



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



**MODELO MATEMÁTICO DEL COMPORTAMIENTO TEMPORAL DEL CO₂
GENERADO POR RESPIRACIÓN EN AULAS DE CLASE**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA:

HECTOR JESÚS DE LA CRUZ HERRERA

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

MIPA. SERGIO RAMOS HERRERA

VILLAHERMOSA, TABASCO. FEBRERO DE 2026

Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Villahermosa, Tabasco, el día **01 de diciembre de 2025**, el que suscribe **Hector Jesús de la Cruz Herrera** alumno del Programa de Lic. **Ingeniería Ambiental** con número de matrícula **202G24038** adscrito a la **División Académica de Ciencias Biológicas** de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autor de la Tesis presentado para la obtención del título de **Licenciatura en Ingeniería Ambiental**, titulado **"MODELO MATEMÁTICO DEL COMPORTAMIENTO TEMPORAL DEL CO₂ GENERADO POR RESPIRACIÓN EN AULAS DE CLASE"** dirigido por el MPA. **Sergio Ramos Herrera**.

DECLARO QUE:

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita.

Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentado de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

Villahermosa, Tabasco a **01 de diciembre de 2025**.



Hector Jesús de la Cruz Herrera



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



2020
de
Margarita
Maza

**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN**

Villahermosa, Tab., a 23 de Enero de 2026

ASUNTO: Autorización de Modalidad de Titulación

**C. LIC. MARIBEL VALENCIA THOMPSON
JEFE DEL DEPTO. DE CERTIFICACIÓN Y TITULACION
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES
P R E S E N T E**

Por este conducto y de acuerdo a la solicitud correspondiente por parte del interesado, informo a usted, que en base al reglamento de titulación vigente en esta Universidad, ésta Dirección a mi cargo, autoriza al **C. HECTOR JESÚS DE LA CRUZ HERRERA** egresada de la Lic. en **ING. AMBIENTAL** de la División Académica de **CIENCIAS BIOLÓGICAS** la opción de titularse bajo la modalidad de Tesis denominado: **"MODELO MATEMÁTICO DEL COMPORTAMIENTO TEMPORAL DEL CO₂ GENERADO POR RESPIRACIÓN EN AULAS DE CLASE"**.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para saludarle afectuosamente. **UJAT**

A T E N T A M E N T E


**DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR DE LA DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**



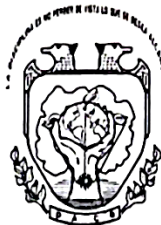
DIRECCIÓN

C.c.p.- Expediente Alumno de la División Académica
C.c.p.- Interesado



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



2020
Margarita
Maza

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN

ENERO 23 DE 2026

**C. HECTOR JESÚS DE LA CRUZ HERRERA
PAS. DE LA LIC. EN ING. AMBIENTAL
P R E S E N T E**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 111 al 113 del Cap. IV del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis denominado: **"MODELO MATEMÁTICO DEL COMPORTAMIENTO TEMPORAL DEL CO₂ GENERADO POR RESPIRACIÓN EN AULAS DE CLASE"**, asesorado por el MIPA. Sergio Ramos Herrera, sobre el cual sustentará su Examen Profesional, cuyo jurado está integrado por el MIA. Jesús Manuel Carrera Velueta, Dr. José Ramón Laines Canepa, MIPA. Sergio Ramos Herrera, M. en C. Adolfo Alan Sánchez Vázquez y Dra. Verónica Isidra Domínguez Rodríguez.

A T E N T A M E N T E
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE

DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR

UJAT
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



DIRECCIÓN

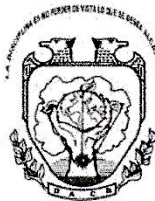
C.c.p.- Expediente del Alumno.
Archivo.





**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



2025
AÑO DE LA
Mujer
Indígena

**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN**

1 de diciembre de 2025

C. HECTOR JESÚS DE LA CRUZ HERRERA
Pasante de la Lic. en Ingeniería Ambiental

En cumplimiento de los lineamientos de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, se implementó la revisión del trabajo recepcional (**Tesis**), a través de la plataforma Turnitin iThenticate para evitar el plagio e incrementar la calidad en los procesos académicos y de investigación en esta División Académica. Esta revisión se realizó en correspondencia con el Código de Ética de la Universidad y el Código Institucional de Ética para la Investigación.

Por este conducto, hago de su conocimiento las observaciones, el índice de similitud y el reporte de originalidad obtenido a través de la revisión en la plataforma iThenticate de su trabajo recepcional **MODELO MATEMÁTICO DEL COMPORTAMIENTO TEMPORAL DEL CO₂ GENERADO POR RESPIRACIÓN EN AULAS DE CLASE.**

OBSERVACIONES:

Se incluyó citas, se excluyó bibliografía y fuentes pequeñas (< 10 palabras), y se limitó el tamaño de coincidencias a 16 palabras.

RESULTADO DE SIMILITUD	2 %
	13076 palabras, 47 páginas

Finalmente, se les solicita a la **C. HECTOR JESÚS DE LA CRUZ HERRERA**, integrar en la versión final del trabajo recepcional, este oficio y el informe de originalidad con el porcentaje de similitud de Turnitin iThenticate.

