



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE MEDICINA
SECRETARIA DE SALUD
INSTITUTO NACIONAL DE REHABILITACIÓN
Luis Guillermo Ibarra Ibarra
ESPECIALIDAD EN:
Medicina de Rehabilitación

***Estimación de la calidad del aire y ocupación en interiores
del INR-LGII, a través de la medición de concentración
de dióxido de carbono para conocer el riesgo de
transmisión del SARS-CoV-2***

T E S I S
PARA OBTENER EL TÍTULO DE
MÉDICO ESPECIALISTA EN:
Medicina de rehabilitación

P R E S E N T A:
Dante Alí García Lecona

PROFESOR TITULAR
Dr. Roberto Coronado Zarco

DIRECTOR DE TESIS
D. en C. Alberto Isaac Perez SanPablo

ASESOR CLÍNICO
Dra. Jimena Quinzaños Fresnedo



Ciudad de México

agosto 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**Estimación de la calidad del aire y ocupación en interiores del INR-LGII,
a través de la medición de concentración de dióxido de carbono para
conocer el riesgo de transmisión del SARS-CoV-2**

DR. ROBERTO CORONADO ZARCO

PROFESOR TITULAR

D. EN C. ALBERTO ISAAC PEREZ SANPABLO

DIRECTOR DE TESIS

DRA. JIMENA QUINZAÑOS FRESNEDO

ASESOR CLÍNICO

**Estimación de la calidad del aire y ocupación en interiores del INR-LGII,
a través de la medición de concentración de dióxido de carbono para
conocer el riesgo de transmisión del SARS-CoV-2**

**DRA. MATILDE L. ENRÍQUEZ SANDOVAL
DIRECTORA DE EDUCACIÓN EN SALUD**

**DR. HUMBERTO VARGAS FLORES
SUBDIRECCIÓN DE EDUCACIÓN MÉDICA**

**DR. ROGELIO SANDOVAL VEGA GIL
JEFE DEL SERVICIO DE EDUCACIÓN MÉDICA DE POSGRADO**

Esta tesis está dedicada...

A mis padres, Giselle y Arnoldo, quienes con su amor y esfuerzo me guiaron e impulsaron a seguir adelante ante cualquier meta propuesta a corto y lejano plazo.

A mi hermana Alelí, quien con su cariño y apoyo, siempre ha visto por mí sin importar la distancia u hora.

A mi novia Mariana, quien me ha acompañado en este recorrido, así como otorgado ayuda y fuerza en todo momento.

En estas breves líneas agradezco...

A mi director de tesis, el D. en C. Isaac Perez, por compartir su experiencia y conocimiento, así como, su ayuda y orientación en todo momento para llevar a cabo este proyecto.

A mi asesor clínico, la Dra. Jimena Quinzaños, quien ha presenciado mi recorrido durante la especialidad. Por su paciencia y motivación a favor de la docencia e investigación continua.

A mi profesor titular, el Dr. Roberto Coronado, quien por su deseo de investigar y sin su ayuda, esto no habría sido posible.

A mis amistades, compañeros y futuros colegas, que me ayudaron de forma desinteresada.

Índice

1. Resumen	2
2. Introducción	3
3. Objetivos.....	5
4. Hipótesis	5
5. Marco Teórico	6
6. Justificación y planteamiento del problema	8
7. Material y Métodos.....	9
7.1. Escenario.....	9
7.2. Muestra	10
7.3. Proceso de registro	12
7.4. Cálculo de ventilación y riesgo de transmisión de SARS-CoV-2	12
7.5. Análisis estadístico	14
8. Resultados.....	18
9. Discusión.....	30
10. Conclusión.....	33
11. Referencias	34
12. Anexos	41
13. Lista de Tablas.....	49
14. Lista de Figuras.....	50



1. Resumen

Antecedentes: En ambientes interiores la tasa de ventilación es determinante en las concentraciones de contaminantes. En el caso de enfermedades infecciosas que se transmiten por aerosoles, como el COVID-19, es importante asegurarse de proveer un mínimo de flujo de aire libre de virus por ocupante, a fin de disminuir el riesgo de contagio. Existe poca información sobre concentraciones de calidad del aire en áreas de salud ventiladas naturalmente. Este estudio pretende conocer la calidad del aire en interiores y ocupación en áreas del Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra Ibarra (INR-LGII) para conocer el riesgo de transmisión de COVID-19.

Metodología: Durante tres meses se registró la concentración de CO₂, ventilación, actividad y ocupación en 85 áreas de un hospital de tercer nivel no COVID-19.

Resultados: Entre los principales valores se apreció la mala ventilación, alta densidad ocupacional y reducido espacio laboral, con predominio en el sitio de la práctica cotidiana para un médico, el consultorio.

Discusión: En el análisis de la ventilación natural se dificulta el hecho de querer extrapolar y comparar los resultados, al ser datos inherentes a la estructura de la edificación y por ende distintos a cualquier otro estudio similar que se pueda encontrar. Aun así, existen pocas investigaciones de forma nacional e internacional y mucho menos de forma tan específica sobre el área médica relacionada a la rehabilitación en donde se requiere de un contacto estrecho entre ocupantes.

Conclusión: Este estudio demostró la variabilidad de las concentraciones de CO₂ en las distintas áreas laborales del INR-LGII y su calidad del aire interior. Se demostró que las condiciones de cada área dependen de factores muy particulares, por lo que el monitoreo debe realizarse a nivel individual.

Palabras clave: Calidad de aire en interiores, Medición de CO₂, Ventilación natural, Aerosoles, SARS-CoV-2, COVID-19.

2. Introducción

El virus SARS-CoV-2 es el agente infeccioso de la pandemia actual por COVID-19, enfermedad que ha causado estragos en todos los medios y logrado aturdir a la sociedad humana. Desde su aparición ha provocado curiosidad y controversia respecto a sus posibles medios de transmisión, observando la presencia de SARS-CoV-2 en distintos entornos y siendo transmitido por emisiones respiratorias, fluidos corporales y/o excretas.⁽¹⁾ En un inicio existía un debate sobre la transmisión aérea⁽²⁾, actualmente respecto a una visión más específica: gotículas vs aerosoles. Situación que ha desencadenado mayor investigación respecto a la física de partículas, ahondando y especificando definiciones para lograr una mejor comunicación en la comunidad científica.⁽³⁾

Diversos estudios tanto en áreas controladas con animales como en áreas hospitalarias han evidenciado la presencia y transmisión de SARS-CoV-2 sin la necesidad del contacto físico. En una investigación por Tang S, et. al. hacen referencia a distintos artículos que demuestran la transmisión por aerosoles del SARS-CoV-2 aplicando los criterios de Jones y Brosseau sobre el riesgo de transmisión por aerosoles.⁽¹⁾ De acuerdo con los criterios de Jones y Brosseau, un valor de 6 o más puntos como peso de evidencia indica una posible transmisión de aerosoles al tener evidencia de moderada a fuerte para dos o más condiciones.⁽⁴⁾ Donde en base al estudio por Song Tang et. al. califican al SARS-CoV-2 con una puntuación de 8 puntos como peso de evidencia.⁽¹⁾

Estudios recientes proporcionan evidencia de la transmisión del virus por aire en interiores, particularmente en ambientes con mucha gente y poca ventilación. Las ciudades con mala calidad del aire aumentan la probabilidad de infecciones, especialmente las regiones con el índice de calidad del aire más bajo.⁽⁵⁾ El SARS-CoV-

2 en aerosoles también es estable durante al menos varias horas si el virus se produce en aerosoles de partículas pequeñas. Sin embargo, es probable que la transmisión de aerosoles se combine con la transmisión de gotitas respiratorias y por contacto en un ambiente interior confinado, abarrotado y mal ventilado, como han sugerido algunos casos de grupo. Por lo tanto, se requieren medidas preventivas adecuadas para controlar la calidad del aire en interiores (CAI).⁽⁶⁾

Aunque el dióxido de carbono (CO₂) generalmente se considera el principal índice de contaminantes interiores, su función principal cuando se monitorean los ambientes interiores es como un indicador de la efectividad en la ventilación y la capacidad de renovación de la atmósfera interior.⁽⁷⁾ Motivo por el cual el presente estudio se enfoca en el monitoreo de las emisiones de CO₂, al ser reconocido como un indicador indirecto de la contaminación aérea, secundario a la mala ventilación, permitiéndole fungir como un parámetro importante en la estimación del riesgo de transmisión para SARS-CoV-2 vía aérea debido a la emisión de gotículas y aerosoles durante las actividades cotidianas. Además, el monitoreo de CO₂ ofrece ciertos beneficios como ser un equipo más económico, accesible y factible de usar en contraste de algún equipo más especializado.

Dentro de las recomendaciones generales para disminuir el riesgo de COVID-19 se encuentra utilizar ventilación natural y aumentar el flujo de aire en interiores. Sin embargo, al ser nuestro instituto carente de los medios para medir la ventilación de forma directa, se realizó por esta vía indirecta y valorar así mismo la CAI, además, de identificar así los posibles sitios de riesgo.

3. Objetivos

- Objetivo general
 - Conocer la calidad del aire en interiores y ocupación en áreas del Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra Ibarra (INR-LGII) para conocer el riesgo de transmisión de COVID-19.

- Objetivos específicos
 - Estimar la CAI mediante el monitoreo de alta resolución temporal la concentración de CO₂ y ocupación de áreas del INR-LGII.
 - Identificar la distribución en la calidad del aire, ocupación, ventilación y riesgo de transmisión de SARS-CoV-2 de las instalaciones del INR-LGII.
 - Identificar lugares de alto riesgo para transmisión de SARS-CoV-2 con CAI no aceptable y hacinados.
 - Determinar el efecto de factores como el tipo de uso de las áreas y su ubicación sobre calidad del aire, ocupación y riesgo de transmisión de SARS-CoV-2.

4. Hipótesis

En el INR pueden existir áreas con CAI, ocupación, ventilación, riesgo de transmisión por SARS-CoV-2 no adecuadas, relacionadas con el tipo de uso de las áreas y su ubicación, que pueden identificarse mediante el monitoreo de alta resolución temporal de concentración de CO₂.

