

EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂) EN
ESPACIOS INTRAMURALES EN RELACIÓN CON LAS MEDIDAS DE BIOSEGURIDAD
DE LA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS, VILLAVICENCIO



IVONNE LUCÍA SERNA BONILLA



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2022

EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂) EN
ESPACIOS INTRAMURALES EN RELACIÓN CON LAS MEDIDAS DE BIOSEGURIDAD
DE LA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS, VILLAVICENCIO

IVONNE LUCÍA SERNA BONILLA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Ambiental

Director (a)

DIANA ESPERANZA GÓMEZ GÓMEZ

Administradora Ambiental

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2022

Autoridades Académicas

FRAY JOSÉ GABRIEL MESA ANGULO, O. P.

Rector General

FRAY EDUARDO GONZÁLEZ GIL, O. P.

Vicerrector Académico General

FRAY JOSÉ ANTONIO BALAGUERA CEPEDA, O.P

Rector Sede Villavicencio

FRAY RODRIGO GARCÍA JARA, O.P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

MSc. JULIETH ANDREA SIERRA TOBON

Secretaria de División Sede Villavicencio

MSc. WILLIAM PEÑARANDA ZÁRATE

Decano de la Faculta de Ingeniería Ambiental

Nota De Aceptación

MSc. WILLIAM PEÑARADA ZÁRATE

Decano Facultad de Ingeniería Ambiental

DIANA ESPERANZA GÓMEZ GÓMEZ

Director Trabajo de Grado

ALBERTO CORTES SANTOS

jurado

JORGE ALESSANDRI ROMERO NOVOA

jurado

Villavicencio, octubre, 2022.

Contenido

	Pág.
Resumen	10
Abstract.....	11
Introducción.....	12
Planteamiento del problema	14
Formulación del problema.	16
Objetivos.....	17
Objetivo General	17
Objetivos Específicos.....	17
Justificación	18
Alcance del proyecto	20
Antecedentes.....	21
Marco de Referencia.....	25
Marco Teórico.....	25
Marco Conceptual	27
Marco Legal	28
Metodología.....	30
Fase I. Recolección de datos	30
Dimensionamiento de las aulas	30
Medición directa mediante un sensor de CO ₂	31
Determinar el grado de precisión que tienen los modelos matemáticos	31
Fase II. Aplicación de los modelos matemáticos	32
Aplicar los modelos matemáticos ajustados.....	32
Análisis estadístico ANOVA.....	32
Determinar cuáles son las variables más sensibles.....	32
Fase III. Planteamiento de recomendaciones.	32
Establecer la tasa de renovación de aire	32
Determinar la exposición al CO ₂ de la comunidad tomasina.	33

Ajuste de los protocolos de bioseguridad.....	33
Resultados.....	34
Fase I. Recolección de datos	34
Dimensionamiento de las aulas	34
Medición directa mediante un sensor de CO ₂	35
Determinar el grado de precisión que tienen los modelos matemáticos.	39
Fase II. Aplicación de los modelos matemáticos	44
Aplicar los modelos matemáticos ajustados.....	44
Análisis estadístico ANOVA	45
Concentración de CO ₂ vs Área de apertura más pequeña (m2).....	46
Determinar cuáles son las variables más sensibles.....	50
Fase III. Planteamiento de recomendaciones.	50
Establecer la tasa de renovación de aire	51
Determinar la exposición al CO ₂ de la comunidad tomasina.	51
Ajustes al Protocolo de Bioseguridad.	51
Impacto social y humanístico	53
Conclusiones y recomendaciones	54
Conclusiones	54
Recomendaciones.....	55
Referencias bibliográficas	56
Anexos	63

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Marco Legal.....	28
Tabla 2. Dimensiones de las aulas de la Universidad Santo Tomás sede Aguas Claras ..	29
Tabla 3. Concentración de CO ₂ (ppm) en relación al aforo presente al momento de la medición para el edificio Santo Domingo de Guzmán.	34
Tabla 4. Concentración de CO ₂ (ppm) en relación al aforo presente al momento de la medición para el edificio Sol de Aquino.....	36
Tabla 5. Cálculo del área más pequeña por la que ingresa el aire al aula.....	39
Tabla 6. Resultados obtenidos en las aulas que se clasifican bajo ventilación natural en las que se midieron las concentraciones de CO ₂ con la sonda de infrarrojo no dispersivo.....	39
Tabla 7. Resultados obtenidos en las aulas que se clasifican bajo ventilación por aire acondicionado en las que se midieron las concentraciones de dióxido de carbono con la sonda de infrarrojo no dispersivo.....	40
Tabla 8. <i>Comparativa de estimaciones de ACH y dióxido de carbono según (Rodriguez et al L. , 2021)</i>	41
Tabla 9. Análisis de varianza ANOVA entre la concentración de CO ₂ Vs Área de apertura más pequeña (m ²).	41
Tabla 10. Análisis de F entre las variables de temperatura y concentración de dióxido de carbono vs el aforo de personas en las aulas divididas en cuatro grupos.	42
Tabla 11. Relación del aforo y la concentración de dióxido de carbono vs el volumen del aula monitoreada.....	44

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Ruta metodológica.....	30
Figura 2. Sensor de medición de CO ₂ por infrarrojo no dispersivo.....	35
Figura 3. Relación de regresión lineal R ² como método de comprobación.....	38
Figura 4. Ecuaciones entregadas por (Rodriguez et al L. , 2021) para la evaluación y monitoreo de dióxido de carbono en las aulas.	39
Figura 5. Ventilador presente en las aulas monitoreadas durante la toma de datos de dióxido de carbono.....	43
Figura 6. Correlación lineal entre el área de la ventilación y el volumen del aula con respecto a la concentración de CO ₂	47
Figura 7. Relación del conjunto de personas vs la concentración de CO ₂ en las aulas monitoreadas.	49
Figura 8. Relación de la temperatura vs la concentración de CO ₂ en las aulas monitoreadas.	49

Lista de Anexos

	Pág.
Anexo 1 Mapa de ubicación del lugar de estudio.....	63
Anexo 2 Árbol de problemas.....	64
Anexo 3 Grado de precisión por Error Absoluto Medio.	65

Resumen

La transmisión de enfermedades respiratorias contagiadas a través de la vía aérea son un tema en auge de investigación a causa de la reciente pandemia causada por el virus SARS-CoV-2, en consecuencia, su relación con la capacidad de dispersión de partículas suspendidas que contengan enfermedades respiratorias en recintos cerrados con ventilación natural, mecánica o sin ventilación alguna (Crespi & Ordóñez, 2022). A partir de lo anterior, se evaluó la concentración de dióxido de carbono CO₂ en espacios intramurales de la Universidad Santo Tomás Villavicencio sede Aguas Claras en las aulas de ambos edificios. El método a utilizar se dividió en tres fases, primero, la recolección de datos junto con un sensor de infrarrojo no dispersivo y el cálculo brindado por (Rodriguez et al L. , 2021), el cálculo del error absoluto medio para comprobar las concentraciones de CO₂ obtenidas con un error porcentual de 4,84%; segundo, la ejecución de un análisis de varianza ANOVA que reflejo la relación directa entre el área de apertura más pequeña respecto a la concentración de CO₂ con un $F= 3.884$ mientras que la temperatura tuvo una relación directa con el aforo con un $F = 3.180$, siendo la tasa de reaireación y la concentración de CO₂ las variables más sensibles; discutiendo la veracidad de los resultados encontrados por (González, 2022) se recomienda que la investigación se dirija a un análisis del cañón de viento urbano como medida externa y la comprensión de estos fenómenos con la ayuda de softwares tales como CDF y DesignBuilder

Palabras Clave: Monitoreo de CO₂, Ventilación, Aulas, Tasa de renovación de aire, Enfermedades respiratorias, Transmisión, Contagio.

Abstract

The transmission of respiratory diseases transmitted through the airway is a topic on the rise in research due to the recent pandemic caused by the SARS-CoV-2 virus, consequently, its relationship with the dispersion capacity of suspended particles containing respiratory diseases in closed spaces with natural, mechanical or no ventilation at all (Crespi & Ordóñez, 2022). Based on the above, the concentration of carbon dioxide CO₂ in intramural spaces of the Universidad Santo Tomás Villavicencio, Aguas Claras, in the classrooms of both buildings, was evaluated. The method to be used was divided into three phases, first, data collection together with a non-dispersive infrared sensor and the calculation provided by (Rodriguez et al L., 2021), the calculation of the mean absolute error to check the concentrations of CO₂ obtained with a percentage error of 4.84%; second, the execution of an ANOVA analysis of variance that reflects the direct relationship between the smallest opening area with respect to the CO₂ concentration with an F= 3.884 while the temperature had a direct relationship with the capacity with an F= 3.180, being the rate of re-aeration and the concentration of CO₂ the most sensitive variables; discussing the veracity of the results found by (González, 2022), it is recommended that the research be directed to an analysis of the urban wind canyon as an external measure and the understanding of these phenomena with the help of software such as CDF and DesignBuilder.

Key Word- CO₂ monitoring, Ventilation, Classrooms, Air renewal rate, Respiratory diseases, Transmission, Contagion.

Introducción

El confort ambiental en las edificaciones influye en la capacidad que tiene una serie de variables climatológicas de afectar o no la salud de los ocupantes de un recinto cerrado, desde esa premisa, la contaminación del aire se traslada hacia un enfoque puntual que desvía su mirada del punto de emisión hacia la calidad de aire que consumen un conjunto de personas en un sitio específico, que indirectamente, al generar polución y emisión de partículas a grandes distancias producen enfermedades respiratorias en plazos de inmisión variables (Quadri, 2001).

El movimiento del aire, la humedad y la temperatura son elementos de análisis al momento de evaluar el confort ambiental, siendo así, la ciudad de Villavicencio cuenta con un clima de pie de monte que conecta con la cordillera oriental, influyendo en bajos niveles de radiación, una temperatura promedio anual de 27°C sobre la llanura, una humedad relativa que varía entre el 66-88% y un viento que atraviesa de sur a norte la ciudad (Ballesteros, 2013).

Por tanto, para la presente investigación los elementos climatológicos y el concepto de confort ambiental van de la mano con la estimación de dióxido de carbono en el ambiente para el análisis de propagación de enfermedades virales contenidas en aerosoles, puesto que, como expresa Homero, 2013 la ventilación natural tiende a reducir las emisiones de dióxido de carbono que pueden contenerse en un recinto cerrado.

Teniendo en cuenta los datos secundarios entregados por la unidad de registro y control, la Universidad Santo Tomás Sede Villavicencio Campus Aguas Claras cuenta con una cantidad aproximada de 3800 estudiantes en proporciones variables semanalmente para el año 2022; su aglomeración es de cuidado al momento de evaluar la salud ambiental en los espacios intramurales donde llevan a cabo su proceso de aprendizaje profesional y desarrollan espacios de comunicación gracias a la experiencia obtenida en el proceso de transmisión y contagio del virus COVID-19.

La pandemia generada por el virus Coronavirus-2 (COVID-19) a nivel nacional ha contribuido con el estudio de metodologías para demostrar de manera asertiva si existe la probabilidad de contagio en un recinto cerrado con ventilación, esto con el fin de entender la emergencia de salud pública que se ha generado a nivel internacional y cómo se ha catalogado

como propagación masiva llegando a tomar medidas estrictas con el fin de mantener el orden público y sanitario (Müller, 2020).

Por otra parte, Peng & Jimenez a través de su investigación realizada durante el año 2021 soportan que la concentración de CO₂ está asociada como un indicador de la ventilación en interiores desde el siglo XIX; partiendo de este hecho, en la actualidad el CO₂ se convierte en un indicador de riesgo de transmisión de enfermedades respiratorias infecciosas por aerosoles, producto de la exhalación humana, la cual incide en el incremento de CO₂ en interiores (Peng & Jimenez, 2021).

Adicionalmente, no es suficiente demostrar que los aerosoles exhalados por el ser humano tienen la capacidad de transportar el virus COVID-19, por lo que se vuelve necesario medir la tasa de reaireación a partir de la velocidad del viento, el área abierta más pequeña y el volumen del espacio evaluado para evidenciar que una adecuada recirculación del aire disminuye la concentración de virus infecciosos en interiores (Vargas, 2020).

La presente investigación se dedicó al estudio de la incidencia de transmisión de una enfermedad viral causante de una pandemia iniciada en el año 2019; en consecuencia, se desarrolló una metodología asociada a la incidencia de contagio de enfermedades respiratorias infecciosas en espacios intramurales de instituciones educativas; esta metodología involucró la recolección de datos secundarios, tales como el volumen de los espacios a estudiar y presión atmosférica, y datos primarios como el aforo, la medición con sensor infrarrojo de la concentración de CO₂, la medición de temperatura, velocidad del viento y el área abierta más pequeña.

A partir de los datos recolectados se aplicó el modelo matemático para encontrar la tasa de renovación del aire y junto con los datos obtenidos de la concentración de CO₂ se logró determinar el nivel de ventilación; posteriormente, se comprobó por medio del análisis estadístico ANOVA cuáles son las variables más sensibles frente al riesgo de transmisión, para finalmente determinar las condiciones adecuadas para asegurar un nivel de ventilación ideal, con ello, buscar la disminución del riesgo de contagio de enfermedades respiratorias infecciosas.

Planteamiento del problema

Al inicio de la prehistoria el ser humano realizaba desplazamientos constantes de un lugar a otro debido a la falta de conocimiento acerca de métodos de construcción y agricultura; no obstante, este estilo de vida fue cambiando gracias a las nuevas tecnologías, dando paso así al asentamiento de comunidades; gracias a esto se empezaron a organizar sociedades donde los seres humanos convivían en un espacio más limitado en el cual las enfermedades se empezaban a propagar con mayor facilidad, ocasionando la transmisión de enfermedades virales infecciosas en diferentes zonas del mundo al grado de convertirse en pandemias, resaltando entre ellas la peste negra, la viruela y la gripe española (Huguet, 2020).

La pandemia más reciente se presentó durante el mes de diciembre del año 2019 en la ciudad de Wuhan, China, donde se evidenció una nueva enfermedad respiratoria, la cual en un par de semanas desató una emergencia sanitaria a nivel internacional. Es de resaltar que esta enfermedad se empezó a presentar como un brote respiratorio en personas que habían estado cerca o que habían visitado el mercado de Wuhan. El virus causante fue nombrado por el comité mundial de taxonomía viral como Coronavirus-2 del Síndrome respiratorio agudo severo (SARS-Cov-2) y semanas después por la Organización Mundial de la Salud fue declarado como enfermedad pandémica mundial (Rodriguez et al A. , 2020).

