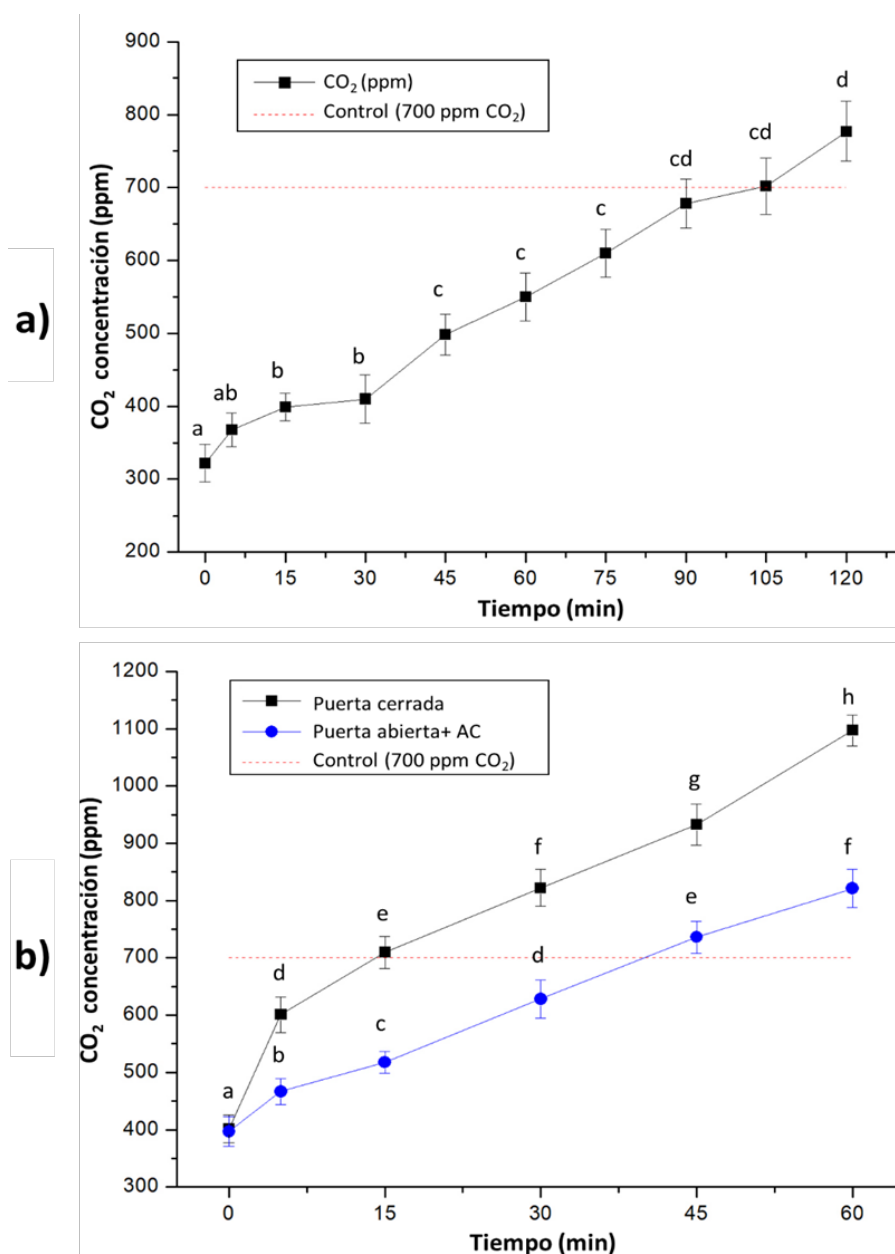
**Figura 4. Gráfico de superficie de respuesta del análisis de datos de los factores eje y: concentración de CO<sub>2</sub> (ppm), eje x: ocupación (%), eje z: tiempo (h).**