5. Marco Teórico

Un elemento fundamental para los edificios saludables es la CAI pues esta tiene un efecto sobre la salud de los ocupantes,⁽⁸⁾ pudiendo causar desde síntomas leves hasta enfermedades severas. Este efecto depende del contaminante presente (tipo, tasa de emisión y reactividad), la exposición (volumen del área y tiempo de exposición), y susceptibilidad del receptor.^(9,10) Por lo tanto, la evaluación de la CAI es muy importante y especialmente en ambientes donde hay personas susceptibles, como las instalaciones de salud. El interés en la evaluación de la CAI en instalaciones de salud ha crecido en los últimos años para comprender la presencia, distribución y variaciones de contaminantes en dichas instalaciones.^(11,12)

Los contaminantes pueden ser químicos o biológicos, como partículas que contienen virus causantes de enfermedades transmisibles por vía aérea (ETVA) como influenza o el SARS-CoV-2 de la presente pandemia. El SARS-CoV-2 es transmisible por aerosoles en interiores mal ventilados y congestionados.^(3,13,22,14-21) Los aerosoles son microgotículas de líquido respiratorio emitidas al respirar, hablar o estornudar que contienen partículas virales pueden acumularse y mantenerse estables por varias horas en interiores mal ventilados. Debido al efecto de las ETVA, como el COVID-19, sobre la salud y la economía, es necesario tomar medidas preventivas para evaluar y controlar la CAI⁽⁶⁾ con el fin de identificar y evitar lugares de riesgo hacinados y mal ventilados.⁽²³⁾

La medición de concentración de CO₂ ([CO₂]) de alta resolución temporal, del orden de minutos, permite estimar la CAI, ocupación, y ventilación en interiores, con el fin de prevenir la transmisión de ETVA, como el SARS-CoV-2.^(12,24) El CO₂ es un derivado del metabolismo humano que se puede medir de forma sencilla y económica, utilizando monitores de CO₂ de alta resolución temporal, portables, que requieren poco mantenimiento.⁽²⁴⁾ Los monitores de CO₂ se han recomendado⁽²⁵⁾ para

monitorear la ventilación y prevenir la transmisión por aerosoles del SARS-CoV-2 en escuelas, hospitales y edificios públicos en general.⁽²⁶⁾

Las niveles de CO₂ por encima de los niveles al aire libre (entre 400 y 500 ppm) reflejan la concentración de CO₂ al interior proveniente de los ocupantes cuando no existe otra fuente importante.⁽²⁷⁾ Concentraciones de CO₂ altas indican una ventilación insuficiente con el consecuente incremento en el “aire compartido”, lo cual es un factor de riesgo de transmisión de ETVA, como el COVID-19 en lugares hacinados.⁽²⁸⁾

De esta forma, la concentración de CO₂ en interiores se ha utilizado para modelar el riesgo de infección de ETVA como tuberculosis (TB), influenza^(29,30), o COVID-19.⁽³¹⁾

A pesar de ello existen pocos estudios sobre concentraciones de CO₂ en interiores en instalaciones de salud.⁽³²⁾ La mayoría de estos estudios coinciden en la existencia de una inadecuada CAI en las instalaciones de salud, con presencia de altas concentraciones de CO₂, debido a problemas de ventilación y ocupación.^(24,26,33–37)

Por lo que se aprecia gran posibilidad de transmisión en instalaciones de salud de ETVA como el COVID-19.^(38,39) Por lo que es necesario mejorar la ventilación para reducir la concentración de contaminantes y controlar infecciones en instalaciones de salud, para proteger al personal y pacientes.^(16,18,19,40) Para el caso particular de COVID-19, la ventilación es una estrategia de mitigación de riesgo particularmente fácil de continuar aplicándose para mitigar el riesgo de ETVA.⁽⁴¹⁾ Específicamente, durante la pandemia, se recomendó mejorar la ventilación de instalaciones de salud⁽⁶⁾ para mantener las concentraciones de CO₂ de interior por debajo 1000 ppm mínimo o debajo de 800 ppm idealmente⁽²⁵⁾ o alcanzar valores de ventilación entre 6 y 15 cambios de aire por hora (ACH, siglas en inglés).^(28,42,43) Estudios previos han demostrado que el uso de monitores de CO₂ para revelar ventilación insuficiente e implementar estrategias efectivas para reducir concentraciones de CO₂ por debajo de 1,000 ppm.^(44–46) Sin embargo, muchos de los reportes corresponden a instalaciones de salud equipadas con sistemas de ventilación mecánica, donde es fácil controlar las tasas de ventilación.⁽⁴¹⁾



6. Justificación y planteamiento del problema

Existe poca información sobre concentraciones de CO₂ en áreas de salud ventiladas naturalmente. Aunado a ello también existen pocos reportes de la CAI de instalaciones ambulatorias⁽⁴⁷⁾ y de rehabilitación, así como la ocupación, volumen de consulta y actividades específicas que afectan estas mediciones. A las instalaciones de rehabilitación acuden pacientes con discapacidad, adultos mayores y menores de edad que son más susceptibles a contaminantes e infecciones⁽²⁴⁾ debido a bajos niveles de actividad física y limitación de la función respiratoria.⁽²⁶⁾ Por ejemplo, la pandemia por COVID-19 ha causado especial mortalidad entre adultos mayores frágiles.⁽⁴⁸⁾ El distanciamiento físico y control de ocupación son un reto especialmente en las instalaciones de rehabilitación académicas debido a la necesidad de asistencia física de los pacientes, múltiples estudiantes y profesionales.⁽²⁶⁾ Se han reportado brotes de COVID-19 en centros de rehabilitación neuromusculoesquelética, con consecuencias sobre la mejoría de los pacientes.⁽⁴⁹⁾ Por lo anterior es importante conocer la CAI y ocupación en áreas del INR-LGII, el cual es una institución que cuenta con ventilación natural, para conocer el riesgo de transmisión de ETVA como el COVID-19. El conocimiento sobre la CAI, ocupación, ventilación y prevención de ETVA en instalaciones de rehabilitación es necesario para concientizar a los involucrados⁽⁵⁰⁾ y considerar posibles modificaciones en el proceso de atención⁽⁵¹⁾ que permitan garantizar la salud de pacientes y personal⁽⁴⁰⁾, evitando consecuencias sociales y económicos negativas⁽⁵²⁾, como la disminución en la atención ambulatoria durante la pandemia.^(53,54)

7. Material y Métodos

7.1. Escenario

El presente estudio es de tipo descriptivo, observacional y transversal. La estimación de la calidad del aire y ocupación a través de la medición de concentración de CO₂ para conocer el riesgo de transmisión de COVID-19 se llevó a cabo en el edificio de rehabilitación del INR-LGII, el cual es un hospital escuela de tercer nivel donde se lleva a cabo atención ambulatoria (consulta y terapia), atención hospitalaria y funciones administrativas relacionadas con la rehabilitación de pacientes pediátricos y adultos. Este es un edificio de 4 niveles con 22 años de antigüedad, sin ventilación mecánica, ubicado en una zona urbana junto a dos avenidas principales.

El monitoreo de la calidad del aire y ocupación se llevó a cabo en un lapso de 2 horas por área procurando alcanzar una altura de 1.5 m, durante 3 meses de forma diurna en las áreas seleccionadas a lo largo de diferentes pisos del edificio de rehabilitación. Se emplearon 3 monitores de CO₂ Aranet4 Home (SAF Tehnika, Riga, Lituania, 200 USD/unidad) que contienen un sensor infrarrojo no dispersivo que consta de una fuente y un detector IR, para medir CO₂ dentro de un rango de concentración de 0-9999 ppm con una exactitud de ± 50 ppm. Los monitores permiten el almacenamiento hasta por una semana de datos de concentración de CO₂, temperatura y humedad relativa con marcas de tiempo a una frecuencia seleccionable entre 2 o 1 minuto por muestra. Los monitores cuentan con calibración de fábrica y están validados para medir la CAI y ventilación en comparación con instrumentos de grado de investigación en ambientes clínico.⁽³⁰⁾

La operación normal en este edificio se lleva a cabo durante el día y las instalaciones permanecen desocupadas durante la noche excepto por el piso de hospitalización. Las áreas están organizadas por grupos que comparten pasillos, salas de espera, así como cubos de luz y ventilación. Además, cuentan con diferentes dimensiones, usos y arquitectura; por este motivo fueron agrupadas según la actividad que se realiza

dentro de ellas en categorías basadas en recomendaciones de ocupación⁽⁵⁵⁾, ventilación⁽⁴⁴⁾ y nivel de riesgo⁽⁴¹⁾; ver Tabla 1. La evaluación de ocupación y actividad humana se registró en una bitácora de medición tras la medición del sensor Aranet 4 Home mediante interrogatorio directo del personal laboral en el área.

Tabla 1 Recomendaciones de ocupación por el Instituto Nacional de Normalización Estadounidense y la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ANSI/ASHRAE) 62.1-2019

Descripción	Densidad de ocupantes [#/100 m ²]	Distancia entre ocupantes [m] ⁽¹⁾
Salas de juntas	50	1.4 ⁽²⁾
Recepción	30	1.8
Salas de descanso	25	2.0
Consultorios	20	2.2
Vestíbulos	10	3.2
Áreas para terapia	7	3.8

⁽¹⁾ La distancia entre ocupantes se calculó como $\sqrt{100/\text{Densidad de ocupantes}}$

⁽²⁾ Se utilizará el valor de densidad de ocupantes 30/100 m² para mantener una distancia mínima entre ocupantes de 1.8 m

7.2. Muestra

Se calculó un tamaño de muestra de 84 áreas, necesario para estimar la proporción de áreas en el edificio de rehabilitación del INR con CAI fuera del rango aceptable (concentración de CO₂ promedio ≥ 800 ppm) con un nivel de confianza (z) del 90%, un margen de error (ϵ) del 6%, y una proporción estimada \hat{p} del 75% para una población finita (N) de 200 áreas. La proporción estimada \hat{p} se basa en el estudio (36) que

encontró variaciones en la CAI de 16 áreas (quirófanos, urgencias, farmacia, hospitalización y departamentos de anestesia, cardiología, medicina respiratoria, nefrología y reumatología) de 3 hospitales con ventilación natural en Bangladesh, donde 75% de los datos sobrepasaron el valor de referencia de 800 ppm en la concentración de CO₂.⁽²⁵⁾ El margen de error (ε) del 6% se calcula tomando en cuenta la exactitud del monitor (± 50 ppm) Aranet4 Home (SAF Tehnika, Riga, Lituania) para el valor de referencia utilizado. Se estima un número máximo de 200 áreas en el edificio de rehabilitación según un conteo realizado en un estudio piloto previo.

$$n = \frac{\frac{z^2 \hat{p}(1 - \hat{p})}{\varepsilon^2}}{1 + \frac{z^2 \hat{p}(1 - \hat{p})}{\varepsilon^2 N}} = 84$$

Donde $z = 1.645$, $\varepsilon = 0.06$, $\hat{p} = 0.75$ y $N = 200$

Nuestro universo de trabajo se conformó por consultorios, áreas de terapia, hospitalización y oficinas administrativas en el edificio de rehabilitación del INR.