A nivel mundial, el COVID-19 ha terminado con la vida de alrededor de 4.587.674 personas de un total de 222.001.202 casos confirmados al mes de septiembre del año 2021; es decir, existe un porcentaje del 2,06% de letalidad en esta enfermedad (Center for Systems Science and Engineering (CSSE), 2021). En el contexto nacional, en Colombia el primer caso identificado se reportó en la ciudad de Bogotá D.C., el 6 de marzo del 2020. De acuerdo al Ministerio de Salud, en Colombia para el año 2021 se produjeron 4.921.410 casos confirmados de la enfermedad causada por SARS-Cov-2 de los cuales han perdido la vida 125.378 pacientes, teniendo una tasa de letalidad por casos confirmados a nivel nacional del 2,6%, siendo Colombia un país con una vulnerabilidad mayor al promedio mundial (Ministerio de Salud y Protección Social, 2021).

La pandemia dio paso a una cuarentena que ocasionó un cese en todas las actividades económicas y educativas, por ejemplo, se demostró la falta tecnologías de la información y

comunicación en el sector educativo a razón de las falencias del país al no proporcionar un acceso adecuado de las TIC's para todos los jóvenes, estudiantes y docentes, sin embargo, meses después gracias a los protocolos de bioseguridad se ha logrado el retorno a clases presenciales en entornos de educación. Es preciso tener en cuenta que deben existir condiciones mínimas de riesgos de contagio, por lo que se establece la necesidad de evaluar las condiciones de los espacios intramurales de las instituciones educativas. Con respecto a lo anterior, se realizaron mediciones de CO₂ la Universidad Santo Tomás, Villavicencio sede aguas claras para establecer el nivel de ventilación en las aulas como medida complementaria a los protocolos de bioseguridad ya establecidos.

Actualmente, la relevancia por tener higiene en el aire es un punto vital que converge en las consideraciones entregadas por distintos autores acerca del potencial de transmisión de virus a través de la vía oral. A parte del virus COVID-19 existen otros virus que pueden afectar al ser humano tal como la influenza, rinovirus, rubeola, varicela, sarampión y variaciones de RNA del coronavirus, lo cual deja en objeto de investigación la profundización en temas de desarrollo para el análisis de concentración de CO₂ en espacios cerrados como un factor asociado a la incidencia de transmisión de los diferentes virus (Crespi & Ordóñez, 2022).

Finalmente, el énfasis acerca del potencial de transmisión del virus SARS-Cov-2 a través de aerosoles en espacios cerrados se ha convertido en un tema de análisis que involucra distintas variables y abre espacios de discusión desde la perspectiva arquitectónica, sanitaria y urbana (Rodríguez et al L. , 2021). En el caso particular de la Universidad Santo Tomás, Villavicencio sede aguas claras se implementaron protocolos de bioseguridad establecidos por la OMS aplicando el distanciamiento social y el uso de tapabocas, asumiendo con esto la disminución del riesgo de transmisión sin cuantificar la tasa de reaireación en las aulas y la concentración del CO₂ en espacios intramurales.

Entonces, de acuerdo a la tasa de renovación del aire y la concentración de CO₂ obtenida durante la investigación se realizaron una serie de recomendaciones sobre los protocolos de bioseguridad implementados por la Universidad frente a futuras enfermedades respiratorias infecciosas que afecten el proceso educativo en las aulas de forma presencial.

Formulación del problema.

Con base en lo anterior, ¿Qué medidas relacionadas con la ventilación a partir del estudio de la concentración de CO₂ debería tener en cuenta la Universidad Santo Tomás, Villavicencio sede aguas claras para disminuir la incidencia de contagio del COVID-19 y enfermedades transmitidas por aerosoles en espacios intramurales?

Objetivos

Objetivo General

Evaluar la concentración de CO₂ en espacios intramurales para determinar el nivel de ventilación en las aulas y la incidencia de transmisión de enfermedades respiratorias por aerosoles, estableciendo recomendaciones al protocolo de Bioseguridad implementado por la Universidad Santo Tomás, Villavicencio sede Aguas Claras.

Objetivos Específicos.

- Determinar los niveles de exposición de CO₂ en la comunidad presente en las aulas de la Universidad Santo Tomás, Villavicencio sede Aguas Claras.
- Evaluar la tasa de renovación del aire y el nivel de ventilación en las aulas objeto de investigación con el fin de encontrar la incidencia de transmisión de enfermedades respiratorias por aerosoles.
- Sugerir las recomendaciones para el reajuste de los protocolos de Bioseguridad establecidos antes del estudio por la Universidad con relación al nivel de ventilación de las aulas.

Justificación

El CO₂, según el estándar ASHRAE se considera que es un elemento patrón para identificar si se necesita de un sistema de ventilación mecánico, considerando que el gas desplaza el aire disponible por ventilación natural y en una proporción por encima del límite afectaría la tasa de reaireación del recinto (Hussin et al, 2017). Si desde un principio la acumulación de este gas producto de la respiración humana no se disipa con la ventilación del lugar se correrá el riesgo de contraer el virus COVID-19, por lo que se requiere modelar y asegurar que el sistema de ventilación sea eficiente (Li & Tang, 2021).

Es así como los estudios realizados por diversos grupos de investigadores relacionan modelos para calcular la tasa de reaireación en comparación a la concentración del CO₂ presente y el proceso de aerosolización, teniendo en cuenta procesos de filtración, deposición o purificación del aire a través de sistemas de limpieza en espacios cerrados con el fin de volver a una normalidad desplazada a causa de la pandemia (Jones et al, 2020).

Desde el punto de vista colombiano, el Ministerio de Salud adoptó medidas para instituciones educativas a través de la Res 666 de 2020 y Res 1721 de 2020 con el fin de proteger la salud pública y guardar cuarentena como parte de los objetivos previa vacunación nacional, donde se concilió un trabajo remoto a través del uso de recursos pedagógicos para trasladar las instalaciones hacia un proceso de implementación de medidas propias de acuerdo a lo dictado bajo estas resoluciones (Ministerio de Salud y Protección Social, 2021).

En concordancia con lo anterior, se debe expresar que los virus respiratorios son una de las principales causas de enfermedad en seres humanos, razón que deriva en infecciones al sistema pulmonar y disminución de la capacidad corporal para controlar su equilibrio; a nivel mundial la referencia de estas enfermedades dependen de la zona de estudio y el periodo estacional a nivel geográfico y la edad del paciente a nivel hospitalario, respaldando la teoría de que más allá de tener un control sobre eventos como el COVID-19 exista una reglamentación oportuna para otro tipo de enfermedades que no tenga un impacto epidemiológico a nivel de pandemia pero que si puedan afectar a una población específica ubicada en un espacio cerrado y sin ventilación bajo el grado de infectividad que les caracterice (Callejas et al, 2022).

Elementos investigativos acerca de la monitorización de la transmisión de enfermedades infecciosas en interiores se ha vuelto una tendencia propositiva para inspeccionar la reglamentación y objetividad del estudio de la calidad del aire en interiores a través de la medición de CO₂ como columna vertebral de sustentación acerca de un posible riesgo a contagio de enfermedades por vía aérea así como la implementación de estrategias para el control, purificación o filtración de las partículas suspendidas en caso de no contener una ventilación adecuada (Pastor, 2022).

La finalidad del proyecto abarcó dos componentes importantes de acuerdo a los objetivos de desarrollo sostenible, en primer lugar, garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades, razón que nace de dos particularidades; estudios como los (Díaz & Castro, 2020) aseguran el aumento de ansiedad en estudiantes universitarios sin abordar un proceso de confinamiento y cómo evoluciona a niveles avanzados después de que se sometieron a la virtualidad, generando cuadros de depresión en la comunidad educativa (Jimenez et al, 2020). En segundo lugar, garantizar una educación inclusiva y equitativa de calidad y promover oportunidades de aprendizaje permanente para todos, puesto que se quiere demostrar que, con los espacios adecuados, una tasa de aireación aceptable y la adopción de medidas de seguridad es posible retornar a la presencialidad de manera segura, desplazando los casos de depresión y ansiedad, además de asegurar una educación inclusiva en un país donde la conectividad al año 2020 tiene una brecha bastante amplia para las zonas rurales (Cervera, 2021).

Alcance del proyecto

El presente estudio se desarrolló en la Universidad Santo Tomás, Villavicencio sede Aguas Claras, la cual está ubicada en el departamento del Meta, en la ciudad de Villavicencio más específicamente en la carrera 22 con calle 1ª – Vía Puerto López (véase Anexo 1).

Se determinó la incidencia de contagio de la comunidad tomasina en el marco de las clases con alternancia, para lo cual se realizaron mediciones de CO₂ en espacios intramurales (aulas) donde los estudiantes se encontraban realizando sus actividades; la investigación se llevó a cabo durante 4 meses donde se observaron, analizaron y se recopilaron datos para el planteamiento de las recomendaciones en lo referente al reajuste de los protocolos de bioseguridad, haciendo énfasis en que el presente estudio es equivalente a evaluar el nivel de ventilación de las aulas, de acuerdo a la tasa de reaireación y la concentración de CO₂, generando una discusión acerca de las variables que afectan el nivel de ventilación y la relación de esta en cuanto a la vía de transmisión de enfermedades similares.

Es de resaltar que los modelos matemáticos y la metodología usada se basó en la *Guía Para La Evaluación De La Ventilación Y El Monitoreo De CO₂ En El Marco Del Retorno Escolar En Modalidad De Alternancia En Colombia* desarrollada por el Nodo de Salud Ambiental y Ocupacional (SAO) Colombia y publicada el 16 de junio del año 2021.

Antecedentes

El ámbito de estudio universitario supone que existen espacios cerrados y abiertos como lo indica la problemática del proyecto, varios autores proponen una relación directa entre el rol de la concentración de CO₂ y la calidad de la salud de las personas que se encuentran en un recinto; además de relacionarlo con la influencia sobre los sistemas de ventilación, sean naturales o mecánicos, que se encuentran en cada aula, laboratorio, sala o biblioteca, según la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE) (Simanic et al, 2019).

La relación propuesta por Simanic et al., 2019, se basa en la capacidad de evaluar la calidad del aire enfocándose en las concentraciones de CO₂, expresando que los niveles de CO₂ al sobrepasar los 800 ppm durante un tiempo determinado afectan la salud humana, bajo la premisa de evaluar escenarios con diferentes tipos de ventilación para no sobrepasar el límite.

Hasta al año en el que la pandemia producto del COVID-19 empezó a manifestarse existían diferentes maneras de medir la concentración de CO₂ en espacios cerrados, sea a través de multisensores con una toma de datos cada 10 minutos, el cual reflejaría la concentración en ppm del contaminante o ecuaciones de eficiencia para la recirculación del aire en periodos de tiempo en estructuras con dimensiones adecuadas (Jones et al, 2020).

Posteriormente, gracias a los esfuerzos de (Van Doremalen et al, 2020) para el año 2020 ya se tenía claro que la duración del virus dependía desde el momento que se emite del paciente contagiado hacia una superficie de contacto y se estabilizaba en el aire a través de aerosoles; la peligrosa relación configuraba que el confinamiento preventivo sería la mejor opción para evitar un mayor contagio en espacios cerrados con aglomeraciones.

Teniendo en cuenta lo anterior, la exposición en aulas con una ventilación deficiente, apoyada por el método de cálculo de la concentración de CO₂ en el aire (PCA) sería equivalente en proporción a la incidencia de ser contagiado por el virus, puesto que, cómo menciona (Ortega & López, 2020) “el COVID-19 es un contaminante biológico medioambiental del aire, que se concentra y deposita durante horas en espacios cerrados”, para este punto, los aerosoles ya serían

entendidos como el medio de transporte del virus que permitía su concentración al alojarse dentro de las partículas y depositarse de acuerdo al viaje de estas (Azimi et al, 2020).

Así mismo se han realizado estimaciones en diferentes partes del mundo para generar estrategias de control bajo métodos empíricos de casos relacionados con el virus y coeficientes de infiltración, deposición, ventilación, filtración y purificación, en caso de que se presentara un rebrote del virus con el fin de controlar la epidemia dentro de una institución académica y minimizar los riesgos de impacto, incrementando la tasa de ventilación o usando purificadores de aire en las escuelas (Azimi et al, 2020).

Consecuentemente, los esfuerzos se centraron en demostrar cómo los aerosoles podían transportarse desde una persona contagiada hasta otra susceptible, investigación que va más allá de lo descrito anteriormente donde se evaluaron los niveles de inhalación de CO₂ durante la realización de actividades ubicadas bajo diferentes categorías en un modelo numérico, que relaciona el diferencial de CO₂ necesario para que aumente el riesgo de contagio en un espacio cerrado (Peng & Jimenez, 2021).

Durante el año 2012, diferentes estudios establecieron que el 97% de las partículas que se encuentran contenidas en el estornudo de una persona infectada pueden llegar a medir entre 0,1 y 1,0 μm ; en el caso específico de la epidemia producida por la influenza A (H1N1) el diámetro del virus estaba comprendido entre 0,08 y 0,16 μm por lo que se demostró que estas partículas podían formar aerosoles quedando suspendidas en el aire representando una transmisión viral entre personas (Matos et al, 2020).

Por otra parte, se realizaron estudios para mitigar el medio de transporte del virus COVID-19 calculando los espacios y equipamientos de las salas de clase, además de los elementos de comunicación utilizados entre estudiantes, dando pautas para limitar la entrada de estudiantes y no solamente evaluando la dinámica de la concentración de CO₂ en las aulas, reduciendo así la aerolosolización en tiempo real (Zivelonghi & Lai, 2021).

Actualmente, se han creado diversos estudios en Latinoamérica en el que se reúnen esfuerzos para identificar las variables de interés al momento de relacionar las enfermedades transmitidas por aerosoles con el área destinada a la ventilación y la concentración de CO₂ al

transcurrir las horas, identificando que con una ventana de aproximadamente 50cm se asegura una tasa de renovación del aire segura para la presencia de la población estudiantil con bajo riesgo de contagio (Valderas Castilla, 2022).

En el periodo 2021-2022 fueron efectos de estudio principalmente la ventilación natural y la concentración de CO₂ como los ejes temáticos principales para evaluar espacios intramurales especialmente de instituciones educativas en España, Ecuador y Colombia principalmente, del cual se expresan como común denominador entender la ventilación como una base esencial para comprender la dispersión del CO₂ y así mismo la dispersión de las enfermedades por transmisión aérea.