La evaluación del comportamiento del CO<sub>2</sub>, basado en la ecuación (2) se muestra en la Figura 5a, el tiempo máximo de seguridad en NV no debe exceder de 1 h y 45 min con una capacidad de ocupación del 50 % considerando 3,6 m<sup>3</sup> / persona. Estos resultados son similares a los informes sobre el rendimiento cognitivo en estudiantes (16 - 23 años) considerando los efectos combinados de la temperatura interior y los niveles de CO<sub>2</sub> como marcadores de las tasas de ventilación, sugiriendo un espacio adecuado: temperatura ambiental 20 – 23 °C, límite de concentración de CO<sub>2</sub> de 600 ppm en exposiciones no superiores a 2 h (Ahmed *et al.*, 2022). Además, el rendimiento en la toma de decisiones se reduce al aumentar los niveles de CO<sub>2</sub> (1000 - 1500 ppm) en espacios similares a oficinas (Satish *et al.*, 2012). La ventilación es un marcador asociado a la productividad y a actividades cognitivas como la atención, el razonamiento y las tareas de memoria (Kapalo *et al.*, 2018; Mundackal & Ngole-Jeme, 2020; Ahmed *et al.*, 2022).

### **Implicaciones Prácticas**

Los factores de impacto para un ambiente interior seguro tipo aula son ventilación > ocupación > tiempo, considerando una concentración de 700 ppm de CO<sub>2</sub> en interiores con ventilación natural. Sin embargo, en las salas que no disponen de ventilación natural, es necesario utilizar ventilación artificial que favorezca el flujo de aire interior para reducir la propagación de enfermedades respiratorias transmitidas por el aire (Figura 5b). Se sugiere el uso de aires acondicionados para controlar la temperatura en habitaciones sin ventilación natural; sin embargo, este tipo de equipos no están diseñados para reducir la concentración de CO<sub>2</sub>. Además, el funcionamiento en habitaciones con ventanas y puertas abiertas conlleva una menor vida útil del equipo, así como una mayor demanda de energía, por lo que debe considerarse su funcionamiento en condiciones especiales, como en habitaciones sin ventilación natural. Por lo tanto, la consideración del tipo de ventilación (principalmente ventilación natural), la ocupación máxima y el tiempo de permanencia en espacios tipo oficina son variables que deben considerarse como una estrategia eficaz y fiable para garantizar una buena calidad del aire y al mismo tiempo, mitigar el riesgo de transmisión de infecciones en ambientes interiores.



**Figura 5. Monitoreo de la concentración de CO<sub>2</sub> para la validación de la ecuación, a) monitoreo de CO<sub>2</sub> en espacios sin acceso a ventilación natural, b) monitoreo de CO<sub>2</sub> en espacios con acceso a ventilación natural. Datos expresados como media ± desviación estándar (n=9).**

## Conclusiones

Los factores de impacto para un ambiente interior seguro tipo aula son ventilación > ocupación > tiempo, considerando una concentración de 700 ppm de CO<sub>2</sub> en interiores con ventilación natural. Sin embargo, en las salas que no disponen de ventilación natural, es necesario utilizar ventilación artificial que favorezca el flujo de aire para reducir la propagación de enfermedades respiratorias transmitidas por el aire (Figura 5b). Se sugiere el uso de acondicionadores de aire para controlar la temperatura en habitaciones sin ventilación natural; sin embargo, este tipo de equipos no están diseñados para reducir la concentración de CO<sub>2</sub>. Además, el funcionamiento en habitaciones con ventanas y puertas abiertas conlleva una menor vida útil del equipo, así como una mayor demanda de energía, por lo que debe considerarse su funcionamiento en condiciones especiales, como en habitaciones sin ventilación natural. Por lo tanto, la consideración del tipo de ventilación (principalmente ventilación natural), la ocupación máxima y el tiempo de permanencia en espacios tipo oficina son variables que deben ser consideradas como una estrategia efectiva y confiable para asegurar una buena calidad del aire y, al mismo tiempo, mitigar el riesgo de transmisión de infecciones en ambientes interiores.

Es importante mencionar que este estudio busca establecer con el mínimo de variables controlables, (ocupación, tiempo y tipos de ventilación) siendo otras variables como la turbulencia del aire despreciadas ya que, la ejecución de este estudio buscaba establecer una medida segura en espacios poco ventilados.

## Contribución de los autores

Conceptualización, F.F.R.-C. y M.S.N.-M.; Metodología, F.F.R.-C. y M.S.N.-M.; Análisis, F.F.R.-C., M.S.N.-M., K.J.G.D.-R., G.A.T.-I. y G.H.V.-R.; Investigación, F.F.R.-C., M.S.N.-M., V.W.B.-C. y C.E.C.-R.; Análisis de datos, F.F.R.-C.; Redacción, F.F.R.-C., M.S.N.-M., V.W.B.-C. y M.I.G.-P.; preparación del borrador original, F.F.R.-C., M.S.N.-M., V.W.B.-C., C.E.C.-R. y M.I.G.-P.; redacción y revisión, F.F.R.-C., M.S.N.-M., V.W.B.-C. y C.E.C.-R. P.; Revisión y Edición, F.F.R.-C., M.S.N.-M., V.W.B.-C. y C.E.C.-R.; Supervisión y validación, administración del proyecto, obtención de financiación: M.I.G.-P.