Para el criterio de inclusión, se tomaron en cuenta las áreas con autorización de la Dirección Médica, especialmente de la Subdirección de Medicina de Rehabilitación y Subdirección de Medicina del Deporte ubicadas en el edificio de rehabilitación, que contarán con ocupación y acceso durante el periodo de registro. El único criterio de eliminación fue no contar con todas las variables requeridas para el estudio (p.e. calidad del aire, ocupación, ventilación), y como criterios de exclusión: áreas no ocupadas durante el periodo de registro, así como áreas sin acceso y/o autorización para realizar la medición como las instalaciones de la escuela superior de rehabilitación (piso 1) y el piso de rehabilitación pediátrica (piso 4).

7.3. Proceso de registro

Un investigador explicó el propósito de la investigación y solicitó acceso al encargado de área colocar un monitor de CO₂ Aranet4 Home. El investigador registró en la bitácora (la bitácora se creó como un libro en el software para procesamiento de datos Excel para Microsoft 365): el identificador, categoría, grupo, piso, dimensiones (las dimensiones del área se registraron mediante medidor de distancia laser con alcance máximo de 60 metros) y condición de ventilación del área; fecha, tiempo y sensor del registro; así como número de ocupantes y nivel de actividad de ocupantes menores y mayores de 11 años (ver Tabla 11 en anexos).

La condición de ventilación, así como el número de ocupantes y nivel de actividad de ocupantes menores y mayores de 11 años durante el registro en general se obtuvo mediante interrogatorio de los ocupantes.

Después del al menos dos horas de medición el investigador registró el tiempo en la bitácora y solicitará acceso al encargado del área para retirar el monitor de CO₂ interrogándolo sobre la condición de ventilación, así como número y nivel de actividad de los ocupantes en general durante el registro.

7.4. Cálculo de ventilación y riesgo de transmisión de SARS-CoV-2

El cálculo de la ventilación y del riesgo de transmisión de SARS-CoV-2 se incluyó en la bitácora de medición mediante fórmulas de Excel (ver ec 1-3).

Para el cálculo de la ventilación se utilizó el modelo de estado estable descrito por Batterman⁽⁵⁶⁾ para calcular los cambios de aire por hora (ACH ó ϕ_{ACH}) de las áreas (ver ec 1).

$$\phi_{ACH} = \frac{v_{CO_2} * 6 * 10^7}{V(\zeta_{CO_2, in} - \zeta_{CO_2, ex})} \quad (ec 1)$$

Donde v_{CO_2} es la tasa de generación de CO₂ en m³/min; v es volumen del área en m³; $\zeta_{CO_2,in}$ es la concentración CO₂ interior en ppm; $\zeta_{CO_2,ex}$ es la concentración CO₂ exterior en ppm. La tasa de generación de CO₂ (v_{CO_2}) se calculó de acuerdo a lo descrito por Persily⁽⁴³⁾ (ver ec. 2).

$$v_{CO_2} = \frac{2.11 \cdot 10^{-4} \cdot RQ \cdot BMR \cdot M \cdot T}{P} \quad (ec\ 2)$$

Donde RQ es el coeficiente de respiración; M es la tasa metabólica en función de la *actividad en mets*; BMR es la tasa metabólica basal en función de categorías de *edad en MJ/día* (ver ec. 2); T es la temperatura en °K; P es la presión en kPa. Se crearon categorías de nivel de actividad y edad para la tasa metabólica (M) y tasa metabólica basal (TMB) respectivamente, con el fin de simplificar el registro de información sobre ocupación y actividad humana.

De esta forma el investigador que registró la ocupación y actividad humana únicamente registró las categorías para edad y nivel de actividad de los ocupantes dentro del área en general sin necesidad de interrogar a cada uno de los ocupantes, o realizar registros múltiples y variables de actividad entre áreas y dentro de las áreas, agilizando y simplificando de esta forma el registro y cálculos, interrumpiendo al mínimo la operación cotidiana dentro de las áreas. Las categorías de edad fueron definidas tomando un punto de corte donde no se aprecian diferencias significativas en BMR por sexo según los datos de Persily y de Jonge.⁽⁴³⁾

En los casos donde no fue posible alcanzar el estado estable en las mediciones, se utilizaron los valores máximos y promedio para el cálculo de la tasa de cambio de aire. El riesgo de transmisión de SARS-CoV-2 (I_ω) en porcentaje se calculó usando el modelo de Gammaitoni-Nucci⁽⁵⁶⁾ (ver ec 3).

$$I_{\omega} = \left[1 - e^{-\frac{pq(\phi_{ACH}t + e^{-\phi_{ACH}t} - 1)}{\phi_{ACH}^2}} \right] \times 100 \quad (\text{ec 3})$$

Donde p es la tasa de respiración; q es la tasa de producción de “quanta” de infección SARS-CoV-2, ϕ_{ACH} es la ventilación en ACH; v es el volumen del área en m^3 y t es el tiempo de exposición en horas. Aquí se utilizan los valores de $p= 0.48 m^3/h^{(56)}$ y $q=1,000 \text{ quantum}/h^{(43)}$ y un tiempo de exposición de 15 minutos que es un valor promedio para una consulta. Los cálculos fueron incluidos en la bitácora de medición mediante fórmulas de Excel.

7.5. Análisis estadístico

Para conocer la distribución y variación en variables primarias (calidad del aire y, ocupación) y secundarias (ventilación, y riesgo de transmisión de SARS-CoV-2) de las instalaciones del INR-LGII se realizó estadística descriptiva por ubicación (grupos y pisos) de las áreas (ver Tabla 2) y por tipo de uso (ver Tabla 3).

Tabla 2 Distribución por pisos y grupos de las áreas monitoreadas.

Pisos N=3	Grupos N= 16	N=85
Planta Baja (PB)	Rehabilitación Pediátrica (Ped)	13
	Rehabilitación Ortopédica (Ort)	16
	Rehabilitación de Columna (Col)	7
	Rehabilitación Cardiopulmonar (Car)	8
	Plasticidad Cerebral (PIC)	1
	Terapia pediátrica (TPe)	1
	Terapia ocupacional (TOc)	2
	Cubículos de Terapias (CTe)	4
	Gimnasio (Gim)	1
	Tanque terapéutico (TTe)	1
	Tinas de Hubbard (THu)	1
Primer piso (1)	Dirección Médica (Dir)	4
	Rehabilitación Neurológica (Neu)	6
	Clínica de Distrofias (Dis)	5
	Medicina del Deporte (MDe)	6
Tercer Piso (3)	Hospitalización de R. Neurológica (HRe)	9

Tabla 3 Descripción y clasificación de las áreas por categorías de uso en base a las recomendaciones por entidades internacionales.

ID	Categoría	ANSI/ASHRAE 62.1-2019 (# de ocupantes/100m2)	CDC 2003 (ACH)	Riesgo
Ofi	Oficinas	Salas de juntas y oficinas (50)	Áreas para personal de salud (4)	Bajo
Tme	Salas, aulas y residencia	Salas de descanso y laboratorios de cómputo (25)	Áreas para personal de salud (4)	Bajo
Con	Consultorios y cubículos para terapia, aislados de pacientes	Consultorios y cubículos para terapia (20)	Consultorios, terapia, cuartos de paciente (6)	Bajo
EsA	Ejercicio/terapia sin emisión de aerosoles	Terapia (7)	Terapia (6)	Bajo
EcA	Ejercicio/terapia con emisión de aerosoles	Terapia (7)	Terapia (6)	Medio
Abreviaturas: Instituto Nacional de Normalización Estadounidense y la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ANSI/ASHRAE) y el Centro de Control y Prevención de Enfermedades (CDC).				

Las variables cuantitativas se describieron a través de promedios y medidas de dispersión (desviación estándar, valor máximo y mínimo). Se comprobó la normalidad

de las variables cuantitativas mediante prueba de Saphiro Wilk y la homocedasticidad mediante prueba de Levene.

La determinación de lugares de alto riesgo de transmisión de SARS-CoV-2 se realizó mediante la identificación de áreas con CAI no aceptable ($\text{CO}_2 > 800$ ppm) y/o hacinadas (ocupación $> 100\%$), así como áreas con valores atípicos de variables primarias y secundarias según la distribución y variación por uso y ubicación.

El efecto de factores como el tipo de uso de las áreas y su ubicación sobre calidad del aire, ocupación y riesgo de transmisión de SARS-CoV-2 se analizó mediante las diferencias en variables primarias y secundarias entre áreas por ubicación y uso, utilizando prueba de Kruskal-Wallis (H) o ANOVA con análisis post hoc respectivo (Bonferroni, Dunn o Dunnett) según la distribución de los datos. El efecto del piso sobre las variables primarias y secundarias se determinó mediante el cálculo del ajuste lineal de estas variables contra el piso. En caso de datos perdidos en el análisis por ubicación se realizará imputación con el valor promedio del grupo o piso al que pertenezca el área. Todo el análisis estadístico se realizó importando los datos de la bitácora de medición en el software Matlab R2020a (Natic USA).

8. Resultados

De las áreas a evaluar en el edificio de rehabilitación del INR-LGII se eliminaron y excluyeron aquellas que estuvieran vacías por tener a su personal en descanso laboral o incapacidad, o tuvieran el registro incompleto, restando a un total de 85 áreas disponibles, las cuales se encuentran distribuidas a lo largo de 3 niveles (planta baja, primer y tercer piso) (Ver Tabla 4 y Figura 1).



Figura 1 Distribución de áreas por piso: planta baja, primer piso y tercer piso (de izquierda a derecha).

Como se intuía las características físicas y de ventilación de las áreas fueron diferentes (volumen, ocupación, CO₂ promedio, ventilación, riesgo) entre las 85 áreas. Siendo las siguientes medias y rangos entre cuartiles 1 y 3 los de mayor precaución: densidad de ocupación promedio de 96%, rangos de 53% - 135%; un CO₂ promedio de 729ppm, rangos de 852-949ppm y una ventilación media de 4 ACH, con rangos de 3 – 8 ACH.

Tabla 4 Valores promedio de las 85 áreas evaluadas en el INR-LGII.