En el caso de Romero, A et al 2021 se lleva a cabo un diagnóstico que amplía la visión de cómo gestionar y cuantificar de forma segura los estados al interior de las aulas a través del cálculo de renovación del aire seguida del aforo máximo permitido y el efecto de intervalos de descanso en un espacio de mayor área y volumen que los salones de la Universidad Santo Tomás, analizando las corrientes de ventilación natural por medio del software CFD para la medición de la dirección y velocidad del viento a través del aula; se concluye que necesita una medición experimental que arroje un dato de CO₂ en el instante y que vincule el aforo dentro del modelo matemático (Romero et al, 2021).

También se analizaron las condiciones ambientales desde la problemática por el espacio y su relación con el contagio por vía aérea teniendo en cuenta el dióxido de carbono, la humedad relativa y la temperatura interior y exterior acompañado de una encuesta cualitativa acerca de la sensación de confort térmico a estudiantes encontrados en el aforo evaluado. Se determinó que los periodos de concentración de dióxido de carbono pueden tender al ascenso, pero disminuyen rápidamente en poco tiempo, siendo su agente de cambio la salida y entrada de personas y las zonas de apertura que tiene la estructura con un régimen de cambio de 11 minutos aproximadamente (González, 2022)

En el caso de Colombia, un estudio realizado en Bogotá acerca del sistema de ventilación y purificación del aire para optimizar el confort ambiental se hizo presente en el año 2019 bajo la problemática del incremento de material particulado en la capital, lo cual en conjunto con factores

socioeconómicos incide en la capacidad de sostener una educación de calidad en relación con las condiciones ambientales que se presentan externamente y la sensación de confort térmico de los estudiantes de instituciones educativas públicas de bajos recursos (Beltrán, 2019).

Finalmente, a nivel nacional no se han realizado muchos estudios que contengan una base de datos con la cual identificar el riesgo susceptible a contraer el virus en aulas educativas, sin embargo, esfuerzos realizados por Rodríguez et al. en el año 2021 entregaron una guía práctica para la evaluación de la ventilación y el monitoreo de CO₂ en el marco del retorno escolar, con el cual, se busca evaluar los niveles de ventilación en función del CO₂ y relacionarlo con la incidencia de contagio probable de COVID-19 en aulas de cualquier institución educativa (Rodríguez et al L., 2021).

Marco de Referencia

Marco Teórico.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) emplea el término emergencia de salud pública de interés internacional (PHEIC) cuando una enfermedad hace presencia en más de un país, generándose así una propagación masiva para lo cual es necesario establecer una estrategia coordinada internacionalmente con el fin de controlar la enfermedad (Müller, 2020). Partiendo de esto, el 11 de marzo de 2020 el presidente de la OMS determina que la enfermedad causada por el SARS-CoV-2 puede caracterizarse como una pandemia, para lo cual, se establece que determinadas medidas como el confinamiento, el uso de tapabocas, el lavado de manos y el distanciamiento social son relevantes para minimizar el riesgo de contagio.

La salud ambiental en relación al concepto de bienestar del ser humano establece una vía de análisis y solución a la generación de pandemias, dado que, al limitar a la población a sustancias nocivas para la salud se reduce el grado de vulnerabilidad frente a enfermedades pandémicas; sin embargo, lograr este objetivo supone la reducción en los impactos ambientales globales, además, muchas de las condiciones preexistentes asociadas a enfermedades crónicas cardiovasculares y respiratorias son producto de la exposición a aerosoles que contienen sustancias nocivas para el ser humano (OCDE, 2020).

La contaminación atmosférica representa una gran cantidad de decesos prematuros al año y desarrolla gran cantidad de trastornos en la salud del individuo y el aumento de enfermedades degenerativas, siendo necesario que exista una buena calidad del aire para que haya un efecto positivo en cuanto a la capacidad del organismo de defenderse frente a enfermedades respiratorias infecciosas como el COVID-19 y gozar de una mayor calidad de vida; aerosoles como el material particulado PM 2.5 se ha encargado de llevar a una tasa de 4,2 millones de muertes por año, lo cual induce a la idea principal de que existe una relación entre el riesgo de contagio al estar presente en un sitio con alta contaminación atmosférica (Wu et al, 2020).

A medida que se va investigando más acerca del virus se empiezan a establecer nuevas teorías como las que se desarrollan en el marco de la guía metodológica propuesta por Rodriguez et al., 2021 donde se busca evaluar la ventilación en las aulas de clase para la prevención de la

transmisión del virus COVID-19; lo anterior en virtud de que se conoce que el retorno a entornos educativos involucra el uso de espacios intramurales con baja tasa de reaireación generando así un alto riesgo de transmisión del virus SARS-CoV-2 a través de aerosoles por vía aérea debido a que el virus es exhalado por las personas contagiadas y este queda suspendido en el aire y puede ser transportado a una distancia mayor de 2 metros dentro de los espacios cerrados (Peng & Jimenez, 2021). Por ello, es necesario contar con adecuadas condiciones de ventilación las cuales son evaluadas y monitoreadas mediante la concentración de dióxido de carbono (CO₂); en tal sentido, se considera al CO₂ como un indicador de la calidad de la ventilación ya que a mayor concentración de CO₂ exhalado por las personas menor será la calidad de la ventilación por lo tanto implicará una mayor exposición al virus (Jones et al, 2020).

Es de resaltar que las mediciones de CO₂ se pueden realizar mediante dos métodos diferentes donde uno involucra el uso de un sensor de CO₂ con tecnología de infrarrojo no dispersivo y el otro consiste en la estimación de la concentración mediante modelos matemáticos propuestos en la Guía Para La Evaluación De La Ventilación Y El Monitoreo De CO₂ En El Marco Del Retorno Escolar En Modalidad De Alternancia En Colombia.

Adicional a esto, el ministerio de educación durante el año 2020 lanzó un artículo titulado Lineamientos Para La Prestación Del Servicio De Educación En Casa Y En Presencialidad Bajo El Esquema De Alternancia Y La Implementación De Prácticas De Bioseguridad En La Comunidad Educativa en el cual se establecen orientaciones relacionadas con la salud y la gestión pedagógica para el retorno gradual de la comunidad a instituciones educativas bajo la modalidad de alternancia proponiendo la adopción de protocolos de bioseguridad y medidas sanitarias (MinEducación, 2020).

Continuando con lo anterior, el enfoque se vuelve un conjunto ligado a la ventilación y mejora de espacios públicos dónde se presenta un aforo de personas dada una actividad académica o social, desde esa perspectiva, se demandan actuaciones de mejora para tener un mayor control en las pautas de renovación del aire en los sistemas de ventilación a través de la creación de guías de buenas prácticas de ventilación y la conformación de inspecciones para evaluar estos cambios en la concentración del dióxido de carbono con relación a la tasa de reaireación (Álvarez M. , 2022).

En concordancia, el estudio realizado por Cedeño et al, 2022 afirma que la calidad del aire se torna en un valor decisivo para el rendimiento de los ocupantes de espacios interiores, favoreciendo o empeorando el confort térmico y alzando una alarma acerca de la necesidad de ventilación natural o equipos que colaboren con la ventilación mecánica para la dispersión de dióxido de carbono en el aula (Cedeño et al, 2022).

Finalmente, el estudio realizado por García 2022 cuestiona la necesidad de tener una metodología adecuada al momento de crear edificios, asegurando así una ventilación natural estratégica, reduciendo los índices de contagio y permitiendo que la ventilación natural se manifieste de manera más pronunciada ante la imposibilidad económica de costear instrumentos de ventilación mecánica en las aulas o lugares de estudio de este tipo de variables, las cuales son identificadas a través de programas como CDF y DesignBuilder, softwares que relacionan la calidad del aire con espacios cerrados y proporcionan al igual que en otros estudios un entendimiento en 3D de lo que sucede en las aulas (García, 2022).

Marco Conceptual

Teniendo en cuenta un panorama general, abordar el virus COVID-19 desde el ámbito educativo plantea un análisis riguroso, desde un síntoma en el cual todos los actores del sector educativo sufrieron un cambio en su modus operandi, generando retos para manejar y priorizar el regreso a la presencialidad por encima de la transmisión del virus (Li et al, 2020); razón por la cual se empezaron a implementar los protocolos de bioseguridad los cuales refieren a aquellos principios, técnicas y prácticas que en conjunto proporcionan la capacidad de evitar la exposición involuntaria al COVID-19 (Lay, 2018); dicho esto, evaluar medidas como la ventilación es un factor determinante para asegurar una baja concentración de material particulado en espacios intramurales resaltando que la ventilación es la renovación del aire en un recinto cerrado gracias al entorno exterior, valiéndose de una abertura de ingreso/salida del aire (Gasteiz, 2021).

Por otra parte, las personas al respirar y hablar emiten aerosoles los cuales son considerados como una mezcla de compuestos microscópicos que se presentan en estado líquido o sólido y se encuentran suspendidos en el aire, dada su complejidad por los fenómenos de flujo del viento su origen es variable, sin embargo, varían en tamaño y composición los cuales determinan su

comportamiento y permanencia en la atmósfera (Rodriguez et al A. , 2020); partiendo de esto, una persona con una infección respiratoria puede emitir aerosoles con patógenos provocando así que el virus quede suspendido en el aire (Vargas et al, 2020); de tal modo que si existe una adecuada ventilación, el virus no quedará concentrado en un mismo espacio sino que este circulará y esto garantizará un bajo riesgo de contagio y de este modo sería posible tener una adecuada higiene industrial la cual responde a la acción de identificar riesgos por exposición a contaminantes en personal para la planificación correcta de acciones para evitar amenazas a la salud en un ambiente de trabajo, la protección a la salud es imprescindible al momento de asegurar una zona de trabajo, dado que trae consecuencias de bienestar y salud de las personas generando procedimientos de emergencia. Su evaluación se remite a técnicas de muestreo en las zonas de estudio y su interpretación es el coeficiente de variación que se haya obtenido, entregando resultados y análisis acerca de la situación en la que se encuentra el personal (Álvarez & Ulloa, 2022).

Marco Legal

Tabla 1.

Marco Legal.

Norma	Titulo	Aplicación de la norma
Constitución Política de Colombia 1991	Carta Magna de la República de Colombia	Artículo 49. La atención de la salud y el saneamiento ambiental son servicios públicos a cargo del Estado. Artículo 79. Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo.
Resolución 1238 de 2022	Por medio de la cual se dictan medidas para prevención, promoción y conservación de la salud con ocasión de infecciones respiratorias, incluidas las originadas por la COVID-19	Art 8. Adecuada ventilación. Se deben mantener puertas y ventanas abiertas para lograr un intercambio de aire natural, e interactuar, en lo posible en lugares al aire libre. Evitar que haya grupos de personas en lugares de baja ventilación

Tabla 1.*Continuación.*

Resolución 666 de 2020	Por medio de la cual se adopta el protocolo general de bioseguridad para mitigar, controlar y realizar el adecuado manejo de la pandemia Coronavirus COVID-19.	Artículo 1. Adoptar el protocolo general de bioseguridad para todas las actividades económicas, sociales y sectores de la administración pública. Artículo 4. Vigilancia y cumplimiento de protocolos están a cargo de la secretaria municipal o distrital quienes regularan el protocolo de bioseguridad de empresas y empleadores
Resolución 1721 de 2020	Por medio de la cual se adopta el protocolo de bioseguridad para el manejo y control del riesgo del Coronavirus COVID-19 en instituciones educativas, instituciones de educación superior y las instituciones de educación para el trabajo y desarrollo humano.	Art. 1. Adoptar el protocolo de bioseguridad para el manejo y control del riesgo del Coronavirus COVID-19 en instituciones educativas, instituciones de educación superior y las instituciones de educación para el trabajo y desarrollo humano en el marco del proceso de retorno gradual, progresivo y seguro a la prestación del servicio educativo en presencialidad bajo el esquema de alternancia.
Resolución 2254 de 2017	Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones.	Art. 8. Monitoreo y seguimiento de la calidad del aire por parte de proyectos, obras o actividades. Se realiza como insumo para la elaboración de estudios de impacto ambiental en el marco de licenciamiento ambiental o que no sean objeto de licenciamiento ambiental y generan impactos negativos en la calidad del aire.
Circular Externa 026 de 2021	Apertura de establecimientos educativos.	Adoptar las medidas para garantizar el retorno gradual, progresivo y seguro en instituciones educativas, a partir del esquema de alternancia.

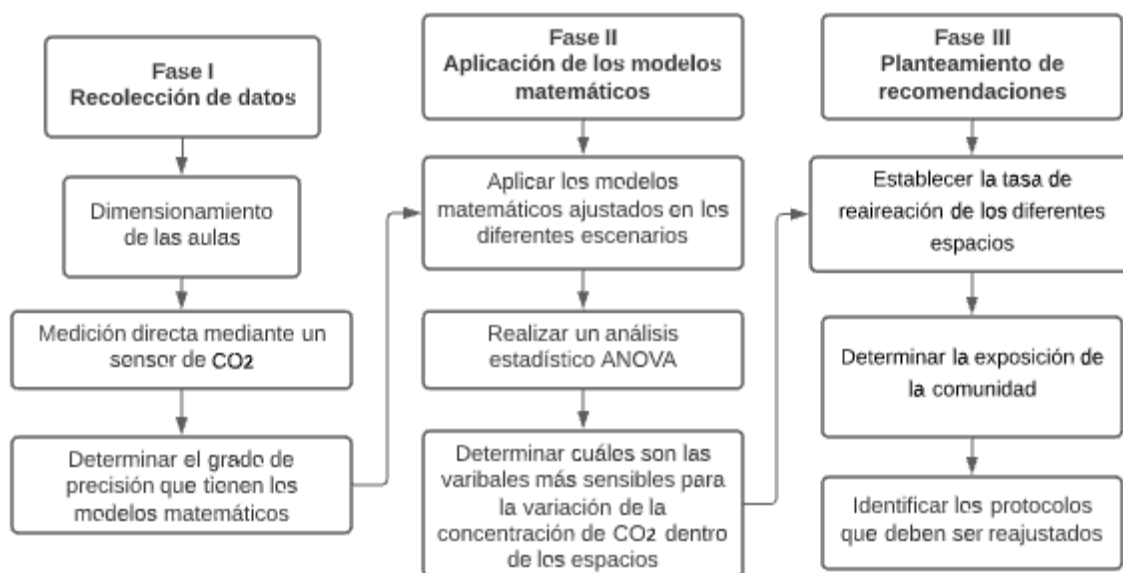
Nota. La siguiente tabla es de autoría propia, cuenta con las normas relacionadas a la emisión de contaminantes, la adecuada ventilación en relación a enfermedades respiratorias agudas y directrices para el control del COVID-19.