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

## Financiamiento

Esta investigación no recibió financiamiento externo.

## Declaraciones éticas

Este estudio fue aprobado por el panel local de bioética con el número de registro CEBN/03/20.

## Declaración de consentimiento informado

Se obtuvo el consentimiento informado de todos los participantes en el estudio.

## Agradecimientos

Al personal de laboratorio Nacional para la Investigación en Inocuidad Alimentarian-  
Unidad Nayarit por su disposición en la colaboración con este trabajo. A todos los participantes que  
contribuyeron en el estudio.

## Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

## Referencias

- Ahmed, R., Mumovic, D., Bagkeris, E., & Ucci, M. (2022). Combined effects of ventilation rates and indoor temperatures on cognitive performance of female higher education students in a hot climate. *Indoor air*, 32(2), e13004. <https://doi.org/10.1111/ina.13004>
- Azuma, K., Yanagi, U., Kagi, N., Kim, H., Ogata, M., & Hayashi, M. (2020). Environmental factors involved in SARS-CoV-2 transmission: effect and role of indoor environmental quality in the strategy for COVID-19 infection control. *Environmental Health and Preventive Medicine*, 25, 1-16. <https://doi.org/10.1186/s12199-020-00904-2>
- Belluco, S., Mancin, M., Marzoli, F., Bortolami, A., Mazzetto, E., Pezzuto, A., Favretti, M., Terregino, C., Bonfante, F., & Piro, R. (2021). Prevalence of SARS-CoV-2 RNA on inanimate surfaces: a systematic review and meta-analysis. *European Journal of Epidemiology*, 36(7), 685-707. <https://doi.org/10.1007/s10654-021-00784-y>
- Biryukov, J., Boydston, J. A., Dunning, R. A., Yeager, J. J., Wood, S., Reese, A. L., Ferris, A., Miller, D., Weaver, W., & Zeitouni, N. E. (2020). Increasing Temperature and Relative Humidity Accelerates Inactivation of SARS-CoV-2 on Surfaces. *MSphere*, 5(4),1-9. <https://doi.org/10.1128/mSphere.00441-20>
- Chatterjee, S., Murallidharan, J. S., Agrawal, A., & Bhardwaj, R. (2021). Why coronavirus survives longer on impermeable than porous surfaces. *Physics of Fluids*, 33(2), 021701 <https://doi.org/10.1063/5.0037924>
- Chin, A., Chu, J., Perera, M., Hui, K., Yen, H. L., Chan, M., Peiris, M., & Poon, L. (2020). Stability of SARS-CoV-2 in different environmental conditions. *Lancet*, 1(1), e10 [https://doi.org/10.1016/S2666-5247\(20\)30003-3](https://doi.org/10.1016/S2666-5247(20)30003-3)
- Coldrick, S., Kelsey, A., Ivings, M. J., Foat, T. G., Parker, S. T., Noakes, C. J., Bennett, A., Rickard, H., & Moore, G. (2022). Modeling and experimental study of dispersion and deposition of respiratory emissions with implications for disease transmission. *Indoor air*, 32(2), e13000. <https://doi.org/10.1111/ina.13000>
- Corman, V. M., Landt, O., Kaiser, M., Molenkamp, R., Meijer, A., & Chu, D. K. (2020). Detection of 2019 novel coronavirus (2019-nCoV) by real-time RT-PCR. *Eurosurveillance*, 25(3), 21020. <https://doi.org/10.2807/1560-7917.ES.2020.25.3.2000045>
- Coyle, J. P., Derk, R. C., Lindsley, W. G., Boots, T., Blachere, F. M., Reynolds, J. S., McKinney,