Variable	Media [25 – 75%]
Volumen (m ³)	34 [28 – 42]
Ocupación (%)	96 [53 – 135]
Media CO ₂ (ppm)	729 [582 – 949]
Exposición CO ₂ >1000 ppm (%)	0 [0 – 15]
Ventilación (ACH)	4 [3 – 8]
Tiempo para recambio del 80% del aire (min)	24 [12 38]
Riesgo de transmisión en 15 de exposición (%)	26 [15 31]

Las concentraciones de CO₂ mostraron diferencias significativas en la planta baja con una media de 894±290ppm (p<0.01) en el análisis por pisos, así como una diferencia significativa de estos por arriba de 800 ppm (p<0.01), en la modalidad de grupos. Hubo diferencias para el servicio de rehabilitación pediátrica ~1071±370ppm y ortopédica ~953±148ppm (p<0.01), también con diferencia significativa por estar por encima de las 800 ppm (p<0.01, Ver Tabla 5). Respecto a la modalidad por categorías, los consultorios marcaron la diferencia entre el resto (p<0.01) por concentración de CO₂ y al estar encima de las 800 ppm (p<0.01). (Ver Figura 2 y Figura 3).

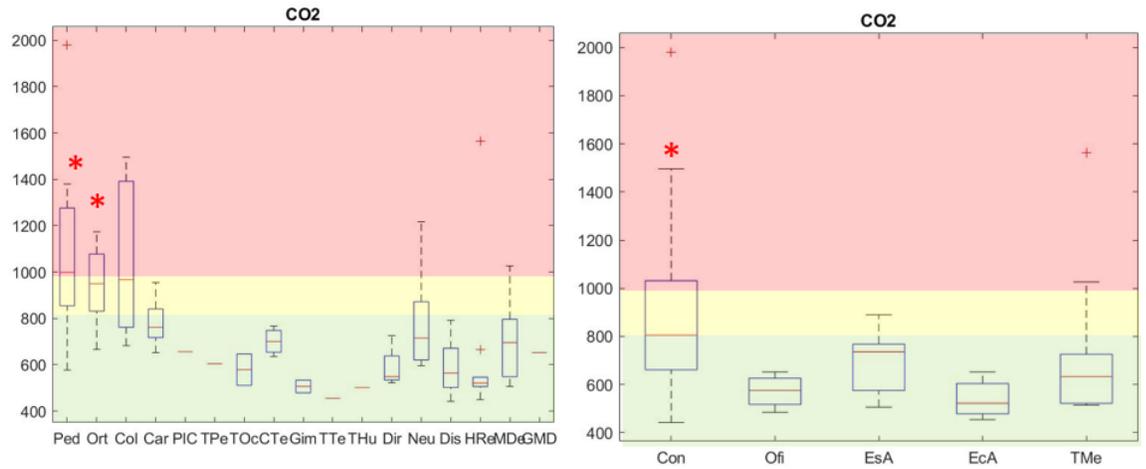


Figura 2 Análisis de la distribución de las concentraciones de CO₂, en la izquierda por grupos, a la derecha por categoría. Franja verde (deseable), amarilla (aceptable), roja (no deseable).

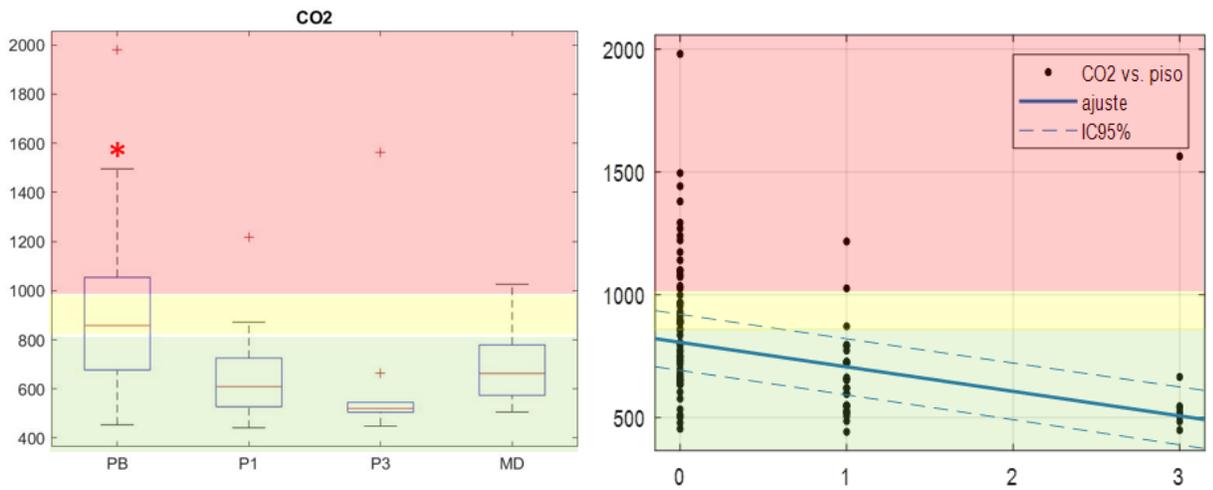


Figura 3 Distribución de las concentraciones de CO₂ por pisos en la izquierda, a la derecha su tendencia por piso en base a regresión lineal. La línea punteada muestra el intervalo de confianza al 95% (IC95%).

Tabla 5 Concentración de CO₂ promedio registrada por grupo.

Piso	Grupos	Media CO ₂ ± DE (ppm)
Planta Baja	R. Pediátrica	1071±370
	R. Ortopédica	953±148
	R. de Columna	1063±333
	R. Cardiopulmonar	781±99
	Plasticidad Cerebral	656±0
	Terapia pediátrica	604±0
	Terapia ocupacional	578±96
	Cubículos de Terapias	701±58
	Gimnasio	506±39
	Tanque terapéutico	454±0
	Tinas de Hubbard	501±0
Primer piso	Dirección Médica	586±94
	R. Neurológica	789±234
	Clínica de Distrofias	588±120
	Medicina del Deporte	711±188
Tercer piso	Hospitalización de R. Neurológica	630±333

El análisis del tiempo de exposición con valores superiores a 1000 ppm de CO₂ identificó al servicio de rehabilitación de columna con el mayor tiempo de exposición, ~41±35% (p<0.01, ver Tabla 6, Figura 4).

Tabla 6 Porcentaje del tiempo de exposición a concentraciones de CO₂ >1000 ppm.

Piso	Grupos	Media ± DE [%]
Planta Baja	R. Pediátrica	30±40%
	R. Ortopédica	17±22%
	R. de Columna	41±35%
	R. Cardiopulmonar	5±12%
	Plasticidad Cerebral	0±0%
	Terapia pediátrica	0±0%
	Terapia ocupacional	0±0%
	Cubículos de Terapias	0±0%
	Gimnasio	0±0%
	Tanque terapéutico	0±0%
	Tinas de Hubbard	0±0%
Primer piso	Dirección Médica	2±4%
	R. Neurológica	7±12%
	Clínica de Distrofias	0±0%
	Medicina del Deporte	0±0%
Tercer piso	Hospitalización de R. Neurológica	10±29%

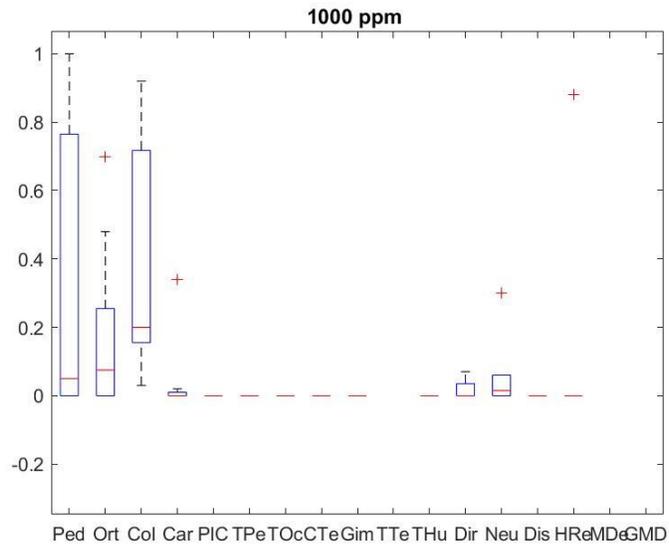


Figura 4 Porcentaje del tiempo de exposición a concentraciones de CO₂ >1000 ppm.

El análisis de la densidad de ocupación por piso identificó al tercero con una diferencia significativa entre los demás, así como por estar arriba de las 800 ppm ($p=0.02$ y $p=0.01$, respectivamente, ver Figura 5). En la modalidad de análisis por grupos, el área de hospitalización en rehabilitación neurológica resultó diferente con una densidad de ocupación media de $147 \pm 52\%$ ($p=0.02$, ver Tabla 7, Figura 5).

Tabla 7 Porcentaje para densidad de ocupación por grupo.

Piso	Grupos	Media \pm DE (%)
Planta Baja	R. Pediátrica	115 \pm 65%
	R. Ortopédica	110 \pm 54%
	R. de Columna	89 \pm 37%
	R. Cardiopulmonar	130 \pm 61%
	Plasticidad Cerebral	87 \pm 0%
	Terapia pediátrica	76 \pm 0%
	Terapia ocupacional	76 \pm 73%
	Cubículos de Terapias	45 \pm 12%
	Gimnasio	32 \pm 0%
	Tanque terapéutico	0%
	Tinas de Hubbard	51 \pm 0%
Primer piso	Dirección Médica	35 \pm 22%
	R. Neurológica	96 \pm 57%
	Clínica de Distrofias	93 \pm 24%
	Medicina del Deporte	66 \pm 35%
Tercer piso	Hospitalización de Rehabilitación Neurológica	147 \pm 52%

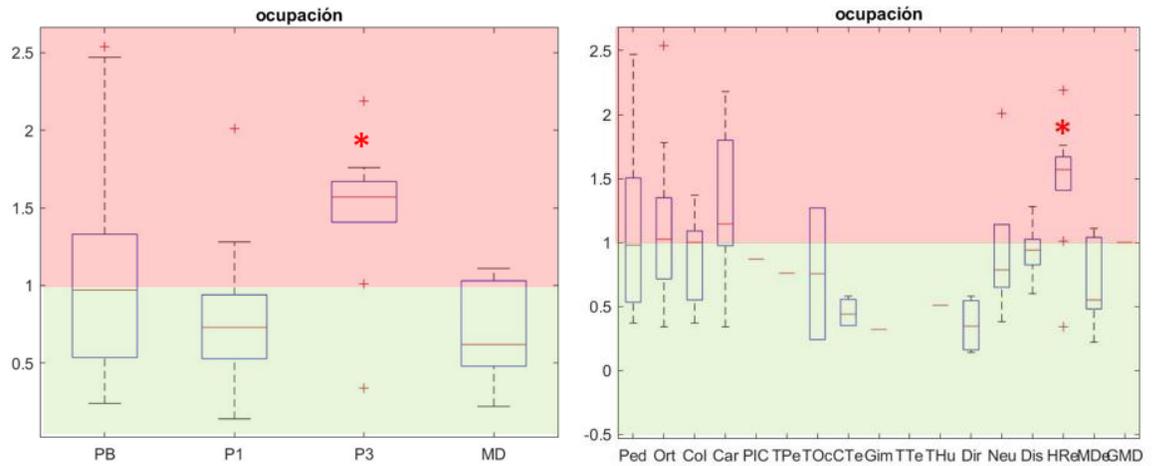


Figura 5 Densidad de ocupación por pisos (izquierda) y grupos (derecha).
Zona verde (<100%), zona roja (>100%)

Respecto a la ventilación se obtuvo una diferencia significativa para el tercer piso, presentando una media de 19 ± 13 ACH ($p < 0.01$), así como por estar arriba de los 6 ACH ($p < 0.01$), ver Tabla 8 y Figura 6.