Metodología.

La metodología de esta investigación es de tipo exploratoria-correlacional ya que tiene como finalidad estudiar y hacer revisión de algunas teorías propuestas en un tema poco estudiado como lo es el caso del análisis de la incidencia de contagio del COVID-19 en la comunidad educativa en la Universidad Santo Tomás, Villavicencio sede aguas claras, además encontrar las variables que actualmente se relacionan con el estudio de transmisión de enfermedades respiratorias causadas por microorganismos y virus encontrados en aerosoles (Sampieri, 2018). La ruta metodológica del estudio se encuentra dividida en tres fases diferentes las cuales se presentan a continuación en la Figura 1.

Figura 1.

Ruta metodológica.



Fase I. Recolección de datos

Dimensionamiento de las aulas

La determinación del volumen de los espacios es relevante para estimar si existe una adecuada ventilación del espacio a partir del valor de la tasa de reaireación, además este dato permite establecer el aforo adecuado para cada espacio de acuerdo a los protocolos de bioseguridad.

Para el dimensionamiento se realizó una búsqueda de información secundaria en el departamento de Planta Física de la sede con el fin de obtener las dimensiones de todas las aulas de la Universidad Santo Tomás, Villavicencio sede Aguas Claras. Posterior a la recopilación de la información secundaria, se corroboraron los datos proporcionados seleccionando espacios aleatoriamente en los cuales se realizaron las mediciones correspondientes (largo, alto, ancho) con la ayuda de un decámetro para confirmar que las medidas suministradas son las mismas que las del espacio real.

Medición directa mediante un sensor de CO₂

Las mediciones directas de CO₂ determinarán las concentraciones de CO₂ del espacio durante el tiempo medido, con el fin de evaluar si el CO₂ que las personas exhalan está siendo recirculado o se está concentrando dentro del recinto; para la medición de la concentración de CO₂ se utilizó un sensor con infrarrojo no dispersivo, además, estas mediciones se realizaron desde el centro del espacio cada 10 minutos durante un periodo de 1.5 horas sin previo conocimiento de las condiciones iniciales del aula, durante la medición se observaron diferentes variables como el aforo, apertura de ventanas, temperatura dentro del espacio y el encendido del aire acondicionado hasta terminar el muestreo con el sensor, igualmente, no se tuvieron en cuenta condiciones adicionales como la altura sobre el nivel del suelo ni la hora de la medición.

Determinar el grado de precisión que tienen los modelos matemáticos

Si bien es cierto la guía proporciona determinados modelos matemáticos para estimar la concentración de CO₂ de manera teórica, sin embargo, se realiza una suposición afirmando que estos modelos están diseñados para ser aplicados en lugares con diferentes condiciones a las de Villavicencio; por lo que es necesario determinar el grado de precisión que tienen de acuerdo a las condiciones meteorológicas que se presentan en esta ciudad; para ello es necesario conocer la tasa de renovación de aire, por consiguiente, se tuvo en cuenta el modelo matemático propuesto en *Natural Ventilation for Infection Control in Health-Care Settings* (Atkinson et al, 2009).

A partir de los datos recolectados en las actividades anteriores se aplicaron los modelos matemáticos para hallar la concentración de CO₂ de manera teórica y a partir de esto se determinó el grado de precisión mediante la metodología del error absoluto medio el cual consistió en comparar dos conjuntos de datos presentes en el estudio partiendo del valor del error que se presenta

entre los datos observados y los datos predichos (Freund & Simon, 1994). Finalmente, partiendo del error absoluto medio se determinó que no era necesario llevar a cabo una calibración del modelo matemático.

Fase II. Aplicación de los modelos matemáticos

Aplicar los modelos matemáticos ajustados

Con la determinación del grado de precisión de los modelos matemáticos por la metodología del error absoluto medio en la fase anterior, la aplicación de los modelos reajustados no fue necesaria.

Análisis estadístico ANOVA

El Análisis de Varianza ANOVA es un procedimiento estadístico el cual tiene como finalidad realizar la comparación entre el promedio de los datos de diferentes grupos establecidos (Freund & Simon, 1994): en este caso, se contrastó la media de la concentración de CO₂ con respecto al volumen, la temperatura y la cantidad de personas por intervalos en los diferentes espacios para lo cual se empleó el software IBM SPSS Statistics con el fin de evaluar el comportamiento de los datos obtenidos y de tal modo a través del nivel de significancia (5%) se aprobó una de las hipótesis formuladas.

Determinar cuáles son las variables más sensibles

Por medio de esta última actividad de la fase II se establecieron qué variables aplicadas en el modelo matemático influyen directamente en la concentración de CO₂ en los espacios intramurales teniendo en cuenta los valores obtenidos a través de tablas y el análisis ANOVA, y, con ello, se estimaron los factores que determinan una alta concentración de CO₂.

Fase III. Planteamiento de recomendaciones.

Establecer la tasa de renovación de aire

Al establecer la tasa de renovación de aire en los diferentes espacios se logró determinar el nivel de ventilación dentro de un espacio cerrado; para establecer dicha tasa se tuvo en cuenta el

modelo aplicado en la guía *Risk Reduction Strategies for Reopening Schools* que se basa principalmente en la cantidad de aire limpio que ingresa y sale del recinto que anteriormente se ha cuantificado (Jones et al, 2020). Esta tasa de renovación de aire fue cuantificada en la fase I dado que era necesario este dato para el adecuado desarrollo de las siguientes fases.

Determinar la exposición al CO₂ de la comunidad tomasina.

Una vez establecida la tasa de renovación y las concentraciones de CO₂ fue posible conocer la incidencia de contagio de COVID-19 de la comunidad en los espacios evaluados; por consiguiente, a partir de los datos de tasa de reaireación y concentración de CO₂ se compararon los rangos establecidos en la tabla 8 y se determinó el nivel de ventilación en la Universidad Santo Tomás sede Aguas Claras (Rodríguez et al L. , 2021), luego, se generó una discusión acerca de cómo se ha llevado a cabo este tipo de estudio en relación a instituciones educativas, evaluando falencias en la medición o diferentes métodos que pueden ser útiles al momento de que exista la necesidad de volver a interactuar con una enfermedad aérea respiratoria de alto riesgo en espacios cerrados.

Ajuste de los protocolos de bioseguridad.

Se comprueba que el nivel de ventilación es ideal, por lo que la incidencia de contagio en las aulas objeto de investigación es bajo, a pesar de esto se generaron una serie de recomendaciones para futuros eventos de contagio masivos que representen una amenaza para la comunidad estudiantil.

Resultados

Fase I. Recolección de datos

Para la Fase I se entrega el dimensionamiento de las aulas, las cantidades promedio de CO₂ y el grado de precisión que tiene el modelo matemático entre el valor observado y el valor predicho por el cálculo de CO₂, siendo así, entonces:

Dimensionamiento de las aulas

Para el dimensionamiento de las aulas se tuvo en cuenta la información secundaria proporcionada por el departamento de Planta Física de la sede; por otra parte, con la ayuda de un decámetro se realizaron las mediciones de largo, ancho y alto en 3 aulas al azar para ambos edificios de la Universidad Santo Tomás sede Aguas Claras, siendo este un recurso de información primaria. Una vez verificadas las medidas proporcionadas por Planta Física es posible establecer el cálculo de volumen del aula, recopilando la información en la siguiente tabla:

Tabla 2.

Dimensiones de las aulas de la Universidad Santo Tomás sede Aguas Claras.

Información secundaria				
DESCRIPCIÓN	Dimensiones en metros (m)			Volumen (m ³)
	Largo (m)	Ancho (m)	Alto (m)	
Aulas Bloque B (semisotano)	7,58	6,08	2,4	110,60736
Aulas Sol de Aquino del piso 1 al piso 5 (B)	7,78	7,28	2,65	150,09176
Aulas Santo Domingo de Guzmán del piso 1 al piso 5 (A)	7,56	6,07	2,8	128,48976
Información primaria				
Aulas Bloque B (semisotano)	8,1	6,2	2,5	125,55
Aulas Sol de Aquino del piso 1 al piso 5 (B)	7,8	7,5	2,6	152,1
Aulas Santo Domingo de Guzmán del piso 1 al piso 5 (A)	7,3	6,3	3	137,97

Nota. La siguiente tabla es de autoría propia, se hizo una comprobación y promedio de valores para cada sección, no se tuvieron en cuenta las aulas del 1er piso de cada edificio.

Como se puede observar en la Tabla 2, las aulas pertenecientes al edificio Sol de Aquino presentan la mayor cantidad en largo y ancho, siendo particularmente de mayor tamaño en relación

a sus pares. Es importante mencionar que las dimensiones a tener en cuenta para el desarrollo del documento son las relacionadas con la información secundaria, debido a que puede existir un error en la información primaria, ya que dicha información fue establecida con la ayuda de un decámetro por lo cual existe un margen de error.

Al observar que no existe una mayor diferencia entre ambas mediciones se utiliza la información secundaria, dado que contiene los datos precisos contenidos en planos y entregados por el departamento de Planta Física.

Medición directa mediante un sensor de CO₂

Se utilizó un sensor de infrarrojo para la medición in situ de la concentración de CO₂ y la temperatura (véase figura 4), la sonda de infrarrojo no dispersivo actúa como un dispositivo electroscopio simple que cuenta con la capacidad de detectar el gas a través de un canal de ingreso del gas, luz infrarroja y sensores de onda para verificar la intensidad de luz emitida al momento de desarrollar el test automático, la intensidad de la luz disminuye a medida que aumenta la concentración de CO₂; aunque en el ambiente no solo se presenta el dióxido de carbono como único gas presente en un espacio cerrado pueden existir errores de lectura al ingresar vapor de agua, fenómeno que puede incidir en la calidad del dato (Cavasassi, 2022).

Figura 2.

Sensor de medición de CO₂ por infrarrojo no dispersivo.



Nota. El dispositivo es de propiedad del Proyecto, imagen propia.

Las mediciones de CO₂ se realizaron en diferentes horas del día, generando un ponderado de concentraciones promediadas cada 10 minutos para cada aula durante una hora y media, se tomó la temperatura y se clasificó el tipo de ventilación en el momento que se realizó la muestra, siendo clasificado en dos tipos de ventilación, ventilación natural (ventanas abiertas) o sin ventilación (recinto cerrado/aire acondicionado encendido) la cual se representa en las siguientes tablas:

Tabla 3.

Concentración de CO₂ (ppm) en relación al aforo presente al momento de la medición para el edificio Santo Domingo de Guzmán.

Aula	Promedio CO ₂ (ppm)	Temperatura (°C)	Tipo de ventilación	Aforo
1	490	27	Natural	10
2	452	27	Natural	8
3	460	27	Natural	5
201A	536	29	Sin Ventilación	12
202A	659	29	Sin Ventilación	17
203A	487	28	Sin Ventilación	8
204A	470	28	Natural	11
205A	512	29	Sin Ventilación	10
301A	638	27	Sin Ventilación	15
302A	563	29	Natural	17
303A	640	27	Sin Ventilación	15
304A	489	25	Sin Ventilación	8
305A	501	27	Natural	10
401A	580	28	Sin Ventilación	15
402A	452	28	Natural	8
403A	530	26	Natural	15
404A	493	28	Sin Ventilación	5
405A	507	27	Sin Ventilación	9
501A	466	28	Sin Ventilación	5
502A	470	28	Natural	10
503A	692	29	Natural	17
504A	621	28	Sin Ventilación	14
505A	455	27	Natural	5

Nota. Aquellas que representan sin ventilación pueden contener el aire acondicionado prendido, se hace énfasis en que se encuentra totalmente cerrado al momento de tomar la muestra.

Como se puede observar en la tabla 3 y 4, en el momento de la medición se contaba con una baja cantidad de personas ubicadas en el aula a excepción de los salones 202 A, 302 A, 401 A y 503 A los cuales contenían una gran cantidad de estudiantes a comparación de la media del resto, un primer acercamiento que relaciona la temperatura junto con el aforo y la concentración de CO₂ observada, es la forma en la que incrementa en menor cantidad la concentración de CO₂ en aulas con ventilación natural, así tengan mayor cantidad de estudiantes que las aulas que no cuentan con ventilación natural

Tabla 4.

Concentración de CO₂ (ppm) en relación al aforo presente al momento de la medición para el edificio Sol de Aquino.

Aula	Promedio CO₂	Temperatura	Tipo de ventilación	Aforo
201B	467	28	Natural	11
202B	485	28	Natural	8
203B	548	30	Natural	15
204B	477	26	Sin Ventilación	6
205B	456	27	Sin Ventilación	5
301B	538	26	Sin Ventilación	13
302B	464	28	Natural	11
303B	466	29	Natural	12
304B	470	29	Natural	12
305B	457	29	Natural	10
401B	486	26	Sin Ventilación	8
402B	484	27	Sin Ventilación	7
403B	473	27	Sin Ventilación	6
404B	464	26	Sin Ventilación	6
405B	492	28	Natural	15
501B	465	28	Natural	11
502B	447	28	Natural	8
503B	452	29	Natural	8
504B	480	29	Natural	12
505B	545	31	Natural	15

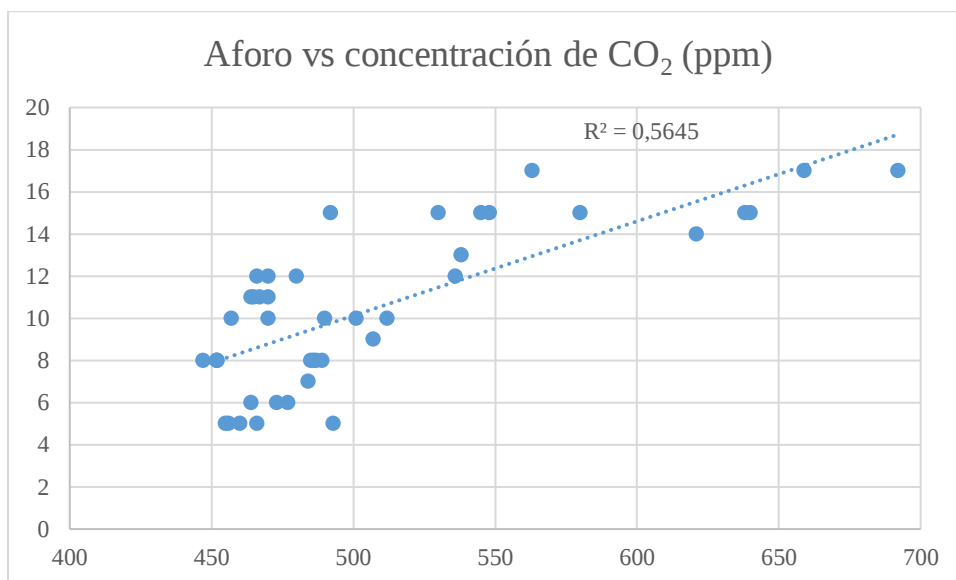
Nota. Las tablas 3 y 4 son de autoría propia.