Sin otro particular al cual referirme, aprovecho la oportunidad para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"

DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR

UJAT
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



DIRECCIÓN

C.c.p. MIPA. Sergio Ramos Herrera
C.c.p. Archivo

HECTOR JESÚS DE LA CRUZ HERRERA

MODELO MATEMÁTICO DEL COMPORTAMIENTO TEMPORAL DEL CO2 GENERADO POR RESPIRACIÓN EN AULAS DE CLASE

 Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:548442184

Fecha de entrega

22 ene 2026, 2:37 p.m. GMT-6

Fecha de descarga

22 ene 2026, 2:47 p.m. GMT-6

Nombre del archivo

Hector J. De la Cruz Herrera_TR Tesis.pdf

Tamaño del archivo

930.2 KB

52 páginas

13.732 palabras

69.728 caracteres

1% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Coincidencias menores (menos de 16 palabras)
- Abstract
- Trabajos entregados

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 1%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión



Caracteres reemplazados

24 caracteres sospechosos en N.º de páginas

Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Fuentes principales

1%	 Fuentes de Internet
0%	 Publicaciones
0%	 Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	
sensorgo.mx		<1%
2	Internet	
www.mtas.es		<1%
3	Internet	
lavozdelpitic.com		<1%
4	Internet	
administrativos.ut.edu.co		<1%
5	Internet	
www.coursehero.com		<1%
6	Internet	
1library.co		<1%
7	Internet	
lookformedical.com		<1%
8	Internet	
www.clubensayos.com		<1%

Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco a 01 de diciembre de 2025.

Por medio de la presente manifiesto haber colaborado como AUTOR en la producción, creación y/o realización de la obra denominada **MODELO MATEMÁTICO DEL COMPORTAMIENTO TEMPORAL DEL CO2 GENERADO POR RESPIRACIÓN EN AULAS DE CLASE** Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un período de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

COLABORADORES

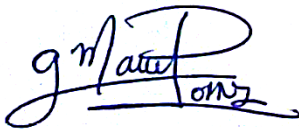


Hector Jesus de la Cruz Herrera



MIPA Sergio Ramos Herrera

TESTIGOS



Mairé Paulina Torres García



Moises Vallejo Gómez •



ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	13
Palabras clave	13
ABSTRACT	14
Key words	14
1. INTRODUCCIÓN	15
2. JUSTIFICACIÓN	16
3. OBJETIVOS	17
3.1 General	17
3.2 Específicos	17
4. ANTECEDENTES	18
5. MARCO TEÓRICO	25
5.1 Dióxido de carbono (CO ₂)	25
5.2 Parámetros meteorológicos básicos	27
5.3 Arduino y escudos	29
5.4 Sensores	32
6. METODOLOGÍA	34
6.1 Área de estudio	34
6.2 Desarrollo del modelo matemático teórico de la concentración temporal de CO ₂	34
6.3 Generación de datos de concentración de CO ₂	38
6.4 Desarrollo del modelo empírico de la concentración temporal de CO ₂	40
6.5 Desarrollo de un dispositivo electrónico que genere datos de CO ₂	41



6.6 Programación de un código de Arduino IDE para el uso del sensor MHZ-19C	44
7. RESULTADOS	46
7.1 Resultados de los modelos matemáticos de CO ₂ basados en la ecuación de balance de masa.	46
7.2 Resultados de los modelos empíricos para la concentración de CO ₂	49
7.3 Calibración del sensor MH-Z19C	53
8. DISCUSIÓN	55
9. CONCLUSIONES	56
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Ejemplo de ecuaciones para la estimación de la tasa metabólica basal.</i>	21
Tabla 2. <i>Efectos del CO₂ a la salud</i>	26
Tabla 3. <i>Hardware requerido para desarrollar un sistema de adquisición y visualización de datos de bajo costo</i>	42
Tabla 4. <i>Conexión de LCD 16x2 a Arduino UNO</i>	42
Tabla 5. <i>Conexión de MH-Z19C a Arduino UNO</i>	42
Tabla 6. <i>Conexión de DHT22 a Arduino UNO</i>	42
Tabla 7. <i>Código de Arduino para obtener datos de CO₂, temperatura y humedad de los sensores MH-Z19C y DHT22 con el programa Arduino Live Serial</i>	44
Tabla 8. <i>Datos de los estudiantes de la clase de Monitoreo Atmosférico</i>	46
Tabla 9. <i>Datos de los estudiantes de la clase de Termodinámica</i>	47
Tabla 10. <i>Modelos teóricos del comportamiento temporal de la concentración de CO₂ de la clase de Monitoreo Atmosférico en el aula D07</i>	48
Tabla 11. <i>Modelos teóricos del comportamiento temporal de la concentración de CO₂ de la clase de Termodinámica en el aula D10 y D07</i>	48
Tabla 12. <i>Resultados obtenidos del modelo empírico</i>	51
Tabla 13. <i>Desviación media absoluta de la tasa de generación total de CO₂ teórica y observada</i>	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Tarjeta Arduino Uno</i>	30
Figura 2. <i>Shield datalogger V1.0</i>	30
Figura 3. <i>Pantalla LCD I2C 16x2</i>	31
Figura 4. <i>Mini Protoboard</i>	31
Figura 5. <i>Sensor MH-Z19C</i>	32
Figura 6. <i>Sensor DHT22</i>	33
Figura 7. <i>Diagrama electrónico del sistema de adquisición y visualización de datos con Arduino uno</i>	43
Figura 8. <i>Variación temporal del CO₂ durante las clases de Termodinámica entre las aulas D10 y D07</i>	50
Figura 9. <i>Variación temporal del CO₂ durante las clases de la materia de Monitoreo Atmosférico de 9-11 am en el aula D07</i>	50
Figura 10. <i>Relación de la concentración generada por el sensor MH-Z19C con respecto al sensor comercial, del día 02 de junio en la clase de Termodinámica (7-9 a.m.) y Monitoreo Atmosférico (9-11 a.m.)</i>	54