Tabla 8 Distribución de ventilación promedio por piso.

Piso	Media \pm DE (ACH)
PB	5 ± 6
1	8 ± 6
3	19 ± 13
Medicina del Deporte	5 ± 1

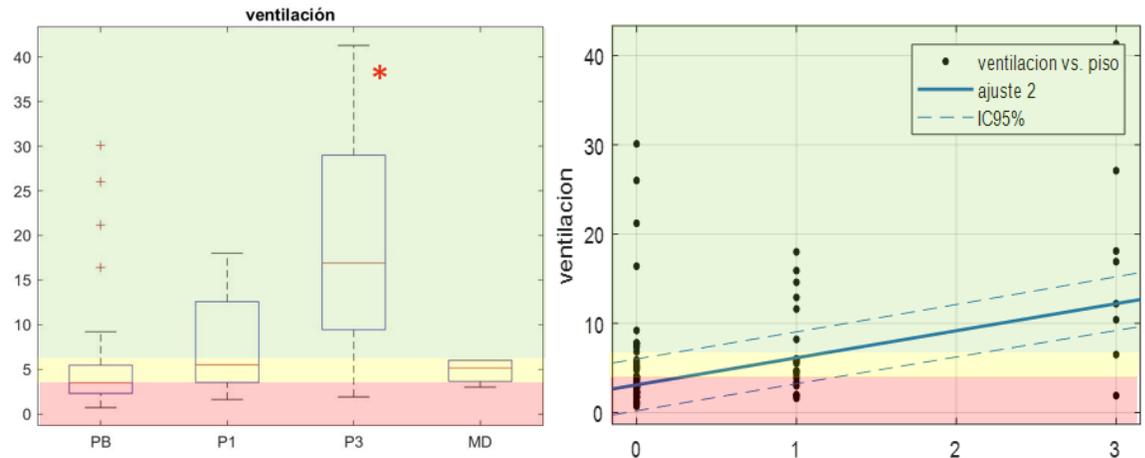


Figura 6 Distribución de la ventilación en cambios de aire por hora (ACH) por pisos (izquierda) y su tendencia (derecha).

El análisis de volumen por área evidenció diferencias significativas para el servicio de medicina del deporte (630 m^3 , $p=0.02$, ver Tabla 9) y áreas de ejercicio con emisión de aerosoles ($p<0.01$, ver Figura 7), para las modalidades de análisis por pisos y categorías, respectivamente.

Tabla 9 Distribución de volumen promedio por piso

Piso	Media \pm DE (m^3)
Planta baja	116 \pm 270
Primer piso	51 \pm 46
Tercer piso	26 \pm 13
Medicina del deporte	630 \pm 745

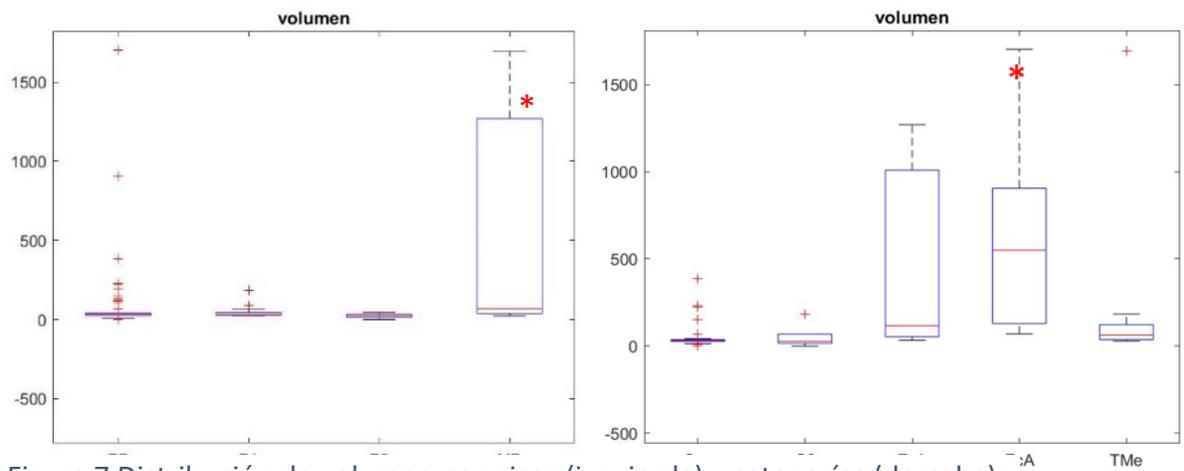


Figura 7 Distribución de volumen por pisos (izquierda) y categorías (derecha).

Respecto al riesgo se encontraron diferencias significativas para los servicios de rehabilitación pediátrica $\sim 32 \pm 8\%$ y de columna $\sim 30 \pm 3\%$ ($p < 0.01$, ver Tabla 10), así como en el de ejercicios con emisión de aerosoles ($p < 0.01$, ver Figura 8) en el análisis por categorías.

Tabla 10 Porcentaje de riesgo de transmisión por grupo ante 15 minutos de exposición

Piso	Grupos	Media ± DE (%)
Planta Baja	R. Pediátrica	32±8
	R. Ortopédica	33±8
	R. de Columna	30±3
	R. Cardiopulmonar	24±10
	Plasticidad Cerebral	5±0
	Terapia pediátrica	6±0
	Terapia ocupacional	8±2
	Cubículos de Terapias	6±7
	Gimnasio	1±0
	Tanque terapéutico	ND
	Tinas de Hubbard	3±0
Primer piso	Dirección Médica	9±4
	R. Neurológica	25±7
	Clínica de Distrofias	23±10
	Medicina del Deporte	27±4
Tercer piso	Hospitalización de R. Neurológica	20±7

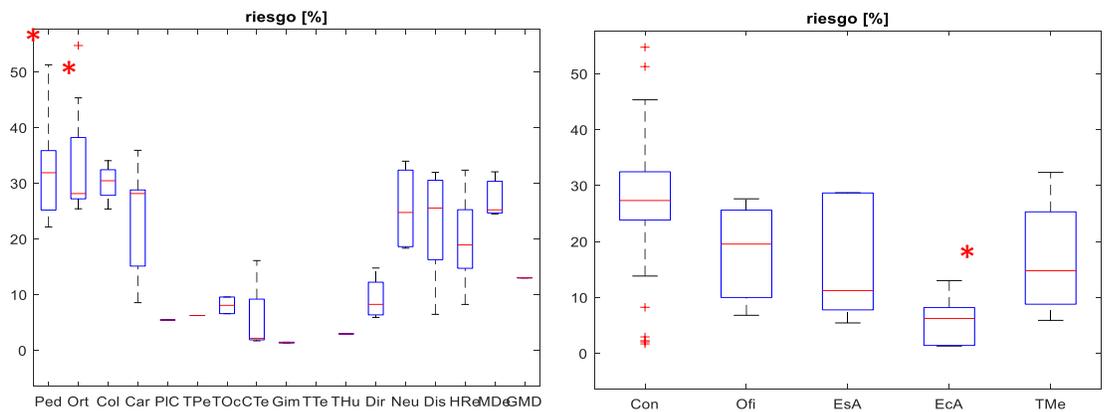


Figura 8 Riesgo de áreas por grupos (izquierda) y categorías (derecha).

Mientras que el riesgo de transmisión para SARS-CoV-2 en base al tiempo de exposición en caso de haber personal infectado en el área con sus actuales valores medios durante el horario laboral son superiores para los servicios de rehabilitación de columna, pediátrica y ortopédica en el análisis de grupos; para primer y tercer piso principalmente en la modalidad de pisos; así como para los consultorios y oficinas en el análisis de categorías (ver Figura 9, Figura 10 y Figura 11).

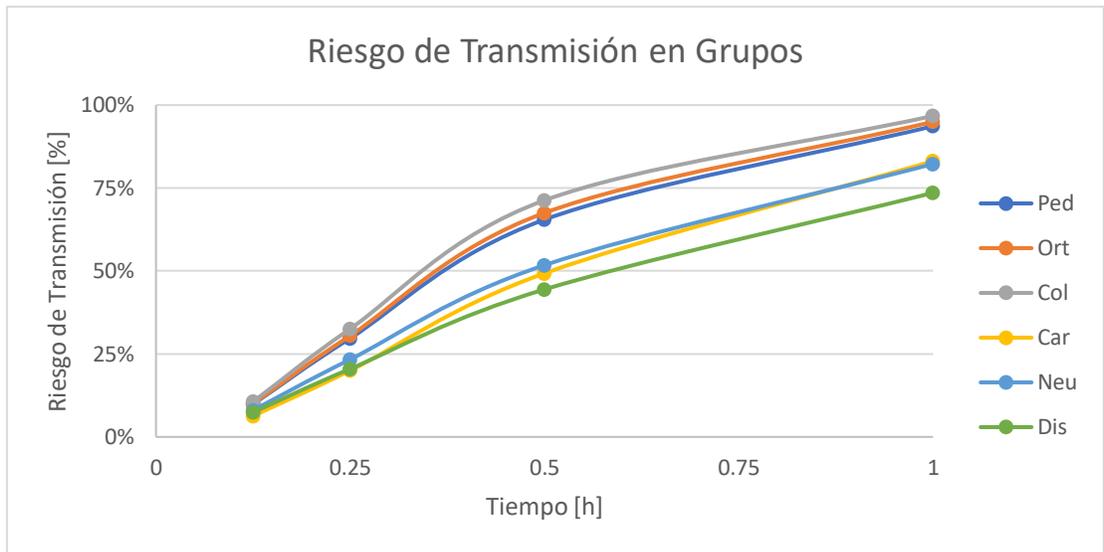


Figura 9 Riesgo de transmisión en base a tiempo por grupos (Áreas de rehabilitación: Ped [Pediátrica], Ort [Ortopédica], Col [Columna], Car [Cardiorrespiratoria], Neu [Neurológica], Dis [Clínica de Distrofias])