Al momento de encontrar la primera relación entre la concentración de contaminantes, el aforo y el tipo de ventilación se procedió a realizar una gráfica de regresión lineal que diera un

primer indicio sobre la correlación entre los valores tomados para cualquier dato con ventilación o sin ventilación versus el aforo:

Figura 3.

Relación de regresión lineal R^2 como método de comprobación



Nota. La gráfica es de autoría propia, se considera como un resultado preliminar más no es un objeto que asegure con plena certeza el fenómeno estudiado, indica que su nivel de confiabilidad es bajo.

Como se puede ver en la figura 2, la relación de concentración de CO₂ no es un parámetro significativo al momento de relacionarse con el aforo, recordando lo que describía (González, 2022) la variación del tiempo y la dinámica de las aulas inciden en el incremento o decrecimiento continuo de la concentración de CO₂, siendo el motivo principal por el cual se creó esta gráfica, dando a entender la primera discusión acerca de cómo se deben tomar los datos al momento en el que se quiere evaluar un fenómeno de calidad del aire y qué tanta repetitividad necesita para aumentar su grado de confiabilidad al relacionar el dióxido de carbono con una variable independiente.

Posteriormente, se realizaron los cálculos de volumen, área más pequeña, ACH y error absoluto medio, dando los siguientes resultados:

El volumen se calculó suponiendo que el salón es un cubo perfecto, siendo una ecuación de lado*lado*lado, su valor se puede observar en la tabla 2. En cuanto a las variables independientes

se manejó un tiempo de permanencia de 1,5 y la presión atmosférica de la ciudad que se encuentra en 0,94 atm.

Para el cálculo del área más pequeña se tuvieron en cuenta los siguientes datos (ver tabla 5):

Tabla 5.

Cálculo del área más pequeña por la que ingresa el aire al aula.

Área más pequeña (m ²)			
	Largo	Ancho	Total
Ventilación natural	1,2	1,8	2,16
Sin ventilación	0,73	0,73	0,5329

La relación entre el área más pequeña y el tipo de ventilación depende de la cantidad de orificios por los cuales recircula el aire, siendo un parámetro de importancia al momento de evaluar las concentraciones de CO₂.

Determinar el grado de precisión que tienen los modelos matemáticos.

Inicialmente para determinar el grado de precisión de los modelos matemáticos se tuvo en cuenta la ejecución de las ecuaciones de concentración de CO₂ teórico en aulas con ventilación natural y sin ventilación (aire acondicionado):

Figura 4.

Ecuaciones entregadas por (Rodriguez et al L. , 2021) para la evaluación y monitoreo de dióxido de carbono en las aulas.

Aula sin ventilación	Aula con ventilación
$[CO_2] = \frac{54.3 * \# * T * t}{V * P} + 410$ #: número de personas en el aula T: temperatura ambiente (K) t: tiempo de permanencia en el aula (h) V: volumen del aula (m³) P: presión atmosférica (atm) [CO₂]: concentración (ppm)	$[CO_2] = \frac{54.3 * \# * T}{V * P * ACH} + 410$ #: número de personas en el aula T: temperatura ambiente (K) ACH: tasa de renovación de aire (h⁻¹) V: volumen del aula (m³) P: presión atmosférica (atm) [CO₂]: concentración (ppm)

Nota. La figura se encuentra en la guía metodológica para la obtención de la concentración de dióxido de carbono en instituciones educativas.

En cuanto al modelo matemático implementado para estimar la tasa de renovación de aire se encuentra la siguiente ecuación entregada por (Atkinson et al, 2009):

$$ACH = \frac{0,65 \times Vel. viento (m/s) \times \text{área abierta mas pequeña} (m^2) \times 3600 (s/h)}{Volumen del espacio (m^3)}$$

Para las aulas con ventilación natural se midió la velocidad del viento en la apertura más pequeña con la ayuda de un anemómetro, además, se midió el área de la misma apertura y se obtuvo el valor de ACH. Este valor en conjunto con los datos de temperatura, presión atmosférica, volumen y número de personas en el aula permitió determinar la concentración de CO₂ en aulas con ventilación natural.

En cambio, para las aulas sin ventilación (aire acondicionado encendido) se tuvo en cuenta la tasa de reaireación del aire acondicionado en conjunto con los datos de temperatura, presión atmosférica, volumen y número de personas en el aula permitió determinar la concentración de CO₂ en aulas sin ventilación.

Teniendo en cuenta lo anterior, se recopilaron los datos de todas las aulas, se realizó una clasificación que se subdividió en aulas con ventilación natural y aulas sin ventilación (aire acondicionado encendido), siendo evaluadas por el número de personas en el aula, la tasa de reaireación y la concentración de CO₂ teórico y medido. Tal como se menciona anteriormente se presentan las siguientes tablas:

Tabla 6.

Resultados obtenidos en las aulas que se clasifican bajo ventilación natural en las que se midieron las concentraciones de CO₂ con la sonda de infrarrojo no dispersivo.

Aula	# de personas	ACH	CO ₂ Teórico	CO ₂ instrumento
1	10	18,278711	495,44822	490
2	8	29,702906	452,06682	452
3	5	18,278711	452,72411	460
204A	11	25,569041	468,03458	470
302A	17	15,734795	556,2299	563
305A	10	15,734795	495,44822	501

Tabla 6.*Continuación*

Aula	# de personas	ACH	CO2 Teórico	CO2 instrumento
402A	8	25,569041	452,20697	452
403A	15	15,734795	537,7453	530
502A	10	25,569041	462,75871	470
503A	17	7,8673974	702,4598	692
505A	5	15,734795	452,72411	455
201B	11	21,88901	468,03458	467
202B	8	13,47016	478,58632	485
203B	15	13,47016	539,45341	548
302B	11	21,88901	468,03458	464
303B	12	21,88901	473,52068	466
304B	12	21,88901	473,52068	470
305B	10	21,88901	462,9339	457
405B	15	21,88901	489,13807	492
501B	11	21,88901	468,03458	465
502B	8	21,88901	452,20697	447
503B	8	21,88901	452,34712	452
504B	12	21,88901	473,52068	480
505B	15	13,47016	539,88044	545

Nota. La tabla es de autoría propia y hace énfasis en la variación de la concentración de dióxido de carbono medida y calculada.

Tabla 7.

Resultados obtenidos en las aulas que se clasifican bajo ventilación por aire acondicionado en las que se midieron las concentraciones de dióxido de carbono con la sonda de infrarrojo no dispersivo.

Aula	# de personas	ACH	CO₂ Teórico	CO₂ instrumento
201A	12	12,933856	535,57454	536
203A	8	12,933856	493,43929	487
205A	10	12,933856	514,64545	512

Tabla 7.*Continuación*

Aula	# de personas	ACH	CO₂ Teórico	CO₂ instrumento
304A	8	12,933856	492,60808	489
401A	15	12,933856	566,44867	580
405A	9	12,933856	503,5575	507
501A	5	12,933856	462,14956	466
204B	6	11,072347	472,16386	477
205B	5	11,072347	461,97639	456
301B	13	11,072347	544,68837	538
401B	8	11,072347	492,88515	486
402B	7	11,072347	482,76694	484
403B	6	11,072347	472,37167	473
404B	6	11,072347	472,16386	464
202A	17	9,0730032	663,59822	659
303A	15	9,0730032	632,282	640
404A	5	9,0730032	484,34086	493
504A	14	9,0730032	618,1544	621

El aire acondicionado de las aulas de la Universidad Santo Tomás Sede Villavicencio es marca LG IDU Cassette 4 vías, la cual cuenta con una tasa de reaireación a través del ventilador turbo Fan de 30 m³/min, aportando 0,94 m/s de velocidad al aula (véase figura 5), que sumada a la velocidad del viento entrante por factores externos (apertura de puertas, movimiento de las personas y agitación incrementan la recirculación del aire y dispersión del dióxido de carbono en el aula.

Figura 5.

Ventilador presente en las aulas monitoreadas durante la toma de datos de dióxido de carbono



Las tablas 6 y 7 tienen diferencias notables en cuanto a la cantidad de la concentración de dióxido de carbono presente en el aula evaluado, en el caso de la tabla 6 las concentraciones de dióxido de carbono aumentan directamente con la cantidad de personas en el aula más una tasa de aireación baja en comparación con las demás, sea el caso del aula 503 A una de las más destacables por su concentración tanto teorica como instrumental. Para la tabla 7 existe una baja relación entre el cambio de la tasa de aireación con respecto a la concentración del contaminante siendo más cercano a los valores que se encontraría de acuerdo al volumen del recinto y el aforo que se encuentra en este, igualmente, contiene los valores más altos de concentración de CO₂ y encuentra una directa entre la cantidad de estudiantes como se denota en el aula 404 A la cual con 6 estudiantes pasó a superar aulas con ventilación de aire acondicionado que además cuentan con un aforo mayor a este.

Para las condiciones de tasa de reaireación se encuentran los siguientes niveles estimados de reaireación.

Tabla 8

Comparativa de estimaciones de ACH y dióxido de carbono según (Rodriguez et al L. , 2021).

Nivel de ventilación	Ideal	Excelente	Buena	Aceptable	Malo
Concentraciones de CO ₂ (ppm)	Menor 550	Entre 550 y 700	Entre 700 y 800	Entre 800 y 1000	Mayor a 1000
ACH (Tasa de reaireación)	6	5 a 6	4 a 5	3 a 4	Menor a 3

En relación a los datos encontrados en las tablas 6 y 7 y la clasificación del nivel de ventilación entregado en la tabla 8 se supone que la cantidad concentración de CO₂ estima un rango de ventilación bueno-ideal, por lo que la incidencia de contagio es baja.

De acuerdo a lo anterior se realizó la determinación del grado de precisión del modelo matemático implementado, para este caso se hizo uso del error absoluto medio al contar con un valor preciso tomado por un instrumento de medición y una ecuación que parametriza los valores dentro del mismo rango (IBM Clodu Pak for Data, 2021). Su cálculo determinó un valor promedio de 4,8% (véase en Anexo 3) de error entre el valor observado (sensor) y el valor predicho, cómo se expresa en la siguiente ecuación:

$$EAM = ABS (valor observado - valor predicho) * \frac{sumaproductos}{cantidad\ de\ productos}$$

Esta ecuación expresa la suma de todos los errores encontrados desde la diferencia absoluta y su sumatoria al cuadrado dividido entre la cantidad de productos multiplicados. Con lo cual para la siguiente fase no se necesita de una calibración del modelo, dado que el nivel de confiabilidad de los datos es bastante alto.

Fase II. Aplicación de los modelos matemáticos

Aplicar los modelos matemáticos ajustados

Los modelos matemáticos fueron aplicados en la Fase I para lograr establecer inicialmente el grado de precisión, teniendo como resultado que no existe la necesidad de calibrar el modelo, por lo que se tuvieron en cuenta los datos obtenidos del modelo en la Fase I.

Análisis estadístico ANOVA

El análisis de Varianza ANOVA se denomina a aquel conjunto de técnicas estadísticas que se utilizan al momento de comparar grupos o cuando hay mediciones repetidas en más de dos ocasiones y se desea analizar el efecto de una variable sobre el resultado de otra. En este caso se hizo uso del software IBM SPSS brindado por las instalaciones de la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio; su uso se basa en analizar simultáneamente el efecto de dos variables diferentes entendiendo la interacción entre estos (Dagnino, 2014).

Con base en lo anterior, se tomaron diferentes variables de prueba para hallar su variabilidad ante la varianza de grupos combinados provenientes de la población específica (concentración de CO₂); según Dagnino 2014, entre el valor de F es más cercano a 1 el factor dependiente es más similar en cuanto a su varianza con el factor independiente, siendo uno de los causantes principales de la medición, error e interpretación de los datos a nivel estadístico. Para todas las pruebas se utilizó un nivel de confianza del 95%. Para hacer el análisis estadístico se tuvo en cuenta las siguientes hipótesis:

Hipótesis.

El presente estudio al contener un componente cuantitativo y correlacional propone una hipótesis nula y alternativa, la cual dispone que existe una relación directa entre la concentración de CO₂ en espacios intramurales con la incidencia de contagio de enfermedades respiratorias transmitidas por aerosoles. Siendo el caso entonces:

Hipótesis nula.

Las aulas con un área de apertura más pequeña, aforo lleno y volumen del aula menor son propicias a presentar una mayor concentración de CO₂ representando una alta incidencia de transmisión de enfermedades respiratorias

Hipótesis alterna

Las aulas con un área de apertura más grande, aforo lleno y volumen del aula mayor son propicias a presentar una menor concentración de CO₂ representando una baja incidencia de transmisión de enfermedades respiratorias.