Resumen

El presente trabajo desarrolló un modelo matemático para la predicción del comportamiento del dióxido de carbono (CO₂) generado en el proceso de respiración por los estudiantes en dos aulas de clase. La investigación surgió de la necesidad de conocer el nivel de exposición que tienen alumnos y maestros a concentraciones de CO₂ al estar en horario de clases. El monitoreo se realizó con un detector comercial de la marca aqxreight que mide temperatura, humedad y concentraciones de CO₂ con una frecuencia de un minuto en días diferentes de clases. Con los datos obtenidos se ajustaron modelos empíricos de línea recta que surgió a partir de un balance de masa considerando a los estudiantes como fuente de emisión de CO₂ y un aula de clases hermética. Estos modelos empíricos se compararon con un modelo teórico del mismo tipo donde la tasa de generación de CO₂ se estimó matemáticamente a partir de la edad, sexo, estatura y masa corporal del estudiante. En los resultados se encontró que la tasa de generación de CO₂ per-cápita con el modelo matemático para hombre es en promedio 0.301 L/min y para mujeres 0.251 L/min. Sin atender el sexo, la tasa de generación promedio teórica fue de 0.277 L/min. Usando los datos medidos de CO₂, la tasa de generación per cápita promedio fue de 0.290 L/min-per, que equivalió a 2.285 ppm/min-per. La desviación media absoluta entre la tasa per-cápita estimada matemáticamente y con los datos de CO₂ fue de 4.851 ppm/min. En este trabajo, también se desarrolló un dispositivo para medir CO₂, temperatura y humedad con los sensores MH-Z19C y DHT22 controlados por una tarjeta Arduino Uno con el objetivo de contar a futuro con dispositivos económicos para monitorear CO₂ como parte de actividades educativas o estudios del comportamiento de este gas en espacios cerrados.

Palabras clave

Dióxido de carbono, modelo matemático, sensor, tasa de generación, nivel de exposición.



Abstract

This study developed a mathematical model to predict the behavior of carbon dioxide (CO₂) generated during respiration by students in two classrooms. The research arose from the need to determine the level of exposure of students and teachers to CO₂ concentrations during class hours. Monitoring was carried out using a commercial aqxreight detector that measures temperature, humidity, and CO₂ concentrations at one-minute intervals on different school days. The data obtained was used to adjust empirical straight-line models based on a mass balance considering the students as a source of CO₂ emissions and a sealed classroom. These empirical models were compared with a theoretical model of the same type where the CO₂ generation rate was estimated mathematically based on the student's age, sex, height, and body mass. The results showed that the per capita CO₂ generation rate using the mathematical model for men is on average 0.301 L/min and for women 0.251 L/min. Regardless of gender, the average theoretical generation rate was 0.277 L/min. Using the measured CO₂ data, the average per capita generation rate was 0.290 L/min-per, which was equivalent to 2.285 ppm/min-per. The mean absolute deviation between the mathematically estimated per capita rate and the CO₂ data was 4.851 ppm/min. In this work, a device was also developed to measure CO₂, temperature, and humidity using MH-Z19C and DHT22 sensors controlled by an Arduino Uno board with the aim of having inexpensive devices in the future to monitor CO₂ as part of educational activities or studies of the behavior of this gas in enclosed spaces.

Key words

Carbon dioxide, mathematical model, sensor, generation rate, exposure level.



1. INTRODUCCIÓN

La pandemia de SARS-CoV-2 (COVID-19) dejó en evidencia la importancia de la ventilación de espacios ocupados con personas. Cuando hay muchas personas y el espacio interior no está bien ventilado, hay un riesgo muy alto de contagio y de propagación del virus de COVID-19 ya que las personas están más cerca unas de otras y el aire que comparten está más viciado. Por tal motivo, durante la pandemia de COVID-19, una buena ventilación fue una de las medidas claves sugeridas para reducir la propagación del virus, ya que se recircula el aire interior contaminado por aire fresco proveniente del exterior. Algunas medidas simples sugeridas para una buena ventilación son abrir puertas y ventanas, utilizar ventiladores para mejorar el flujo de aire y limitar el número de ocupantes en un mismo espacio (CDC, 2023).

Una persona emite CO₂ de forma natural cuando respira, sin importar que actividad esté realizando, incluso lo emite cuando duerme. Cuando el espacio tiene poca o nula ventilación, la concentración de este gas puede llegar hasta niveles muy elevados. En un espacio cerrado, las concentraciones de CO₂ no deben superar las 1000 ppm. Cuando la concentración supera ese valor, las personas en el interior pueden experimentar diversos efectos a la salud en menor o mayor grado que también depende de su condición de salud. Por ejemplo, en casos extremos es posible experimentar asfixia e inclusive la muerte si la exposición a concentraciones de CO₂ es tan alta como 40000 ppm ya que el CO₂ puede desplazar el oxígeno en la sangre (IQ Air, 2021).

Este trabajo analizó el comportamiento temporal del CO₂ generado en el proceso natural de respiración de los estudiantes en el interior de las aulas de clase. Las mediciones se realizaron con un equipo comercial y un equipo que se diseñó y desarrolló con sensores de bajo costo (SBC) programados con Arduino. Se utilizó el sensor MH-Z19C para el monitoreo de CO₂, y el sensor DHT22 para el monitoreo de la temperatura (en °C) y humedad relativa (en %). El propósito principal de este trabajo fue desarrollar un modelo matemático que explique el comportamiento temporal de la concentración de



CO₂ dentro de un aula de clases ocupada. El trabajo también permitió conocer la concentración máxima durante sesiones de clases de dos horas.