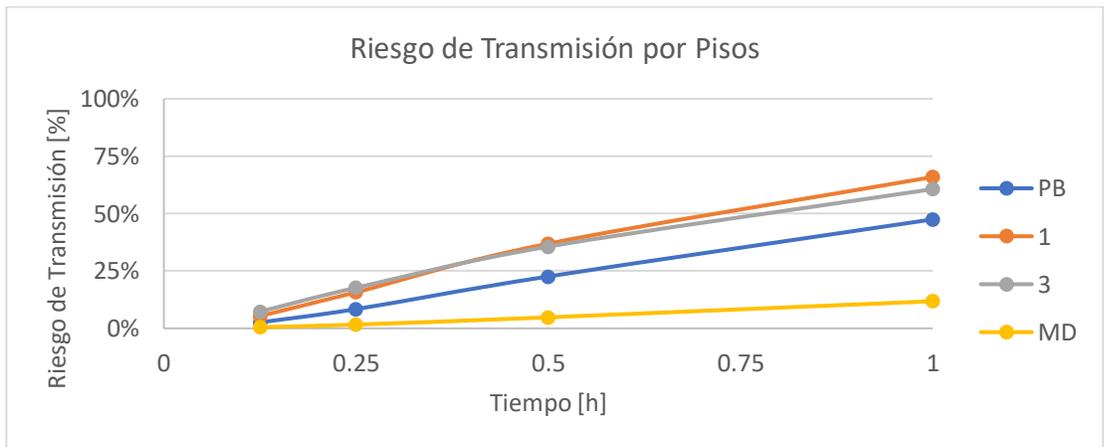


Figura 10 Riesgo de transmisión en base a tiempo de exposición por piso.

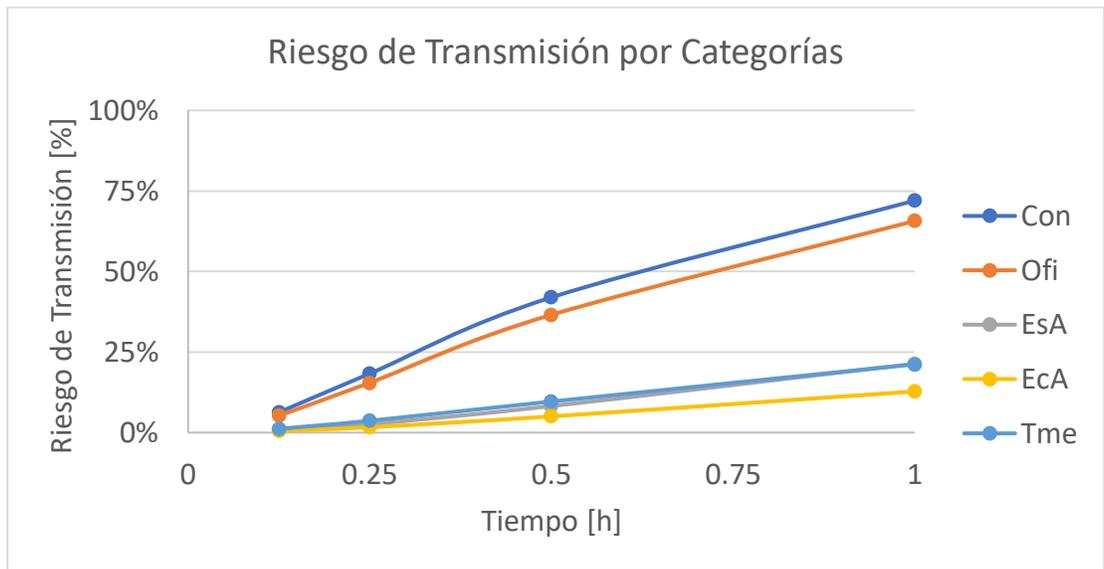


Figura 11 Riesgo de transmisión por categorías en base a tiempo de exposición.

9. Discusión

El presente estudio se enfocó en dar un panorama general en el que se labora con el día a día en un hospital no COVID-19. Siendo este un estudio transversal y con el objetivo de conocer la calidad del aire en sus interiores e identificando el riesgo mediante sus concentraciones de CO₂ y ocupación, se logró de forma acertada.

El analizar su ventilación natural dificulta el hecho de querer extrapolar y comparar los resultados, al ser datos inherentes a la estructura desde su edificación y por ende distintos a cualquier otro estudio similar que se pueda encontrar. Aun así, existen pocas investigaciones de forma nacional e internacional y mucho menos de forma tan específica sobre el área médica relacionada a la rehabilitación en cuyo caso requieren de un contacto estrecho entre médicos, fisioterapeutas y pacientes, donde se ha evidenciado disminuye la frecuencia u horario habitual de terapias correspondientes como lo refiere Spielman.⁽⁴⁹⁾

Al conocer las concentraciones de CO₂ uno puede estimar la CAI que poseen en base a los rangos establecidos para estos, siendo lo deseable un rango de 500 – 800 ppm, de 800 – 1000 ppm aceptable y >1000 ppm como no deseable. Tras interpretar los resultados podemos comentar que los consultorios son las áreas más afectadas y la única categoría que posee más de la mitad de las áreas con valores por encima de las 800 ppm de CO₂. Aun así, esto únicamente es una estimación al recordar que el CO₂ funge como indicador indirecto.

Sin embargo, para poder afianzar y decir con seguridad la CAI en nuestro INR, es al conocer la ventilación y sus parámetros con respecto a los cambios de aire por horas. Valores inferiores a 4 ACH están contraindicados y más en áreas de salud. Valores entre 4 y debajo de 6 ACH rango aceptable en diversas instalaciones no correspondientes al área de salud. Finalmente valores mayores a 6 ACH son los niveles recomendados para un hospital y de 12 ACH para un hospital nuevo.^(41–43,55) En base a esto y los resultados obtenidos se aprecia que el tercer piso cumplió de forma satisfactoria con estos criterios (19±13 ACH). No obstante, la planta baja en su mayoría se encuentra con una clasificación no deseable para el sector salud (5±6 ACH).

Como consecuencia, se puede decir que los principales sitios de riesgo identificados y por ende una CAI no aceptable, son innegablemente los consultorios, remarcando a los servicios de rehabilitación de columna (~1063±333 ppm [CO₂]), pediátrica (~1071±370 ppm [CO₂]) y ortopédica (~953±148 ppm [CO₂]) como los mayormente afectados.

En base a lo previamente comentado surgen ideas interesantes, pues muy probablemente esta información confirma que no existe una relación simple entre la concentración de CO₂, ocupación y ventilación del área como se aprecia en los

consultorios. Pues encontramos datos contrarios en el tercer piso, donde ciertas áreas a pesar de poseer altas densidades de ocupación en los horarios registrados, no se encontraron alzas en las concentraciones de CO₂, ni modificaciones en sus cambios de aire por hora, muy probablemente debido a su buena ventilación natural.

Otra posible relación por valorar sería entre las concentraciones de CO₂ y el volumen del área. A diferencia de probable relación previa, entre estas se puede ver un poco más clara al tener los consultorios con un pequeño volumen fomentan un ambiente vicioso en caso de no contar con una adecuada ventilación como fue nuestro caso. Mientras que las áreas de ejercicio con y sin emisión de aerosoles al tener áreas amplias y techos elevados, permiten una reserva de espacio mayor influenciando en una mejor ventilación, así como la distribución y disipación de sus concentraciones de CO₂. Lo cual muy probablemente fue planificada así su construcción desde un inicio por uso al cual estarían involucradas, como áreas de terapia y ejercicio para una amplia población y empleando de forma correcta una óptima ventilación natural. Contrario a lo referido por Pereira et. al. en sus salas de quirófano donde al ser áreas limitadas e incluso tras instalar ventilación mecánica para mejorar sus condiciones previas, resultó contraproducente e incluso peores niveles a las mediciones de basales.⁽³⁵⁾

Por último y no menos importante, recalcar el hecho del periodo de las mediciones. Efectuándose a inicios del 2021 donde aún se mantenían en auge y de forma estricta diversas medidas por la situación actual de la pandemia. Condición que podría sesgar la información, ya que con el paso del tiempo se reanudan más actividades y acceso de personal al hospital, sugiriendo que estos valores podrían empeorar por el hecho del regreso del alumnado de pregrado, pasantías de licenciados en enfermería y rotantes externos a las diversas áreas laborales de este instituto.

Una limitante respecto a la metodología sería que, al ser una medición transversal comprendida por 2 horas y durante 3 meses, limita la información acerca de la CAI durante las 24 horas en área de hospitalización⁽²⁶⁾ y general las concentraciones en otras temporadas o estaciones que propicien aún más estos entornos viciosos, como lo sería en otoño-invierno.^(33,34,36) Además, habría sido interesante realizar una valoración sobre el conocimiento de la ventilación y calidad del aire propicios a los edificios saludables sobre el personal laboral. Seguido de un cuestionario sobre el ambiente de interiores conocido como “MM Questionnaires (MM 040 NA Hospital)”, “NTP 290” o el “NTP 380” para detectar o descartar sintomatología en su entorno laboral. Posteriormente realizar intervenciones para comprobar la mejoría en los ACH, con una revaloración sobre la conciencia de la ventilación y CAI, en conjunto al cuestionario “MM 040 NA Hospital” con el objetivo de identificar o descartar la presencia de personal laboral con el síndrome del edificio enfermo.⁽⁵⁷⁾

Como propuesta final en caso de realizar en un futuro estas mejoras metodológicas, se abre la posibilidad a que una vez ya conocido el panorama general de la calidad aérea en interiores de esta institución en sus diversas temporadas, verificar si existió una relación entre los sitios con peor ventilación o mayor densidad ocupacional, con los sitios en donde se encontraban laborando el personal que resultó positivo para SARS-CoV-2 en conjunto con la información recabada durante esta pandemia por el servicio de epidemiología.