- W, G, Sinsel, E. W., Lemons, A. R., Beezhold, D. H., & Noti, J. D. (2021). Reduction of exposure to simulated respiratory aerosols using ventilation, physical distancing, and universal masking. *Indoor air*, 32(2), e12987. <https://doi.org/10.1111/ina.12987>
- Dai, H., & Zhao, B. (2020). Association of the infection probability of COVID-19 with ventilation rates in confined spaces. *Building Simulation*, 13(6),1321-1327. <https://doi.org/10.1007/s12273-020-0703-5>
- Di Gilio, A., Palmisani, J., Pulimeno, M., Cerino, F., Cacace, M., Miani, A., & de Gennaro, G. (2021). CO<sub>2</sub> concentration monitoring inside educational buildings as a strategic tool to reduce the risk of Sars-CoV-2 airborne transmission. *Environmental Research*, 202, 111560. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111560>
- Girón-Pérez, D. A., Ruiz-Manzano, R. A., Benitez-Trinidad, A. B., Ventura-Ramón, G. H., Covantes-Rosales, C. E., Ojeda-Durán, A. J., Mercado-Salgado, U., Toledo-Ibarra, G. A., Díaz-Reséndiz, K. J., & Girón-Pérez, M. I. (2021). Saliva Pooling Strategy for the Large-Scale Detection of SARS-CoV-2, Through Working-Groups Testing of Asymptomatic Subjects for Potential Applications in Different Workplaces. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 63(7), 541–547. <https://doi.org/10.1097/JOM.0000000000002176>
- Johns Hopkins University & Medicine. [Johns Hopkins University website]. (2022, June 22). COVID-19 Dashboard. Coronavirus Resource Center. <https://coronavirus.jhu.edu/map.html>
- Kapaloa, P., Mečiarová, L., Vilčeková, S., Krídlová-Burdová, E., Domnitab, F., Bacotiub, C., & Kinga-Eva, P. (2018). Investigation of CO<sub>2</sub> production depending on physical activity of students. *International Journal of Environmental Health Research*, 29(1), 31-44. <https://doi.org/10.1080/09603123.2018.1506570>
- Li, Y., Cheng, P., & Jia, W. (2021). Poor ventilation worsens short-range airborne transmission of respiratory infection. *Indoor air*, 32(1), e12946. <https://doi.org/10.1111/ina.12946>
- Mundackal, A., & Ngole-Jeme, V. M. (2020). Evaluation of indoor and outdoor air quality in university academic buildings and associated health risk. *International Journal of Environmental Health Research*, 32(5),1076-1094. <https://doi.org/10.1080/09603123.2020.1828304>
- Oba, J., Taniguchi, H., Sato, M., Takamatsu, R., Morikawa, S., Nakagawa, T., Takaishi, H., Saya, H., Matsuo, K., & Nishihara, H. (2021). RT-PCR screening tests for SARS-CoV-2 with saliva samples in asymptomatic people: Strategy to maintain social and economic activities while reducing the risk of spreading the virus. *The Keio Journal of Medicine*, 70, 35–43. [https://doi.org/10.2302/kjm.2021-00\\_03-OA](https://doi.org/10.2302/kjm.2021-00_03-OA)
- Peng, Z., & Jimenez, J. L. (2021). Exhaled CO<sub>2</sub> as a COVID-19 infection risk proxy for different indoor environments and activities. *Environmental Science & Technology Letters*, 8, 392-397, 1c00183. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00183>
- Port, J. R., Yinda, C. K., Avanzato V. A., Schulz, J. E., Holbrook, M. G., Doremalen van, N., Shaia, C., Fischer, R. J., & Munster, V. J. (2022). Increased small particle aerosol transmission of B.1.1.7 compared with SARS-CoV-2 lineage A in vivo. *Nature Microbiology*, 7, 213–223. <https://doi.org/10.1038/s41564-021-01047-y>
- Ranga, U. (2021). SARS-CoV-2 aerosol and droplets: an overview. *Virusdisease*, 32(2), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s13337-021-00660-z>
- Satish, U., Mendell, M. J., Shekhar, K., Hotchi, T., Sullivan, D., Streufert, S., & Fisk, W. J. (2012). Is CO<sub>2</sub> an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO<sub>2</sub> concentrations on human decision-making performance. *Environmental health perspectives*, 120(12),1671-1677. <https://doi.org/10.1289/ehp.1104789>
- World Health Organization. [World Health Organization website]. (2022, March 16). Archived: WHO Timeline - COVID-19 2022. <https://www.who.int/news/item/29-06-2020-covidtimeline>