Este trabajo tuvo lugar en la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBIOL) que pertenece a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT) en la Ciudad de Villahermosa, Tabasco, México. Los resultados sientan las bases para el monitoreo de CO₂ con SBC en el interior de aulas de clase. Los datos de medición generados en este trabajo están a disposición de la comunidad de la DACBIOL a través de una página web de acceso libre para su utilización en análisis estadísticos o de monitoreo de contaminantes.

2. JUSTIFICACIÓN

La calidad del aire en las aulas de clases es un factor importante para la salud, el confort y el desempeño de los estudiantes de la DACBIOL, siendo el CO₂ el principal indicador de una buena o mala ventilación. Aunque el CO₂ no es un contaminante, la exposición a concentraciones elevadas se vincula principalmente a una baja capacidad cognitiva y a efectos adversos a la salud de los estudiantes. Esta investigación pretende conocer los niveles de CO₂ que se presentan durante las horas de clase y generar modelos matemáticos para estimar la concentración de CO₂ en función a la cantidad de estudiantes presentes, su sexo, estatura, edad y masa corporal. La información permitirá evaluar indirectamente la calidad del aire. Los beneficiarios de este estudio son los estudiantes y personal académico que realizan sus actividades académicas en la DACBIOL y quienes son los que experimentan directamente las condiciones de la calidad del aire. Este enfoque sienta las bases para la implementación de medidas preventivas que puedan favorecer el bienestar de los ocupantes.



3. OBJETIVOS

3.1 General

- Desarrollar un modelo matemático que explique el comportamiento temporal de la concentración de CO₂ dentro de un aula de clases ocupada por estudiantes de universitarios.

3.2 Específicos

- Desarrollar un modelo matemático teórico que explique el comportamiento temporal del CO₂ generado por respiración humana en un aula ocupada.
- Generar datos de la concentración de CO₂ en función del tiempo en dos aulas de clase y utilizarlos para obtener un modelo empírico que explique el comportamiento temporal del CO₂ generado por la respiración humana en las aulas de clase.
- Desarrollar un dispositivo electrónico de bajo costo que contribuya a la generación de datos de CO₂.



4. ANTECEDENTES

Una de las razones por la que se ha dado importancia al estudio de la calidad del aire en espacios cerrados es porque las personas pasan entre el 80% y el 90 % de su tiempo diario en estos. (US EPA, 2024). En el contexto internacional, las investigaciones han demostrado que la calidad del aire en interiores tiene un impacto directo en la salud de las personas y esto ha motivado el estudio de la calidad del aire interior y confort higrotérmico. Por ejemplo, González et al. (2020) realizaron un estudio en Navarra, España, de la calidad del aire en tres tipos de espacios interiores: edificio de oficinas, escuela infantil y vivienda rehabilitada. Estos autores utilizaron como equipo de monitoreo un detector llamado MICA (Medidor Inteligente de la Calidad del Aire) que es un dispositivo comercial desarrollado por *inBiot Monitoring S.L* que mide y monitoriza temperatura, humedad relativa, CO₂, TVOC, PM_{2.5}, PM₁₀ y el ruido. Los autores también crearon una plataforma en la nube, *My inBiot*, programada para analizar de forma automática los datos generados por MICA y generar propuestas de mejora de las condiciones higrotérmicas del espacio interior y la calidad del aire. Por ejemplo, en los edificios de oficinas, la humedad relativa fue inferior al 40% durante casi todo el tiempo de ocupación y después de analizar la información se sugirió colocar un humidificador evaporativo portátil, con capacidad de flujo de 1.5 a 2 L/h para mantener condiciones ideales de confort higrotérmico de 21 °C y 50 % de humedad. En la escuela infantil los niveles de CO₂ fueron mayores a las 800 ppm, que era más de lo deseable para tener buen confort, durante poco más de la mitad del tiempo que se realizó el estudio de monitoreo. Como mejora de la calidad del aire interior se integraron elementos naturales para aprovechar su capacidad de filtrar contaminantes en el interior por medio de la fitorremediación. Por último, el monitoreo en una vivienda rehabilitada mostró niveles altos de formaldehídos con máximos de 1000 µg/m³ con una media diaria de 150 µg/m³ y niveles de CO₂ inferiores a las 800 ppm. La OMS recomienda que la concentración de formaldehído debe ser menor o igual a 100 µg/m³ y algunas de sus fuentes son el humo de tabaco, limpiadores, barnices, de modo que conociendo las fuentes se puede disminuir su presencia en el aire.



Motivados por la importancia de disminuir el contagio de enfermedades respiratorias y las causadas por el COVID-19, Zemitis et al. (2021) realizaron un estudio sobre las concentraciones de CO₂ en salones de clases de una secundaria de Latvia, Letonia, durante la pandemia de COVID-19. Los salones de clases tenían dos ventanas, una puerta, un área de piso de 28 m² con una altura de 3.5 m. Normalmente estaban ocupados por 13 o 14 estudiantes cuyas edades oscilaban entre 17 y 18 años. Una medida de seguridad que se adoptó durante la pandemia fue que los estudiantes permanecieran en una sola aula de clases y que las puertas y ventanas permanecieran cerradas. El objetivo de los autores fue en parte demostrar que estas condiciones eran desfavorables, conducían a una mala ventilación y potencialmente a la transmisión de enfermedades infecciosas. Para ello realizaron monitoreos de CO₂ en diferentes días en por lo menos nueve salones de clase durante 2 semanas. El resultado fue que se observaron concentraciones promedio de CO₂ en general mayores a las 1000 ppm que es lo normalmente aceptado (Tillett, 2012). Incluso se dieron ocasiones en donde las concentraciones rebasaron las 4000 ppm que son el límite de detección de los sensores. Además, aplicaron una encuesta donde el 20 % de los estudiantes contestó haber experimentado dolores de cabeza mientras estaban en clase.