10. Conclusión

Como previamente se comentó, es difícil querer comparar los valores obtenidos con los de alguna otra institución de salud, al ser este la evaluación de un hospital con un sistema de ventilación natural. Es posible mencionar que, por nuestras mediciones y variables consideradas en un hospital de tercer nivel enfocado a la rehabilitación

hospitalaria y ambulatoria; hacen el presente estudio una investigación novedosa al no haber algún otro reportado de características similares.

Para resumir, se cumplió la intención del estudio de querer demostrar la probable variabilidad de concentraciones de CO₂ en las distintas áreas laborales del INR-LGII y su calidad del aire interior. Se demostró que las condiciones de cada área dependen de factores muy particulares, por lo que el monitoreo debe realizarse a nivel individual.

11. Referencias

1. Tang S, Mao Y, Jones RM, Tan Q, Ji JS, Li N, et al. Aerosol transmission of SARS-CoV-2? Evidence, prevention and control. *Environ Int.* 2020;144(July).
2. Morawska L, Cao J. Airborne transmission of SARS-CoV-2: The world should face the reality. *Environ Int* [Internet]. 2020;139(April):105730. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105730>
3. Tang JW, Bahnfleth WP, Bluysen PM, Buonanno G, Jimenez JL, Kurnitski J, et al. Dismantling myths on the airborne transmission of severe acute respiratory syndrome coronavirus (SARS-CoV-2). *J Hosp Infect.* 2021 Jan;(January).
4. Jones RM, Brosseau LM. Aerosol transmission of infectious disease. *J Occup Environ Med.* 2015;57(5):501–8.
5. Megahed NA, Ghoneim EM. Indoor Air Quality: Rethinking rules of building design strategies in post-pandemic architecture. *Environ Res* [Internet]. 2021;193(October):110471. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110471>
6. 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(1):1–16.
7. Domínguez-amarillo S, Fernández-agüera J, Cesteros-garcía S, González-lezcano RA. Bad air can also kill: Residential indoor air quality and pollutant exposure risk during the covid - 19 crisis. *Int J Environ Res Public Health.* 2020;17(19):1–34.
 8. Wolkoff P. Indoor air pollutants in office environments: Assessment of comfort, health, and performance. *Int J Hyg Environ Health.* 2013 Jul;216(4):371–94.
 9. Palmisani J, Gilio A Di, Cisternino E, Tutino M, de Gennaro G. Volatile Organic Compound (VOC) Emissions from a Personal Care Polymer-Based Item: Simulation of the Inhalation Exposure Scenario Indoors under Actual Conditions of Use. *Sustain* 2020, Vol 12, Page 2577. 2020 Mar;12(7):2577.
 10. Setti L, Passarini F, De Gennaro G, Barbieri P, Perrone MG, Borelli M, et al. Airborne transmission route of covid-19: Why 2 meters/6 feet of interpersonal distance could not be enough. *Int J Environ Res Public Health.* 2020;17(8).
 11. Shajahan A, Culp CH, Williamson B. 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.* 2019 Mar;29(2):161–76.
 12. Barbieri P, Zupin L, Licen S, Torboli V, Semeraro S, Cozzutto S, et al. Molecular detection of SARS-CoV-2 from indoor air samples in environmental monitoring needs adequate temporal coverage and infectivity assessment. *Environ Res.* 2021 Jul;198:111200.
 13. Scientific Brief: SARS-CoV-2 Transmission | CDC.
 14. How Coronavirus Spreads | CDC.

15. Augenbraun BL, Lasner ZD, Mitra D, Prabhu S, Raval S, Sawaoka H, et al. Assessment and mitigation of aerosol airborne SARS-CoV-2 transmission in laboratory and office environments. *J Occup Environ Hyg.* 2020;17(10):447–56.
16. Greenhalgh T, Jimenez JL, Prather KA, Tufekci Z, Fisman D, Schooley R. Ten scientific reasons in support of airborne transmission of SARS-CoV-2. *Lancet.* 2021;397(10285):1603–5.
17. Meyerowitz EA, Richterman A, Gandhi RT, Sax PE. Transmission of SARS-CoV-2: A Review of Viral, Host, and Environmental Factors. *Ann Intern Med.* 2021 Jan;174(1):69–79.
18. Morawska L, Allen J, Bahnfleth W, Bluyssen PM, Boerstra A, Buonanno G, et al. A paradigm shift to combat indoor respiratory infection. *Science (80-).* 2021 May;372(6543):689–91.
19. Noorimotlagh Z, Jaafarzadeh N, Martínez SS, Mirzaee SA. A systematic review of possible airborne transmission of the COVID-19 virus (SARS-CoV-2) in the indoor air environment. *Environ Res.* 2021 Feb;193:110612.
20. Lee JH, Rounds M, McGain F, Schofield R, Skidmore G, Wadlow I, et al. Effectiveness of portable air filtration on reducing indoor aerosol transmission: preclinical observational trials. *J Hosp Infect.* 2021;(xxxx).
21. Delikhooon M, Guzman MI, Nabizadeh R, Baghani AN. Modes of transmission of severe acute respiratory syndrome-coronavirus-2 (Sars-cov-2) and factors influencing on the airborne transmission: A review. *Int J Environ Res Public Health.* 2021;18(2):1–18.
22. Correia G, Rodrigues L, Gameiro da Silva M, Gonçalves T. Airborne route and bad use of ventilation systems as non-negligible factors in SARS-CoV-2 transmission. *Med Hypotheses.* 2020 Aug;141(January):109781.
23. Deol AK, Scarponi D, Beckwith P, Yates TA, Karat AS, Yan AWC, et al. Estimating ventilation rates in rooms with varying occupancy levels:

- Relevance for reducing transmission risk of airborne pathogens. *PLoS One*. 2021;16(6 June):1–12.
24. Palmisani J, Di Gilio A, Viana M, de Gennaro G, Ferro A. Indoor air quality evaluation in oncology units at two European hospitals: Low-cost sensors for TVOCs, PM2.5 and CO2 real-time monitoring. *Build Environ*. 2021;205(August):108237.
 25. Ecdc. Heating, ventilation and air-conditioning systems in the context of COVID-19: first update Changes to the current update. 2020;
 26. Laurent MR, Frans J. Monitors to improve indoor air carbon dioxide concentrations in the hospital: A randomized crossover trial. *Sci Total Environ*. 2021;806:151349.
 27. Rudnick SN, Milton DK. Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration. *Indoor Air*. 2003 Sep;13(3):237–45.
 28. Huang Q, Marzouk T, Cirligeanu R, Malmstrom H, Eliav E, Ren YF. Ventilation Assessment by Carbon Dioxide Levels in Dental Treatment Rooms. *J Dent Res*. 2021;100(8):810–6.
 29. Wood R, Morrow C, Ginsberg S, Piccoli E, Kalil D, Sassi A, et al. Quantification of Shared Air: A Social and Environmental Determinant of Airborne Disease Transmission. *PLoS One*. 2014;9(9):e106622.
 30. Richardson ET, Morrow CD, Kalil DB, Bekker LG, Wood R. Shared Air: A Renewed Focus on Ventilation for the Prevention of Tuberculosis Transmission. *PLoS One*. 2014 May;9(5):e96334.
 31. Harrichandra A, Ierardi AM, Pavilonis B. An estimation of airborne SARS-CoV-2 infection transmission risk in New York City nail salons. *Toxicol Ind Health*. 2020 Sep;36(9):634–43.
 32. Nembhard MD, Burton DJ, Cohen JM. Ventilation use in nonmedical settings during COVID-19: Cleaning protocol, maintenance, and recommendations.

- Toxicol Ind Health. 2020;36(9):644–53.
33. Hwang SH, Park WM. Indoor air concentrations of carbon dioxide (CO₂), nitrogen dioxide (NO₂), and ozone (O₃) in multiple healthcare facilities. *Environ Geochem Health*. 2020;42(5):1487–96.
 34. Lee HJ, Lee KH, Kim DK. Evaluation and comparison of the indoor air quality in different areas of the hospital. *Med (United States)*. 2020;99(52).
 35. Pereira M, Tribess A, Buonanno G, Stabile L, Scungio M, Baffo I. Particle and Carbon Dioxide Concentration Levels in a Surgical Room Conditioned with a Window/Wall Air-Conditioning System. *Int J Environ Res Public Health*. 2020 Feb;17(4):1180.
 36. Zaman SU, Yesmin M, Pavel MRS, Jeba F, Salam A. Indoor air quality indicators and toxicity potential at the hospitals' environment in Dhaka, Bangladesh. *Environ Sci Pollut Res*. 2021;28(28):37727–40.
 37. Tang H, Ding J, Lin Z. On-site measurement of indoor environment quality in a Chinese healthcare facility with a semi-closed hospital street. *Build Environ*. 2020 Apr;173:106637.
 38. Lidström A-K, Sund F, Albinsson B, Lindbäck J, Westman G. Work at inpatient care units is associated with an increased risk of SARS-CoV-2 infection; a cross-sectional study of 8679 healthcare workers in Sweden. *Ups J Med Sci*. 2020 Oct;125(4):305–10.
 39. Gerami P, Liszewski W. Risk assessment of outpatient dermatology practice in the setting of the COVID-19 pandemic. *J Am Acad Dermatol*. 2020 Nov;83(5):1538–9.
 40. Hara SA, Rossman TL, Johnson L, Hogan CJ, Sanchez W, Martin DP, et al. Evidence-based aerosol clearance times in a healthcare environment. *Infect Prev Pract*. 2021;3(4).
 41. Allen JG, Ibrahim AM. Indoor Air Changes and Potential Implications for SARS-CoV-2 Transmission. *JAMA*. 2021 May;325(20):2112–3.