Concentración de CO₂ vs Área de apertura más pequeña (m²)**Tabla 9.**

Análisis de varianza ANOVA entre la concentración de CO₂ vs Área de apertura más pequeña (m²)

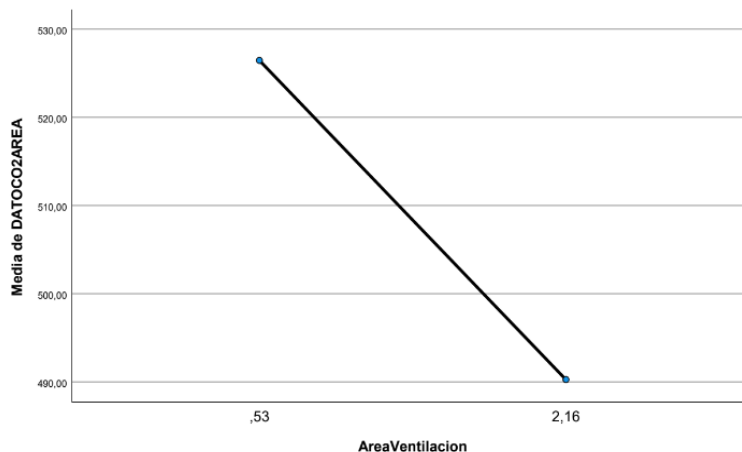
			ANOVA			
DATOCO2AREA			Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F
Entre grupos	(Combinado)		13877,467	1	13877,467	3,884
	Término lineal	No ponderados	13877,467	1	13877,467	3,884
		Ponderados	13877,467	1	13877,467	3,884
Dentro de grupos			146499,160	41	3573,150	
Total			160376,627	42		

Nota. Se cuenta con el soporte de la colocación de los datos y la agrupación de los mismos, no cuenta con la prueba post hoc al contar con menos de tres grupos. Autoría propia.

Para esta primera prueba se obtuvo que los datos de dióxido de carbono se encontraban cercanos a la relación de varianza entre el área de apertura más pequeña con un valor F de 3,884, mientras que su correlación en relación al área de ventilación se demuestra en la siguiente figura:

Figura 6.

Correlación lineal entre el área de la ventilación y el volumen del aula con respecto a la concentración de CO₂



Nota. Para esta gráfica se evalúa la correlación de los datos entre el área de ventilación y la concentración de dióxido de carbono.

En contexto, la correlación entre el volumen y la concentración de dióxido de carbono fue positiva (0,333), siendo el caso contrario para el área de ventilación la cual presenta una correlación negativa (-0.294), deduciendo que son inversamente proporcionales, mientras una aumente, la otra tiende a disminuir, siendo un primer argumento frente al hecho de que la propagación de un virus disminuye teniendo una buena ventilación o tasa de reaireación producida por el aire acondicionado (véase figura 5).

Adicionalmente, se encontró que la correlación de la concentración de dióxido de carbono frente al volumen del aula fue mayor que el obtenido para el área de apertura ($F= 5,567$), lo que fundamenta que el volumen como espacio no efectúa mayor cosa que contener el contaminante y servir de depósito mientras que el valor de la concentración fluctúa por la presencia o no de aforo y las variables climatológicas, en especial el viento. En cuanto a la temperatura y la concentración de CO₂ frente al aforo de personas, el cual fue dividido en 4 grupos (5 a 8; 9 a 11; 12 a 14; 15 a 17) se encontró un dato bastante relevante el cual se sustenta con la investigación realizada por (Álvarez & Ulloa, 2022), dónde determinan que el aforo en el aula no es uno de los determinantes principales de la concentración de CO₂, teniendo una relación más cercana la temperatura, razón que se puede

ver sesgada por la descripción de los grupos de personas, pero que se relaciona desde la perspectiva climatológica, ya que las estructuras retienen el calor presentado en las horas del mediodía, a partir de allí se pueden observar la siguiente tabla:

Tabla 10.

Análisis de F entre las variables de temperatura y concentración de dióxido de carbono vs el aforo de personas en las aulas divididas en cuatro grupos.

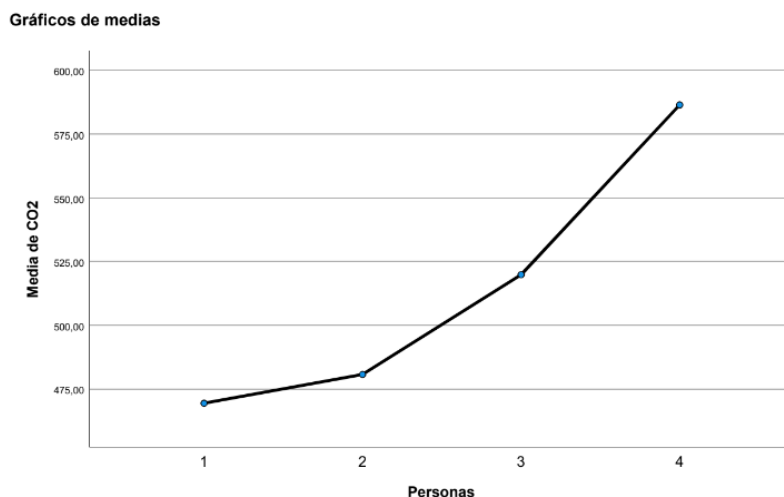
ANOVA				Media cuadrática	F
CO2	Entre grupos	(Combinado)		31673,803	18,901
		Término lineal	No ponderados	89792,021	53,582
			Ponderados	87417,182	52,165
			Desviación	3802,114	2,269
		Término cuadrático	No ponderados	7188,778	4,290
			Ponderados	7604,173	4,538
			Desviación	,054	,000
		Dentro de grupos		1675,775	
		Total			
Temperatura	Entre grupos	(Combinado)		4,004	3,180
		Término lineal	No ponderados	9,930	7,887
			Ponderados	10,962	8,707
			Desviación	,525	,417
		Término cuadrático	No ponderados	1,014	,805
			Ponderados	1,048	,832
			Desviación	,002	,002
		Dentro de grupos		1,259	
		Total			

Nota. Para este punto se realizó un ANOVA en dos vías, lo que, en consecuencia, determina que existan patrones similares en la interpretación de los datos por medio de una gráfica.

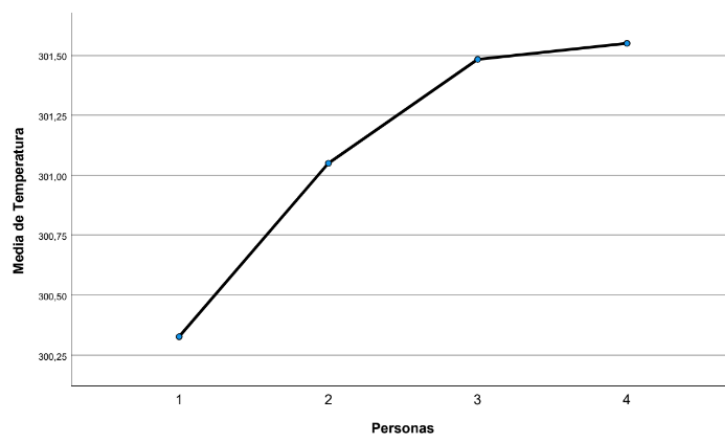
Para obtener una visión más clara del asunto se realizaron unas gráficas sobre las medias de temperatura y concentración de CO₂ vs los grupos de personas focalizadas en los grupos anteriormente mencionados, sin embargo, no se toman como relevantes ante la hipótesis nula por la razón que se explica (figura 7), la base de que el aforo incrementa las emisiones es una medida de tendencia variable ante la relación de toma de datos según lo descrito por (González, 2022), siendo una medida de tendencia única y que no expresa en el tiempo su relación con el tiempo de permanencia pero si mejora la capacidad de interpretación de los datos. Por otra parte, la temperatura sigue un patrón ajeno a la concentración de CO₂ encontrando armonía entre el incremento del número de personas y el aumento de esta (figura 8).

Figura 7.

Relación del conjunto de personas vs la concentración de CO₂ en las aulas monitoreadas.

**Figura 8.**

Relación de la temperatura vs la concentración de CO₂ en las aulas monitoreadas.



Las diferentes visiones entregadas encuentran un punto en común al relacionar el aforo y los datos de concentración de CO₂ con respecto al volumen de las aulas, dado que en la tabla 11 se expresa de manera muy pronunciada que la cantidad de participantes durante los muestreos es acertada ante el volumen que ocupan ($F = 1,604$), mientras que al relacionarse proporcionalmente con los datos de dióxido de carbono no satisface que exista una relación directa entre aforo,

volumen y concentración de dióxido de carbono ($F = 5,587$) y resultando en lo expresado por (González, 2022).

Tabla 11.

Relación del aforo y la concentración de dióxido de carbono vs el volumen del aula monitoreada.

ANOVA				Media cuadrática	F
DATOCO2VOL	Entre grupos	(Combinado)		17460,570	5,567
		Término lineal	Ponderados	10783,107	3,438
			Desviación	24138,033	7,696
		Término cuadrático	Ponderados	24138,033	7,696
	Dentro de grupos			3136,387	
	Total				
AFORO	Entre grupos	(Combinado)		21,324	1,604
		Término lineal	Ponderados	,617	,046
			Desviación	42,032	3,161
		Término cuadrático	Ponderados	42,032	3,161
	Dentro de grupos			13,295	
	Total				

Nota. Las figuras relacionadas al ANOVA son de autoría propia, se cuenta con el soporte en pdf de la ejecución de los datos y los resultados por separado.

Determinar cuáles son las variables más sensibles

Las variables de respuesta exigen que ante un análisis más riguroso sean tomadas en cuenta otras técnicas de referencia, para el caso del presente estudio se demostró que la hipótesis nula se invalida aceptando la hipótesis alterna. Siendo así, la variable que afecta el nivel de ventilación es el área de apertura más pequeña, dado que influye en la tasa de reaireación y, por ende, en la concentración de CO₂.

Fase III. Planteamiento de recomendaciones.

Para la fase III se cuenta con el establecimiento de la tasa de reaireación y la discusión acerca de si los protocolos de bioseguridad deben ser reajustados frente a un evento del mismo impacto que el COVID-19.

Establecer la tasa de renovación de aire

La tasa de renovación de aire fue establecida en la Fase I para a partir de esta poder aplicar los modelos matemáticos para la determinación del CO₂.

Determinar la exposición al CO₂ de la comunidad tomasina.

Inicialmente, la tasa de reaireación presenta valores demasiado altos y no concuerda con la tabla entregada por (Rodríguez et al L. , 2021), dado que provienen de metodologías empíricas que en el caso de Villavicencio puede presentar modificaciones por sus variaciones climáticas y el viento urbano que presenta la ciudad, el cual golpea directamente con las aulas de la Universidad en momentos de precipitación, aceleración de los vientos e incremento de la humedad en el ambiente, aunque se demuestra que hubo valores de relación entre los distintos tipos de ventilación, se analiza que pueden existir mecanismos y software que analicen en diferentes situaciones y periodos de tiempo puntuales el fenómeno de la concentración de dióxido de carbono en las aulas.

De acuerdo a estudios hechos por (Beltrán, 2019) y (Gasteiz, 2021) se estimulan los esfuerzos en mejorar las dinámicas de monitoreo en las aulas puesto que se toma como referencia el COVID-19 frente a futuras amenazas, estudios como los de (González, 2022) y (Mares et al, 2022) proponen ideas novedosas que dentro de este trabajo no son tomadas en cuenta de acuerdo a los objetivos de estudio.

Por lo anterior, gracias a que se garantiza un adecuado nivel de ventilación los niveles de exposición de CO₂ en la comunidad tomasina ubicada en espacios intramurales es baja, lo cual plantea que existe una baja incidencia de contagio.

Ajustes al Protocolo de Bioseguridad.

Manteniendo la discusión anterior, la relación entre el protocolo llevado a cabo por la Universidad y el presente trabajo estipulan de forma parcial que el manejo establecido dentro de las políticas administrativos y directivos superiores cuentan con la fiabilidad de realizar sus clases con los aforos impuestos para cada aula, dado que, el aforo no es el factor principal para la concentración de dióxido de carbono, lo es el área de apertura, el volumen, la velocidad del viento y el tipo de ventilación, por lo que mientras se asegure un flujo de aire continuo, sea natural o

mecánico, se aseguraran las condiciones de bioseguridad para los ocupantes de cada aula. Un aporte al análisis desde otra perspectiva se encuentra en observar cómo el cañón de viento urbano afecta a la concentración de CO₂ en la Universidad Santo Tomás Villavicencio sede Aguas Claras, sin embargo, no es objeto de estudio para el presente trabajo.

Las recomendaciones generales para el Protocolo de Bioseguridad son:

- Asegurar un sistema de ventilación continuo, dónde los ocupantes de un salón puedan establecer un perímetro de protección pero que no se encuentren en total encierro.
- Manejar las pausas activas fuera del aula, según la investigación realizada por **(González, 2022)** y **(Li & Tang, 2021)** el decaimiento de la concentración de CO₂, por ende, de enfermedades aéreas se manifiesta por deposición seca de las partículas suspendidas, contribuyendo con el control del contagio.
- Estudiar las ventajas que tiene la forma estructural de la Universidad frente a las corrientes de aire que le atraviesan de sur a norte, siendo un factor clave para mejorar los índices de calidad del aire o en su debido caso posicionar sistemas de alerta temprana en caso de que exista un gran contenido de material particulado PM 2.5 en el ambiente.

Impacto social y humanístico

El ámbito de estudio universitario supone que existen espacios cerrados y abiertos cómo lo indica la problemática del proyecto, varios autores proponen una relación directa entre el rol de la concentración de CO₂ y la calidad de la salud de las personas que se encuentran en un recinto. La pandemia producida por el virus SARS-Cov-2 desencadenó un severo impacto en la humanidad debido a la necesidad de la modificación del estilo de vida, involucrando así diferentes aspectos culturales, sociales y económicos; dando paso a la adaptación de las tecnologías de la información y comunicación como nueva herramienta para el desarrollo de las diferentes actividades entre las cuales se encuentra el proceso educativo (Lizcano & Arroyave, 2020).

A nivel nacional, se consideró una prioridad en salud pública el retorno a clases presenciales bajo la adaptabilidad de medidas de bioseguridad respondiendo a las necesidades de desarrollo y salud mental de los jóvenes (L. Rodriguez et al., 2021); sin embargo, como se ha venido mencionando, existe una preocupación frente a la transmisión de diferentes virus, por lo que el presente documento contribuye de manera directa con las comunidades educativas, en específico con la Universidad Santo Tomás, Villavicencio sede aguas claras en vista de que los directivos a través de este estudio podrán reajustar los protocolos de bioseguridad y de tal modo garantizar que los estudiantes se encuentren en espacios sanos y así mismo buscar la manera de que los espacios estén adecuados para minimizar el riesgo de contagio frente futuras enfermedades respiratorias contagiosas; es importante mencionar que con las mediciones de CO₂ realizadas durante la investigación se logró establecer que la calidad del aire es buena-excelente por lo que se estaría garantizando un adecuado nivel de ventilación dentro de las aulas.