Pessaeg y Taire (2023) realizaron un estudio de la calidad del aire interior y el confort térmico en aulas educativas, en Puerto Madryn, Argentina. En este trabajo, utilizaron un medidor comercial marca Aranet4, que es un monitor inalámbrico con sensor autónomo, que monitorea concentraciones de CO₂ y que adicionalmente registra la temperatura, humedad relativa y presión atmosférica. El equipo fue colocado por los docentes en las aulas antes del ingreso de los alumnos, alejado de ventanas y respiración de las personas, a una altura de entre 1 y 1.5 metros para influir lo menos posible las lecturas del equipo. Las mediciones fueron realizadas en turnos de mañana (8 a 12 h) y de tarde (13 a 17 h). En su experimento utilizaron ventilación natural abriendo puertas y/o ventanas y analizaron el efecto en los niveles de CO₂. Por ejemplo, la concentración disminuyó a 800 ppm cuando se abrieron las ventanas y después las puertas del aula de clases. En otros casos descendió más de 2000 ppm al abrir puertas



y ventanas. En todos los casos, la concentración de CO₂ fue alta, hasta el orden de 3000 ppm, cuando el aula permaneció cerrada alrededor de tres horas. Este estudio muestra que la ventilación natural contribuye a reducir los niveles de CO₂ en espacios cerrados como las aulas de clases.

Según lo descrito, el CO₂ se ha usado como un indicador indirecto de la calidad del aire de espacios interiores ocupados. Esto se debe a que, altos niveles de CO₂ indican pobre ventilación de un espacio y esto puede conducir a una mala calidad del aire. Una de las fuentes de generación de CO₂ es la respiración humana, y en espacios cerrados donde se concentran muchas personas el nivel de CO₂ puede ser muy alto. Esto ha motivado metodologías para calcular la tasa de generación per cápita de CO₂. Persily y de Jonge (2017) desarrollaron una metodología para calcular la tasa de generación de CO₂ de un espacio interior ocupado utilizando la tasa metabólica basal y el nivel de actividad física de los ocupantes. Su intención fue aplicar estos conceptos en la ventilación de espacios ocupados y en la evaluación de la calidad del aire de interiores. En el enfoque actual (Ecuación 1) la tasa de generación de CO₂ (VCO₂) se calcula con base en la tasa metabólica del individuo (M), su superficie corporal (AD) y un cociente respiratorio (MQ) que depende de los cocientes de grasa, proteína y carbohidratos del individuo cuyo valor promedio sugerido es de 0.85. En el nuevo enfoque (Ecuación 2) el cálculo de la tasa de generación de CO₂ tomó en cuenta la tasa metabólica basal (BMR por sus siglas en inglés) de la persona combinada con su nivel de actividad física (M). Además, la tasa metabólica basal se calculó tomando en cuenta ahora la edad, el sexo de la persona y la masa corporal de la persona (m) (Ver tabla 1). Los autores también propusieron una ecuación adicional (Ecuación 3) para corregir por presión (P) y temperatura (T) la tasa de generación de CO₂ dada por la ecuación 2 ya que se considera a 101 KPa y 273 K.



$$V_{CO_2} = V_{O_2} \cdot RQ = \frac{0.00276 A_D M \cdot RQ}{(0.23RQ + 0.77)} \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$V_{O_2} = RQ \cdot BMR \cdot M \cdot 0.000569 \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$V_{O_2} = BMR \cdot M \left(\frac{T}{P} \right) \cdot 0.000179 \quad (\text{Ecuación 3})$$

Tabla 1.

Ejemplo de ecuaciones para la estimación de la tasa metabólica basal.

Edad	BMR: MJ/day	
	Hombre	Mujer
10 to 18	$0.074m + 2.754$	$0.056m + 2.898$
18 to 30	$0.063m + 2.896$	$0.062m + 2.036$
30 to 60	$0.048m + 3.653$	$0.034m + 3.538$

Fuente: Schofield WN (1985)

Medir siempre es lo recomendable para establecer los niveles máximos que un contaminante puede alcanzar en un espacio cerrado de interés, pero esto no siempre es factible, especialmente cuando se cuenta con poco recurso tanto económico como humano. Por esta razón, los investigadores tratan de desarrollar modelos matemáticos que expliquen de manera simple el comportamiento de un contaminante en un sistema ambiental. Majumdar y Chatterjee (2020) propusieron un modelo matemático para la predicción de la acumulación de CO₂ según el número de ocupantes en el interior. Dicho modelo les permitió estimar el tiempo necesario para alcanzar concentraciones de 2000 ppm de CO₂, nivel a partir del cual el CO₂ puede tener efectos a la salud humana. Este modelo evidenció la necesidad de limitar el número de personas en un espacio interior, para evitar las altas concentraciones de CO₂ y mejorar su ventilación. El modelo propuesto integró variables como el peso corporal, la altura, la actividad metabólica y el nivel MET (tasa metabólica en reposo) de los ocupantes para el cálculo de la tasa per