42. PAHO. Recommendations for Heating, Ventilation, and Air Conditioning in Healthcare Facilities. 2020.
43. Sehulster L, Chinn RYW. Guidelines for environmental infection control in health-care facilities. Recommendations of CDC and the Healthcare Infection Control Practices Advisory Committee (HICPAC). *MMWR Recomm Rep*. 2003;52(RR-10):1–42.
44. Yang CT, Liao CJ, Liu JC, Den W, Chou YC, Tsai JJ. Construction and application of an intelligent air quality monitoring system for healthcare environment. *J Med Syst*. 2014;38(2).
45. Chang CL, Lee LL, Weng CH, Tsai CY. A project to improve psychiatric nursing station air quality. *J Nurs*. 2013;60(5):73–81.
46. Lu Y, Li Y, Zhou H, Lin J, Zheng Z, Xu H, et al. Affordable measures to monitor and alarm nosocomial SARS-CoV-2 infection due to poor ventilation. *Indoor Air*. 2021;31(6):1833–42.
47. de Caro F, Hirschmann TM, Verdonk P. Returning to orthopaedic business as usual after COVID-19: strategies and options. *Knee Surgery, Sport Traumatol Arthrosc*. 2020;28(6):1699–704.
48. De Smet R, Mellaerts B, Vandewinckele H, Lybeert P, Frans E, Ombelet S, et al. Frailty and Mortality in Hospitalized Older Adults With COVID-19: Retrospective Observational Study. *J Am Med Dir Assoc*. 2020 Jul;21(7):928–932.e1.
49. Spielmanns M, Pekacka-Egli A-M, Cecon M, Witassek F, Schoendorf S, Lutz D, et al. COVID-19 Outbreak During Inpatient Rehabilitation. *Am J Phys Med Rehabil*. 2021 Mar;100(3):203–8.
50. Belete ZW, Berihun G, Keleb A, Ademas A, Berhanui L, Abebe M, et al. Knowledge, attitude, and preventive practices towards COVID-19 and associated factors among adult hospital visitors in South Gondar Zone Hospitals, Northwest Ethiopia. *PLoS One*. 2021;16(5 May 2021):1–18.

51. Leonardi R, Bellinzoni P, Broglia L, Colombo R, De Marchi D, Falcone L, et al. Hospital care in Departments defined as COVID-free: A proposal for a safe hospitalization protecting healthcare professionals and patients not affected by COVID-19. *Arch Ital di Urol e Androl*. 2020 Apr;92(2):80–1.
52. Wargocki P, Da Silva NAF. Use of visual CO2 feedback as a retrofit solution for improving classroom air quality. *Indoor Air*. 2015;25(1):105–14.
53. Gonçalves-Pinho M, Mota P, Ribeiro J, Macedo S, Freitas A. The Impact of COVID-19 Pandemic on Psychiatric Emergency Department Visits – A Descriptive Study. *Psychiatr Q*. 2021 Jun;92(2):621.
54. Imai H, Furukawa TA. The risk perception against COVID-19 and outpatients' anxiety of visiting the clinic during COVID-19 pandemic. *Psychiatry Clin Neurosci*. 2021;75(6):208–9.
55. American Society of Heating, Refrigerating and A-CE. ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2019. Ventilation for acceptable indoor air quality. 2019.
56. Gammaitoni L, Nucci MC. Using a Mathematical Model to Evaluate the Efficacy of TB Control Measures. *Emerg Infect Dis*. 1997;3(3):335–42.
57. Moradpour Z, Hesam G, Helmi_Kohnehsahri M, Bokharaei-Salim F, Pouyakian M, Zendehtel R. Investigating the Ventilation System of an Intensive Care Unit in the COVID-19 Crisis: A Study in a Hospital of Tehran, Iran. *Tanaffos*. 2021;20(3):240–5.
58. Persily A, de Jonge L. Carbon dioxide generation rates for building occupants. *Indoor Air*. 2017;27(5):868–79.

12. Anexos

Tabla 11 Variables e información documentada

Variable	Definición	Unidad de medida	Escala de medición	Instrumento
Calidad del aire al interior del área	Concentraciones de partículas de CO ₂ al interior del área con resolución temporal de 1s o 2s	Partes por millón (ppm)	Razón	Monitor de concentración de CO ₂
Calidad del aire al interior del área no aceptable	Exposición a concentraciones mayores a 800 ppm de CO ₂ al interior de las áreas	Número de áreas	Razón	Monitor de concentración de CO ₂
Ocupación	Porcentaje de número de ocupantes. ⁽⁵⁵⁾) Ver Tabla 1	Porcentaje	Razón	Bitácora

Ventilación	Cálculo de cambios de aire por hora (ACH) del área usando el modelo de Batterman (2017)	Cambios de aire por hora (ACH)	Razón	Software para procesamiento de datos
Riesgo de transmisión de SARS-CoV-2	Cálculo del porcentaje de riesgo de transmisión de SARS-CoV-2 (I_{ω}) usando el modelo de Gammaitoni-Nucci ⁽⁵⁶⁾	Porcentaje	Intervalo	Software para procesamiento de datos
Identificador de área	Identificador único por cada espacio físico cerrado.	Un área es equivalente a una oficina, sala de juntas, sala de trabajo, residencia, sala de descanso, laboratorio de cómputo, consultorio, sala de terapia, cuarto de pacientes, gimnasio o tanque terapéutico.	Nominal	Bitácora

<p>Categoría de área</p>	<p>Categoría del área según la actividad que se realiza al interior, basada en recomendaciones de ocupación⁽⁵⁵⁾, ventilación⁽⁴⁴⁾ y nivel de riesgo de transmisión de SARS-CoV-2.⁽⁴¹⁾</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Oficinas: Salas de juntas y oficinas de personal de salud para 50 ocupantes/100m², 4 ACH y bajo riesgo de contagio de COVID-19 • Trabajo médico, aulas, residencia, salas de descanso y laboratorios de cómputo de personal de salud para 25 ocupantes/100m², 4 ACH y bajo riesgo de contagio de COVID-19 • Consultorios, cubículos para terapia, y cuartos de pacientes para 20 ocupantes/100m², 6 ACH y bajo riesgo de contagio de COVID-19 	<p>Nominal</p>	<p>Bitácora</p>
--------------------------	---	--	----------------	-----------------

		<ul style="list-style-type: none"> • Ejercicio sin emisión de aerosoles: terapia de pacientes para 7 ocupantes/100m², 6 ACH y bajo riesgo de contagio de COVID-19 • Ejercicio con emisión de aerosoles: terapia de pacientes para 7 ocupantes/100m², 6 ACH y alto riesgo de contagio de COVID-19 		
Grupo de área	Identificador alfanumérico único por grupo de áreas en función de su ubicación y factores compartidos con efecto sobre la ventilación	Identificador alfanumérico	Nominal	Bitácora

	(pasillos, salas de espera, cubos de iluminación y ventilación)			
Piso del área	Piso en el que se encuentra ubicada el área dentro del edificio.	Planta baja a piso 3	Ordinal	Bitácora
Fecha del registro	Día del registro	Días	Razón	Bitácora
Tiempo del registro	Tiempo de inicio y fin del registro	Hora y minuto	Razón	Bitácora
Sensor del registro	Identificador único por sensor	Alfanumérico	Nominal	Bitácora
Dimensiones del área	Largo, ancho y altura del área	Metros	Razón	Medidor de distancia Laser
Condición de ventilación	Estado de elementos que tienen un efecto sobre la	Puertas y/o ventanas abiertas/ cerradas	Nominal	Bitácora

	ventilación del área			
Ocupantes <11 años	Número de ocupantes del área menores de 11 años	Numero entero	Nominal	Bitácora
Ocupantes >11 años	Número de ocupantes del área mayores de 11 años	Número entero	Nominal	Bitácora
Nivel de actividad de <11 años	Tasa metabólica general para todos los ocupantes <11 años del área en función de categorías de actividad. ⁽⁵⁸⁾	<ul style="list-style-type: none"> • Tranquila: Recostado, tareas sentado (trabajo de oficina), de pie en silencio equivalente a 1.5 METS • Ligera: Tareas de pie con ligero esfuerzo, caminar lento (<3.2 km/h superficie plano), calistenia con esfuerzo ligero, trabajo de custodia ligero, equivalente a 3 METS 	Nominal	Bitácora

		<ul style="list-style-type: none"> • Moderada: Tareas de pie con esfuerzo moderado, caminar a ritmo moderado (4.5-5.1 km/h, superficie plana), calistenia moderada, equivalente a 3.8 METS • Ejercicio general: Ejercicio de gimnasio general, equivalente a 5 METS • Vigorosa: Calistenia con esfuerzo vigoroso, equivalente a 8 METS 		
Nivel de actividad de >11 años	Tasa metabólica general para todos los ocupantes > 11 años del área en función de	Mismas unidades que en <11 años.	Nominal	Bitácora

	categorias de actividad. ⁽⁵⁸⁾			
--	--	--	--	--

13. Lista de Tablas

Tabla 1 Recomendaciones de ocupación por el Instituto Nacional de Normalización Estadounidense y la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ANSI/ASHRAE) 62.1-2019	10
Tabla 2 Distribución por pisos y grupos de las áreas monitoreadas.	15
Tabla 3 Descripción y clasificación de las áreas por categorías de uso en base a las recomendaciones por entidades internacionales.	16
Tabla 4 Valores promedio de las 85 áreas evaluadas en el INR-LGII.	19
Tabla 5 Concentración de CO ₂ promedio registrada por grupo.	21
Tabla 6 Porcentaje del tiempo de exposición a concentraciones de CO ₂ >1000 ppm.	22
Tabla 7 Porcentaje para densidad de ocupación por grupo.	24
Tabla 8 Distribución de ventilación promedio por piso.	25
Tabla 9 Distribución de volumen promedio por piso	26
Tabla 10 Porcentaje de riesgo de transmisión por grupo ante 15 minutos de exposición	28
Tabla 11 Variables e información documentada	41

14. Lista de Figuras

Figura 1 Distribución de áreas por piso: planta baja, primer piso y tercer piso (de izquierda a derecha).	18
Figura 2 Análisis de la distribución de las concentraciones de CO ₂ , en la izquierda por grupos, a la derecha por categoría. Franja verde (deseable), amarilla (aceptable), roja (no deseable).	20
Figura 3 Distribución de las concentraciones de CO ₂ por pisos en la izquierda, a la derecha su tendencia por piso en base a regresión lineal. La línea punteada muestra el intervalo de confianza al 95% (IC95%).	20
Figura 4 Porcentaje del tiempo de exposición a concentraciones de CO ₂ >1000 ppm.	23
Figura 5 Densidad de ocupación por pisos (izquierda) y grupos (derecha). Zona verde (<100%), zona roja (>100%).....	25
Figura 6 Distribución de la ventilación en cambios de aire por hora (ACH) por pisos (izquierda) y su tendencia (derecha).	26
Figura 7 Distribución de volumen por pisos (izquierda) y categorías (derecha).....	27
Figura 8 Riesgo de áreas por grupos (izquierda) y categorías (derecha).....	28
Figura 9 Riesgo de transmisión en base a tiempo por grupos (Áreas de rehabilitación: Ped [Pediátrica], Ort [Ortopédica], Col [Columna], Car [Cardiorrespiratoria], Neu [Neurológica], Dis [Clínica de Distrofias])	29
Figura 10 Riesgo de transmisión en base a tiempo de exposición por piso.	29
Figura 11 Riesgo de transmisión por categorías en base a tiempo de exposición.....	30