Partiendo de lo anteriormente mencionado, el presente estudio a su vez favoreció a tanto estudiantes como docentes de la universidad Santo Tomas dejándoles ver que gozaban de una adecuada calidad del aire al interior de las aulas, por lo que la incidencia de contagio de enfermedades respiratorias infecciosas es baja generando así un parte de tranquilidad para toda la comunidad.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- La evaluación de la concentración de CO₂ en espacios intramurales necesita de diferentes análisis para proyectar una mirada externa e interna de los cambios que influyen en la disminución de la concentración en relación a las áreas de apertura y el volumen de los salones, en este estudio se determina que bajo las métricas de **(Rodriguez et al L. , 2021)** en general las aulas cuentan con una calidad del aire buena-excelente (tabla 9, figura 6), lo cual puede relacionarse indirectamente con variables no estudiadas como la humedad relativa, la precipitación o la dirección del viento en relación al choque de flujo en las aulas por parte del cañón de viento urbano y su alcance hasta los pisos inferiores a superiores por convección.
- Los niveles de exposición de CO₂ de la comunidad tomasina monitoreada y la tasa de renovación de aire en espacios intramurales dan a entender que se encuentran bajo un rango bueno-ideal en cuanto al nivel de ventilación, manifestando una baja incidencia de contagio por enfermedades respiratorias, siendo el nivel de ventilación afectado por la variable del área de apertura más pequeña, lo cual indica que esta variable es la más importante a tener en cuenta para garantizar la salud de la comunidad estudiantil en espacios intramurales
- Los sesgos que se presentan en el trabajo en materia de salud ambiental se relacionan con la falta de conocimiento de la concentración de material particulado PM 2.5 presente en el espacio intramural, la cantidad de veces que se abrió la puerta durante la medición y los posibles fallos en el sistema de ventilación por aire acondicionado. Se reconoce que los sesgos mencionados no se pudieron evitar a lo largo de la investigación, debido a que las metodologías que se tuvieron en cuenta para realizar el presente trabajo obviaban este tipo de variables.
- Se propone a través de las recomendaciones que la influencia del nivel de ventilación sobre la concentración de CO₂ apunta a que debe existir algún tipo de ventilación continua en las aulas de la Universidad Santo Tomás para disminuir la incidencia de contagio en el número de personas presentes en el aula.

Recomendaciones

En las recomendaciones se encuentra una discusión en la que se puede participar de forma abierta respondiendo a la pregunta de ¿cuál es la capacidad real que tiene un aula para albergar estudiantes antes de sobrepasar el límite de concentración de CO₂ durante un intervalo de tiempo determinado? tal como lo menciona (González, 2022) Dado que una clase está sujeta a muchas variaciones y dinámicas que en un intervalo de tiempo pueden variar de una sesión a otra (falta de estudiantes, cambio de ubicación de la clase, clima del día, horario en el que se realiza, dinámicas de entrada y salida); lo cual genera muchos sesgos en la información presentada que no pueden ser argumentados de forma satisfactoria, siendo este un instrumento base para la creación de nuevas investigaciones enfocadas en las recomendaciones dejadas en este punto y en el punto de ajuste de protocolo de bioseguridad.

La siguiente recomendación se ubica con respecto al uso de software especializados en el modelamiento de datos climatológicos en espacios cerrados, el caso de CDF y DesignBuilder pueden ser una alternativa al desarrollo, crítica y avance con respecto al trabajo presentado que incorpora nuevos elementos de comprensión y lectura para que exista un mayor atractivo hacia este tema que puede llegar a impactar cualquier comunidad que se encuentre en espacios cerrados, generando toma de decisiones sobre las cuales mejorar la calidad del aire o definir con mayor seguridad el aforo de personas en un espacio intramural.

Se recomienda que se establezca una metodología donde se eviten los sesgos presentados en cuanto a la medición de la concentración de CO₂ y la concentración de material particulado PM 2.5 en el sitio de muestreo, así como la capacidad de medir la velocidad del viento externo y su relación con las aperturas que presenta el espacio intramural objeto de investigación.

Finalmente, tomar en cuenta el episodio del COVID-19 como un aprendizaje hacia el futuro con respecto a la calidad del aire y su impacto sobre la sociedad humana, de la cual pueden desarrollarse espacios de debate y organización para que se regule y controle dentro de los planes de construcción y ordenamiento del territorio en la región un mayor énfasis en la producción de áreas de apertura para la entrada y salida de viento con respecto a la dirección que toma el viento para cualquier zona que se encuentre entre el piedemonte y la llanura colombiana.

Referencias bibliográficas

- Álvarez López, K.D. (2022). Evaluación de la ventilación en aulas y otros espacios físicos de la Universidad Politécnica Salesiana "Campus Sur" utilizando como referencia la concentración interior de CO₂ [Trabajo de grado, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio institucional. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/22444>
- Álvarez Rodríguez, M. (2022). Actuaciones para la mejora de la ventilación de espacios públicos en la Comunidad de Madrid. *Revista Salud Ambiental*, 2022;22. 70-73. <https://ojs.diffundit.com/index.php/ras/article/view/1189/1136>
- Atkinson, J.; Chartier, Y.; Pessoa, C.; Jensen, P.; Li, Y. & Seto, W. (2009). Natural Ventilation for Infection Control in Health-Care Settings. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/44167>
- Azimi, P.; Keshavarz, Z.; Cedeno Laurent, JG. & Allen, JG. (2020). Estimating the nationwide transmission risk of measles in US schools and impacts of vaccination and supplemental infection control strategies. *BMC Infectious Diseases* 2020 jul 24;20(1): 541. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32652940/>
- Ballesteros Zapata, E.E. (2013). Clima y condiciones de confort en la ciudad de Villavicencio. *Dialnet, Cap&Cua. Ciencia, tecnología y cultura*. 10(1), 28-34. <https://dialnet.unirioja.es/ejemplar/371001>
- Beltrán Moreno, A. M. (2019). Sistema de ventilación y purificación del aire para optimizar el confort ambiental de los estudiantes en las aulas de clase de los colegios urbanos de Bogotá [Artículo, Universidad El Bosque]. Alisio. Calidad del exterior al interior. Repositorio institucional <https://repositorio.unbosque.edu.co/handle/20.500.12495/2243#:~:text=El%20proyecto%20busca%20desarrollar%20un,criterio%20de%20fuentes%20vehiculares%20e>
- Callejas, D.; Anzules, J.; Urdaneta, J. & Sánchez, J. (2022). Virus Respiratorios. Principales vías de transmisión entre humanos y grado de infectividad. *GICOS: Revista del Grupo de Investigación en Comunidad y Salud*. 7(2), 53-65. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8546483>

- Cavasassi, J. (25 de Septiembre de 2022). Sensor infrarrojo de CO₂, no dispersivo de doble canal. Cavadevices.com.
<https://cavadevices.com/archivos/FOLLETOS/SENSOR%20NDIR%20CO2.pdf>
- Cedeño, M.; Solano, T.; Mora, D.; Chen, M. (2022). Evaluación del desempeño de sistemas de ventilación en salones de clase: Estudio numérico en edificios universitarios en Panamá. Scielo. Revista Digital Novasinerгия. 5(1) 100-127.
http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2631-26542022000100100&lng=es&nrm=i
- Center for Systems Science and Engineering (CSSE). (2021). COVID-19 Dashboard. by The Center for Systems Science and Engineering (CSSE) at Johns Hopkins University (JHU).
<https://www.arcgis.com/apps/dashboards/bda7594740fd40299423467b48e9ecf6>
- Cervera Quintero, J. P. (2021). Conectividad de Internet en Colombia y su relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (2015-2020). Ciencia y Poder Aéreo. 16(1). 39-54.
<https://publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderaereo/article/view/705>
- Crespi Rotger, S., & Ordóñez Iriarte, J. M. (2022). La relevancia de la higiene del aire: una urgencia tras la pandemia de la COVID-19. Revista de Salud Ambiental. Sociedad española de salud ambiental. 22(1). 81-90. <https://ojs.diffundit.com/index.php/rsa/article/view/1153>
- Dagnino, J. (2014). Análisis de varianza. Bioestadística y Epidemiología. Revista chilena de anestesia. 43(4). 306-310. <https://revistachilenadeanestesia.cl/analisis-de-varianza/>
- Díaz Córdoba, L. M., & Castro Franco, J. V. (2020). Influencia de la ansiedad en el rendimiento académico de estudiantes universitarios. [Trabajo de grado, Universidad Cooperativa de Colombia]. Repositorio institucional.
https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/18306/3/2020_ansiedad_rendimiento_academico.pdf
- Freund, J., & Simon, G. (1994). Estadística Elemental. Pearson Educación.
<https://books.google.com.co/books?id=iBJstvwFrYC>
- García Muñoz, I. (2022). Optimización de las estrategias de ventilación natural, frente a la concentración de patógenos, en el interior de un edificio educacional [Tesis master, Universidad politécnica de Madrid]. Repositorio institucional.
https://oa.upm.es/71479/1/TFM_Irene_Garcia_Munoz.pdf

- Gasteiz, V. (8 de junio de 2021). Recomendaciones para la reducción de la transmisión del SARS-CoV2 por aerosoles y control de la ventilación. https://www.euskadi.eus/contenidos/informacion/covid_ventilacion/es_def/adjuntos/recomendaciones-transmision-aerosoles.pdf
- González González, P. (Junio de 2021). Análisis de las condiciones ambientales de centros educativos del área mediterránea en tiempos de COVID-19 [Trabajo de grado, Escuela técnica superior de arquitectura de Sevilla]. Repositorio institucional. <https://idus.us.es/handle/11441/126852>
- Hornero Pérez, R. (2013). Estudio de la ventilación natural de un edificio y su efecto en el grado de confort de los ocupantes [Tesis master, Universitat politecnica de Catalunya]. Repositorio institucional. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/18512?locale-attribute=es>
- Huguet Pané, G. (2020). Grandes pandemias de la historia. National Geographic. https://historia.nationalgeographic.com.es/a/grandes-pandemias-historia_15178
- Hussin et al, M. (2017). Air-conditioned university laboratories: Comparing CO2 measurement for centralized and split-unit systems. Journal of king saud university - Engineering Sciences. 29(2). 191-201.
- IBM Cloud Pak for Data. (14 de 04 de 2021). Error absoluto promedio. IBM. <https://www.ibm.com/docs/es/cloud-paks/cp-data/3.5.0?topic=overview-mean-absolute-error>
- Jimenez Fernandez, A. F.; Trujillo Gutierrez, E. Y & Rodriguez, A.M. (2020). Efectos del confinamiento social en jóvenes universitarios en la ciudad de Santa Marta (Ansiedad) [Trabajo de grado, Universidad cooperativa de Colombia]. Repositorio institucional. <https://repository.ucc.edu.co/handle/20.500.12494/32618>
- Jones, E.; Young, A.; Clevenger, K. & Salimifard, P (2020). Healthy schools: risk reduction strategies for reopening schools. Harvard Th Chan School of Public Health. Healthy Buildings. <https://sites.lafayette.edu/potterjd/files/2021/09/FULL-Harvard-Healthy-Buildings-Program-COVID19-Risk-Reduction-in-Schools-Nov-2020.pdf>
- Lay Chiong, M.; Leisewitz Velasco, A.; Márquez Romegialli, F.; Vironneau Janicek, L.; Álvarez Santana, M.; Tischler, N.; Piñones Olmos, O. & Moreno Mauro, R. (2018). Manual de

- normas de bioseguridad y riesgos asociados. Fondecyt-CONICYT. https://www.conicyt.cl/fondecyt/files/2018/06/Manual-_Bioseguridad-_junio_2018.pdf
- Li, X.; Xu, W.; Dozier, M.; He, Y.; Kirolos, A.; Lang, Z.; Song, P. & Theodoratou, E. (2020). The role of children in the transmission of SARS-CoV2: updated rapid review. *Journal of Global Health*. 10(2). <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7719356/#:~:text=A%20family%2Dbase%20study%20involving,5%2C7%2D13%5D>.
- Li, C., & Tang, H. (2021). Study on ventilation rates and assessment of infection risks of COVID-19 in an outpatient building. *Journal of Building Engineering*. 42(1). <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8352663/#:~:text=Infection%20risks%20in%20the%20outpatient,i.e.%2C%20less%20than%200.06%25>.
- Mares Rodríguez, A.; Flores Serrano, R.M. & González Sánchez, A. (2022). Estimación del aforo en un salón de clases según su tamaño y capacidad de ventilación en tiempos de pandemia por el coronavirus SARS-CoV-2. *Revista Salud Ambiental. Sociedad española de salud ambiental*. 22(1). 91-99. <https://ojs.diffundit.com/index.php/rsa/article/view/1151>
- Matos Alviso, L.J.; Reyes Gómez, U.; Coria Lorenzo, J.J.; Caballero Noguez, B.; Espinoza Sotero, M.; Pérez Pacheco, O.; Reyes Hernández, K.L.; Aguilar Figueroa, E.S.; Candelas Delgado, E. & Soria Saavedra, F.M. (2020). Los aerosoles humanos principal mecanismo de transmisión del nuevo SARS-CoV-2.. *Rev Enferm Infecc Pediatr* 2021;33(135):1809-15. [https://eipediatria.com/num_ants/enero-marzo-2021/03%20Matos%20Alviso%20LJ%20Re%20Enferm%20Infecc%20Pediatr%202021%2033\(135\)1809%2015.pdf](https://eipediatria.com/num_ants/enero-marzo-2021/03%20Matos%20Alviso%20LJ%20Re%20Enferm%20Infecc%20Pediatr%202021%2033(135)1809%2015.pdf)
- Ministerio de educación de Colombia (MinEducación). (Junio de 2020). Lineamientos para la prestación del servicio de educación en casa y en presencialidad bajo el esquema de alternancia y la implementación de prácticas de bioseguridad en la comunidad educativa. MinEducación. https://www.mineduacion.gov.co/1780/articles-399094_recurso_1.pdf
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2021). COVID-19 en Colombia. Instituto Nacional de Salud. <https://www.ins.gov.co/Noticias/paginas/coronavirus.aspx>
- Müller Plotnikow, S. (2020). OMS ¿Qué es una emergencia sanitaria internacional? *Emergencia Sanitaria Internacional*, DW made for minds. <https://www.dw.com/es/oms-qu%C3%A9-es-una-emergencia-sanitaria-internacional/a-52217051>