cápita de generación de CO₂. Tomando en cuenta variables como el volumen de la habitación y la cantidad de ocupantes los autores de este trabajo, estimaron el tiempo necesario para alcanzar niveles de CO₂ de 2000 ppm. En esta investigación, se estudiaron dos escenarios. En el primero, una persona de 65 kg y 1.7 m de altura está en reposo en una habitación de 12 x12x10 m³. En el otro escenario está la misma persona del escenario uno y otra persona con una masa corporal de 78 kg, altura de 1.9 m y está caminando a una velocidad de 0.9 m/s. En el primer escenario el tiempo para alcanzar la concentración de 2000 ppm fue de 4.38 h y en el segundo escenario fue de 1.31 h. El segundo escenario muestra lo importante que es considerar el volumen del espacio, la cantidad de personas y las actividades que realizan en el interior.

Debido al avance tecnológico, muchos investigadores han visto factible diseñar, desarrollar y calibrar su propio equipo con base en sensores de bajo costo y placas de desarrollo programables como Arduino o Raspberry Pi, entre otras. En este contexto, Vorobioff, et al. (2022) diseñaron y construyeron un monitor de CO₂ de espacios interiores ocupados. Como base utilizaron una placa de desarrollo Arduino mega y para la detección de CO₂ los sensores MG811 de gas electrolítico y MH-Z19C de gas infrarrojo. Estos sensores pudieron detectar CO₂ en el rango de 350 a 10000 ppm. Para calibrar el sensor MG811 utilizaron aire limpio con una concentración de 400 ppm de CO₂, en una habitación previamente ventilada y sin presencia de personas. En la calibración del sensor MH-Z19C se utilizó una mezcla sintética de aire con concentraciones de CO₂ de 400, 800, 1200 y 1600 ppm. Estas concentraciones se relacionaron con las lecturas de voltaje del sensor y con ayuda de un software se ajustaron las curvas de calibración correspondientes. Para verificar el desempeño de los sensores, hicieron pruebas de respiración humana con pausas de tres minutos y observaron buen comportamiento, es decir, los sensores reprodujeron bien las variaciones de la concentración. Como el desempeño del equipo fue satisfactorio, estos autores propusieron utilizarlo en las escuelas para crear una red de monitoreo de CO₂.



También se han realizado trabajos de investigación a nivel local en espacios interiores ubicados en la DACBIOL, incluso en una vivienda en particular. Matías-Velázquez y Torres-Cortés (2015) realizaron monitoreos de CO₂, temperatura, humedad relativa y partículas en sitios seleccionados de la DACBIOL. Estos sitios fueron cubículos, laboratorios, oficinas, aulas y auditorio. El objetivo de su investigación fue conocer los niveles de material particulado (PM₁₀) y de CO₂ interiores a los que se expone comúnmente la comunidad académica. En sus resultados, obtuvieron niveles promedios de CO₂ de 1798 ppm y de 35 µg/m³ de PM₁₀. El lugar con mayor exposición a estos contaminantes fue un cubículo de profesores donde se alcanzaron concentraciones de PM₁₀ entre 100 y 192 µg/m³, niveles que se relacionaron con actividades de limpieza. Estos autores, resaltaron la importancia que tiene en los niveles de concentración el diseño de los espacios, las fuentes interiores, actividades cotidianas interiores, además de otros factores externos.

Por otro lado, Espinoza-Contreras (2024) realizó un estudio del confort térmico y ventilación de una vivienda particular ubicada en Palenque, Chiapas. En su trabajo, programó y calibró un sensor MQ-135 para medir CO₂, un sensor DHT22 para registrar humedad relativa y temperatura, ambos programados con una placa Arduino uno. La frecuencia del monitoreo fue cada 3 minutos de manera continua durante los meses de mayo, junio y julio del año 2021. El objetivo de su trabajo fue evaluar los niveles de confort térmico y el grado de ventilación de una recámara y la cocina de la vivienda. Durante la investigación se encontró que la temperatura y humedad normalmente excedieron los niveles de confort que establece la ASHRAE. Con respecto al CO₂ sus pruebas determinaron que este indicador de ventilación excedió las 1000 ppm normalmente cuando las puertas y ventanas de su cocina y cuarto permanecieron cerradas.

Finalmente, Ramos-Pérez (2024) desarrolló una estación meteorológica de bajo costo con un sensor BME680 y la placa de desarrollo Arduino uno. La estación fue programada para medir la temperatura, humedad relativa y presión atmosférica cada minuto de manera continua y contar adicionalmente con un sistema de adquisición y



registro de datos con ayuda de un shield datalogger. En este mismo trabajo, desarrolló otro dispositivo semejante, donde sustituyó el shield datalogger por un módulo HC-05 que le permitió transmitir los datos vía Bluetooth a un dispositivo móvil con sistema Android. Con los datos registrados, el autor realizó una comparación entre su estación ubicado en la DACBIOL con otras dos estaciones de monitoreo de la ciudad de Villahermosa: una estación ubicada en el aeropuerto y otra en el centro de la ciudad. El monitoreo duró casi un año, empezando desde el mes de abril de 2023 hasta febrero de 2024. El análisis básico de los datos mostró que los promedios de la temperatura, humedad relativa y presión atmosférica en DACBIOL fueron de 29.7 °C, 79.9% y 1013 mbar respectivamente, durante el periodo de muestreo. La temperatura mensual fue máxima en el mes de junio con 32.8 °C y mínima en el mes de diciembre con 26.4 °C. La humedad promedio mensual, fue máxima en noviembre con 89.6% y mínima en abril con un valor de 67.4%. Uno de sus resultados significativos fue que la tendencia horaria de la temperatura, humedad relativa y presión atmosférica con los datos de la estación de bajo costo fue similar a la tendencia observada en las estaciones de referencia. Por tal motivo concluyó que la estación de bajo costo reproduce correctamente la tendencia horaria de presión, temperatura y humedad.



5. MARCO TEÓRICO

5.1 Dióxido de carbono (CO₂)

El CO₂ es un gas incoloro e inodoro, lo que lo hace imperceptible para el ser humano. Las concentraciones de CO₂ atmosférico han evolucionado a través de la historia. Antes de la revolución industrial, la concentración atmosférica era de unas 270 ppm. Actualmente en la atmósfera se superan las 400 ppm de concentración de CO₂ (IQAir Staff Writers, 2021).

El CO₂ se considera un gas de efecto invernadero y un indicador de ventilación y calidad del aire en espacio interiores ocupados. El CO₂ se forma en los procesos de combustión de materiales o sustancias que contienen carbono. En ambientes interiores sus principales fuentes de emisión son la respiración humana y el humo de cigarro. El CO₂ actúa como un asfixiante ya que su peso molecular (44 g/mol) es mayor al del aire (29 g/mol) y por consiguiente tiende a desplazar el oxígeno del aire. Además, concentraciones altas de CO₂, cercanas a 30 000 ppm (NIOSH, 2023) puede provocar dolor de cabeza, mareos, somnolencia y problemas respiratorios, aunque esto dependerá de la concentración y la duración de la exposición. En espacios como oficinas y escuelas, se pueden encontrar concentraciones de entre 2000 y 3000 ppm, niveles en los que se empiezan a sentir efectos a partir de los 1000-2000 ppm (EPA, 2018). La tabla 2 muestra de forma resumida los posibles efectos a la salud del CO₂.



Tabla 2. Efectos del CO₂ a la salud

Concentraciones en partes por millón (ppm)	Condiciones o efectos
350-450	Nivel de CO ₂ en aire exterior.
600-1000	Condiciones típicas en espacios cerrados bien ventilados.
1000-2000	Condiciones en entornos laborales y educativos, puede causar cansancio y menor capacidad de concentración.
2000-5000	Efectos a la salud (dolor de cabeza, fatiga, náuseas, falta de concentración, etc.)
5000	Este es el límite máximo permitido en entornos laborales de 8 horas.
30000	Después de 15 minutos, puede provocar mareos o dificultad para respirar.
+40000	Puede provocar pérdida del conocimiento, asfixia y la muerte.

Fuentes: ASHRAE (2019, 2022); EPA (2018); OSHA (2024); NIOSH (2023).

Cómo se mencionó anteriormente, una fuente de generación de CO₂ es la respiración humana. Cuando respiramos emitimos alrededor de 20 L/h de CO₂. Claro, esto depende del sexo de la persona, su masa corporal y el tipo de actividad que esté desempeñando. Dos parámetros básicos que necesitan conocerse para estimar la tasa de generación de CO₂ por respiración (TGR) son:

1. La BMR, que es el requerimiento energético esencial para mantener en funcionamiento nuestro cuerpo cuando se está acostado boca arriba. Existen ecuaciones para estimar la BMR promedio de una persona y estas ecuaciones están en función de la edad, el sexo y masa corporal de la persona. La unidad de la BMR es el MJ/d.
2. El nivel de actividad física de la persona cuantificado a través de la variable PAR o MET. El valor del PAR o MET puede obtenerse de tablas publicadas en línea o de la organización mundial de la salud y su unidad de medida es el MET.



5.2 Parámetros meteorológicos básicos

Temperatura

La temperatura es un parámetro físico relevante para evaluar el confort térmico ambiental tanto en interiores como en exteriores y está relacionada con el confort ambiental de las personas, incluso en espacios exteriores. En México, las unidades habituales para la temperatura son los grados Celsius (°C); sin embargo, la temperatura también puede expresarse en Fahrenheit (°F) o Kelvin (K).

Es habitual monitorear la temperatura y humedad relativa del aire exterior en una estación meteorológica, ya que la presencia de humedad en el ambiente hace que la sensación térmica que percibe una persona sea mayor a la temperatura que registra un termómetro. Datos de temperatura y humedad se pueden obtener de la página del Servicio Meteorológico Nacional a través de mapas o resúmenes mensuales. También se pueden obtener información histórica resumida a través de las normales climatológicas. Por ejemplo, gracias a la información que brinda esta página se determinó que, en 2024 en Villahermosa, Tabasco, de acuerdo con la base de datos de la estación 27054, la temperatura máxima extrema más alta, 44 °C, ocurrió en el mes de mayo (CONAGUA, 2025). Otras fuentes han señalado que, en México, el año 2024 fue el más caluroso. Incluso en este año, se presentaron olas de calor en los meses de mayo y junio donde las temperaturas máximas mensuales en el mes de mayo estuvieron en un rango de 30-35 °C en el norte del país, 25-35 °C en el centro del país y 35-40 °C en el sureste del país.

La OMS define la ola de calor como cinco o más días consecutivos en los que la temperatura máxima diaria supera la temperatura máxima promedio por 5 °C o más. La característica principal de este fenómeno podría ser por una baja humedad (que puede derivar a la sequía) o una alta humedad que pueden provocar deshidratación y por lo tanto golpe de calor (Rafferty & P, 2015). El golpe de calor es causado por la exposición constante a altas temperaturas y humedad. Las principales molestias de esta afección son el dolor de cabeza, náuseas, debilidad, confusión, pulso acelerado, entre otros (Rafferty & P, 2015).