- OCDE. (21 de abril de 2020). Medidas políticas clave de la OCDE ante el coronavirus (COVID-19) Salud Ambiental y resiliencia ante las pandemias. OCDE. <https://www.oecd.org/coronavirus/policy-responses/salud-ambiental-y-resiliencia-ante-las-pandemias-3788e625/>
- Ortega García, J. A. (23 de julio de 2020). COVID-19 un contaminante, un enfoque desde la salud medioambiental para reducir la transmisión de Sars- CoV2. Environment and human health lab. Pediatric enviromental health speciality unit murcia. https://pehsu.org/wp/wp-content/uploads/COVID19_flota_enel_aire.pdf
- Pastor Pérez, P. (18 de mayo de 2022). Transmisión de enfermedades infecciosas en interiores: Monitorizar para prevenir. Revista de Salud Ambiental. Sociedad española de salud ambiental. 22. 74-143. <https://ojs.diffundit.com/index.php/rsa/article/view/1215>
- Peng, Z., & Jimenez, J. L. (2021). Exhaled CO₂ as a COVID-19 infection risk proxy for different indoor environments and activities. Environmental Science and Technology Letters, 8(5) 392-397. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.estlett.1c00183>
- Quadri, N. (2001). Sistemas de Aire Acondicionado. Librería y Editorial Alsina. Ed. 1. <https://www.studocu.com/es-ar/document/universidad-tecnologica-nacional/instalaciones-termomecanicas/sistemas-de-aire-acondicionado-nestor-quadri/5221370>
- Rodriguez Morales, A. J.; Bonilla Aldana, K.; Tiwari, R.; Sah, R.; Raaban, A. A. & Dharma, K. (2020). Covid-19, an emerging coronavirus infection: Current scenario and recent developments An overview. Journal of Pure and Applied Microbiology. 14 (1). 5-12. <https://microbiologyjournal.org/covid-19-an-emerging-coronavirus-infection-current-scenario-and-recent-developments-an-overview/>
- Rodriguez Morales, A. J.; Sánchez Duque, J. A.; Hernandez Botero, S.; Pérez Díaz, C. E.; Villamil Gómez, W. E.; Méndez, A.; Verbanaz, S.; Cimerman, S.; Rodriguez Enciso, H. D.; Escalera Antezana, J. P.; Balbin Ramon, G. J.; Arteaga Livias, K.; Cvetkovic Vega, A.; Orduna, T.; Savio Larrea, E. & Paniz Mondolfi, A. (2020). Preparación y control de la enfermedad por coronavirus 2019 (COVID-19) en América Latina. Scielo. Acta médica peruana. 37(1). 3-7. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1728-59172020000100003

- Rodriguez Villamizar, L. A.; Rojas, N. Y.; Agudelo Castañeda, D. M.; Pachón, J. E. & Ramirez, O. (16 de julio de 2021). Guía para la evaluación de la ventilación y el monitoreo de CO₂ en el marco del retorno escolar en modalidad de alternancia en Colombia. Nodo de salud ambiental y ocupacional (SAO) Colombia. <https://nodosacolombia.com/wp-content/uploads/2021/06/2021-Gui%CC%81a-evaluacio%CC%81n-ventilacio%CC%81n-y-monitoreo-CO2-entornos-educativos.pdf>
- Romero Sedó, A.; Arrué Burillo, P.; Aparicio Fernández, C. & Iborra Lucas, M. (2021). Diagnóstico de la ventilación natural, concentración de CO₂, temperatura y humedad relativa de un aula docente con motivo del SARS-CoV-2. Caso de las aulas de la ETSIE de la UPV. I Congreso de escuelas de edificación y arquitectura técnica de España. Universitat Politècnica de Valencia. <https://riunet.upv.es/handle/10251/183825>
- Sampieri, R. (2018). Metodología de la Investigación. McGraw-Hill Interamericana. <https://books.google.com.co/books?id=5A2QDwAAQBAJ>
- Simanic, B.; Nordquist, B.; Bagge, H. & Johansson, D. (2019). Indoor air temperatures, CO₂ concentrations and ventilation rates: Long-term measurements in newly built low-energy schools in Sweden. Journal of Building Engineering. 25(1). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710219303407>
- Valderas Castilla, D. (2022). Determinación de la correcta renovación de aire en las aulas mediante medición de dióxido de carbono. Revista científica del CODEM. 5(17). 49-65. <https://www.conocimientoenfermero.es/index.php/ce/article/view/213>
- Van Doremalen, N.; Morris, D. H.; Holbrook, M. G. & Williamson B. N. (18 de marzo de 2020). Aerosol y estabilidad en superficies del SARS-CoV-2 en comparación con el SARS-CoV-1. New England Journal of Medicine. 10(1). <https://instituciones.sld.cu/cimeq/2020/03/18/aerosol-y-estabilidad-en-superficies-del-sars-cov-2-comparado-con-el-sars-cov-1/>
- Vargas Marcos, F.; Caballo Dieguez, C.; García San Miguel, L. & Sierra Moros, M. J. (18 de noviembre de 2020). Evaluación del riesgo de la transmisión de SARS-CoV-2 mediante aerosoles. Medidas de prevención y recomendaciones. Gobierno de España. https://www.sanidad.gob.es/profesionales/saludPublica/ccayes/alertasActual/nCov/documentos/COVID19_Aerosoles.pdf

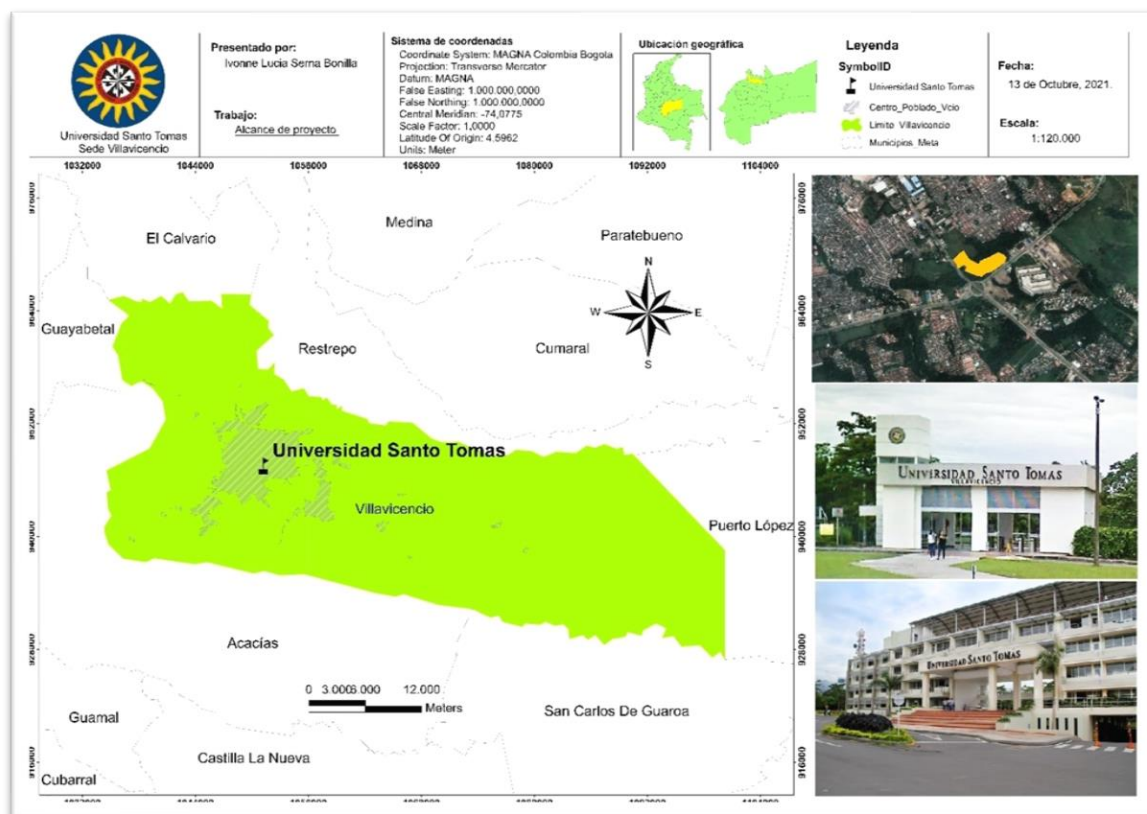
- Wu, X.; Nethery, R. C.; Sabbath, B. M.; Braun, D. & Dominici, F. (2020). Exposure to air pollution and COVID-19 mortality in the United States: A nationwide cross-sectional study. medrxiv. 45(2) 2-30. <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.04.05.20054502v2>
- Zivelonghi, A., & Lai, M. (2021). Mitigatin aerosol infection risk in school buildings: the role of natural ventilation, volume, occupancy and CO2 monitoring. Building and Environment. 204(1). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132321005400>

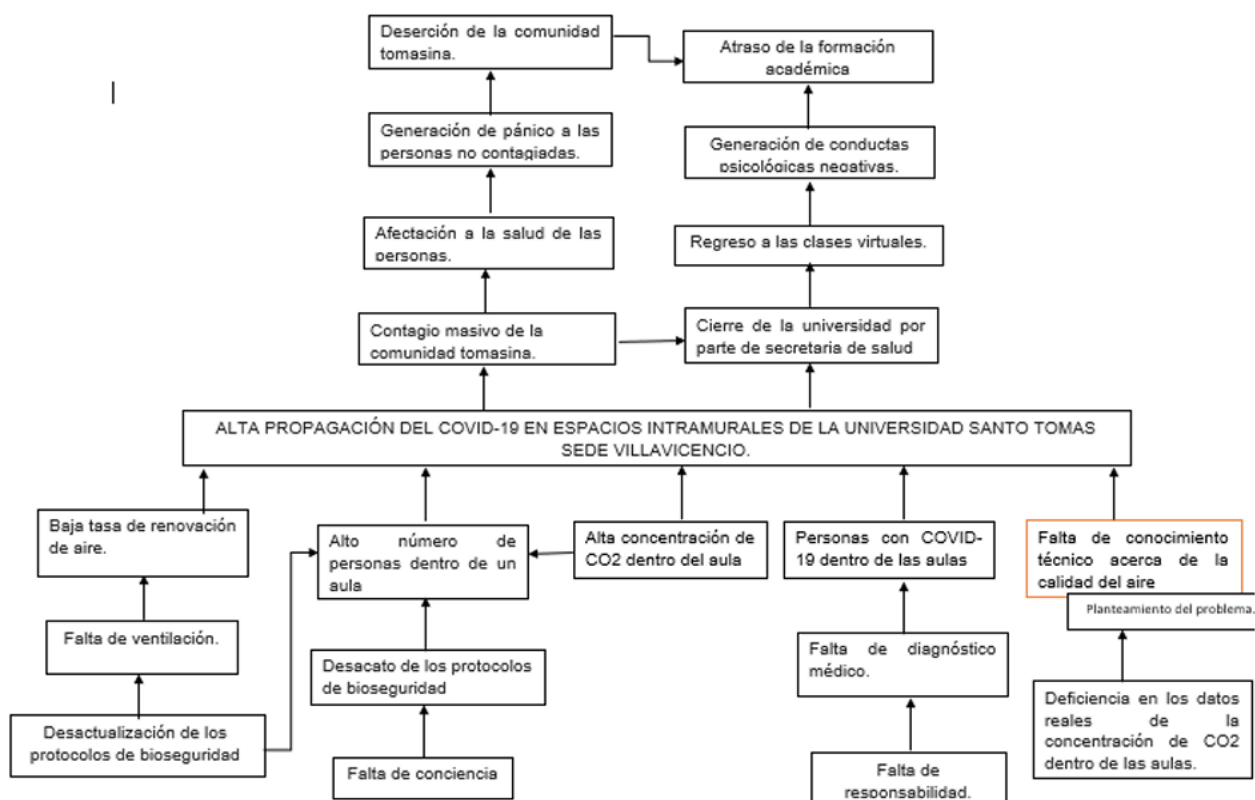
Anexos

Los anexos relacionados a la investigación van en relación al mapa del área de estudio, planteamiento del problema y mediciones en las aulas de clase.

Anexo 1.

Mapa de ubicación del lugar de estudio.



Anexo 2.*Árbol de problemas.*

Anexo 3.*Grado de precisión por Error Absoluto Medio.*

Aula	CO ₂ observado	CO ₂ predicho	Diferencia	Error Absoluto Medio	
1	495,45	490	5,45	5,448218777	4,840946127
2	452,07	452	0,07	0,066815398	
3	452,72	460	-7,28	7,275890611	
201A	535,57	536	-0,43	0,425463032	
202A	663,60	659	4,60	4,598222707	
203A	493,44	487	6,44	6,439289113	
204A	468,03	470	-1,97	1,965418945	
205A	514,65	512	2,65	2,645447474	
301A	632,28	638	-5,72	5,718001736	
302A	556,23	563	-6,77	6,770098897	
303A	632,28	640	-7,72	7,718001736	
304A	492,61	489	3,61	3,608082513	
305A	495,45	501	-5,55	5,551781223	
401A	571,26	580	-8,74	8,737527773	
402A	452,21	452	0,21	0,20696804	
403A	537,75	530	7,75	7,745300586	
404A	484,34	493	-8,66	8,659144009	
405A	503,56	507	-3,44	3,442502223	
501A	462,15	466	-3,85	3,850444305	
502A	462,76	470	-7,24	7,24128995	
503A	702,46	692	10,46	10,45980221	
504A	618,15	621	-2,85	2,845603225	

Anexo 3.*Continuación.*

Aula	CO₂ observado	CO₂ predicho	Diferencia	Error Absoluto Medio
201B	468,0345811	467	1,03	1,034581055
202B	478,5863231	485	-6,41	6,413676936
203B	539,4534109	548	-8,55	8,546589094
204B	472,1638635	477	-4,84	4,836136465
205B	461,9763877	456	5,98	5,976387654
301B	544,688371	538	6,69	6,688370992
302B	468,0345811	464	4,03	4,034581055
303B	473,520681	466	7,52	7,520681022
304B	473,520681	470	3,52	3,520681022
305B	462,9339009	457	5,93	5,933900852
401B	492,8851514	486	6,89	6,88515138
402B	482,7669427	484	-1,23	1,233057285
403B	472,3716652	473	-0,63	0,628334815
404B	472,1638635	464	8,16	8,163863535
405B	489,1380651	492	-2,86	2,861934926
501B	468,0345811	465	3,03	3,034581055
502B	452,206968	447	5,21	5,20696804
503B	452,3471207	452	0,35	0,347120681
504B	473,520681	480	-6,48	6,479318978
505B	539,8804385	545	-5,12	5,119561514