Humedad relativa

Se le denomina humedad relativa a aquella cantidad de vapor de agua que se encuentra presente en el aire. Esta cantidad comúnmente se reporta en porcentaje y su rango va de 0 % a 100 %. El 0 % corresponde a aire seco y el 100 % a aire saturado totalmente de humedad. Por definición, el contenido de humedad del aire es la relación entre la cantidad de vapor de agua contenida en el aire y la cantidad de agua que puede albergar el aire a cierta temperatura. La humedad relativa es un parámetro relacionado al confort térmico en espacios interiores y es común recomendar que este parámetro esté entre 30 a 60 % en espacios interiores climatizados. Adicionalmente se sabe que una humedad alta deteriora productos, maquinaria e inmobiliario, al igual que afecta la productividad de los trabajadores (MKT, 2022).

Presión atmosférica

La presión atmosférica es aquella fuerza que ejerce el aire de la atmósfera sobre un objeto o individuo. El valor de esta fuerza se puede medir mediante instrumentos que se conocen como barómetros, que miden el peso del aire en el espacio. La presión atmosférica se puede calcular en diferentes unidades, como son los pascles (Pa), milímetros de mercurio (mm Hg), atmósferas (atm) y bar. La presión atmosférica solo varía con la altitud sobre el nivel del mar, de hecho, disminuye al aumentar la altitud. Por ejemplo, a nivel del nivel del mar su valor es de 101.325 Pa, que equivale a 760 mmHg o 1 atm (Young et al., 2009).



5.3 Arduino y escudos

Arduino

Arduino es una plataforma integral para el desarrollo de proyectos de electrónica. Arduino cuenta con un sistema basado en hardware y software libre con código abierto, lo que lo hace accesible para los usuarios. El hardware libre se refiere a aquellos dispositivos cuyas especificaciones y diagramas son de acceso público. Mientras tanto, el software libre se refiere a los programas informáticos cuyos códigos son accesibles para todos. La plataforma Arduino cuenta con el software Arduino IDE (Entorno de desarrollo integrado, por sus siglas en inglés) con el que se puede programar la tarjeta Arduino Uno y los sensores compatibles con esta tarjeta. (Arduino, 2025).

Tarjeta Arduino Uno

La figura 1 muestra una tarjeta Arduino uno que es comúnmente usada para desarrollar dispositivos en modo de prueba experimental. Esta tarjeta se puede emplear como el cerebro que controla una mano robótica, un dron o motores. Aunque tiene diversas aplicaciones, Arduino también se puede utilizar para el desarrollo de dispositivos electrónicos que utilizan sensores que miden algún parámetro ambiental en suelo, agua o aire. Los sensores tienen pines machos mientras que el Arduino viene habilitado con pines hembra de modo que la conexión de un sensor es fácil. La placa también contiene un conector USB esencial para conectar la placa con la computadora y cargarle un programa de computadora desarrollado con el software Arduino IDE. Este software detecta el puerto COM al que se conecta la placa y esto facilita la carga del código diseñado para que la placa y sus sensores trabajen adecuadamente.



Figura 1. Tarjeta Arduino Uno
Fuente: Propia.

Shield Datalogger

En general un shield es un escudo que está concebido para ensamblarse perfectamente con un Arduino uno. El shield datalogger (Figura 2) es un escudo que trae integrado un reloj que es capaz de registrar la fecha y hora en tiempo real y un sistema de adquisición de datos a través de un módulo SD integrado. La ventaja con este escudo es que se eliminan varios cables de conexión y el circuito se ve más sencillo y robusto. Encima del shield se pueden conectar sensores de cualquier tipo siempre que no se sobrepase la capacidad de conexión (Earl, 2024).



Figura 2. Shield datalogger V1.0
Fuente: Propia.

Pantalla LCD

La pantalla LCD (Figura 3) es una pantalla para la visualización de datos en formato alfanumérico y es útil para mostrar la información obtenida por los sensores en tiempo real. Esta pantalla tiene integrado 16 pines macho para su conexión con Arduino y admite por lo menos dos protocolos de conexión. Cuando se usa el protocolo de conexión I2C se instala un adaptador que permite una conexión de solo 4 pines y por lo tanto se reduce el uso de cableado electrónico y el circuito queda más sencillo a la vista.



Hay diferentes tipos y tamaños de pantallas siendo la más común la LCD 16 x2 que significa que los números y letras que se quieren visualizar se muestran a los más en dos filas cada fila con 16 columnas. También hay LCD gráficos (UNIT Electronics, 2025).



Figura 3. Pantalla LCD I2C 16x2
Fuente: Propia.

Mini Protoboard

Es una tabla de plástico (Figura 4) de 4.7 cm de longitud, 3.5 cm de ancho y una altura de 8.5 mm, que cuenta con orificios en los cuales se pueden realizar conexiones de pines cuando en la tarjeta Arduino UNO o en el shield datalogger ya no queda espacio para enlazar más dispositivos. Cuenta con un adhesivo en la parte de atrás de los orificios para sujetarse a cualquier superficie. Tiene un peso de 28 gramos, lo que lo hace una herramienta práctica y fácil de manejar. Este protoboard se puede utilizar para prácticas escolares, construir prototipos o realizar simulaciones de dispositivos pequeños (UNIT Electronics, 2025).

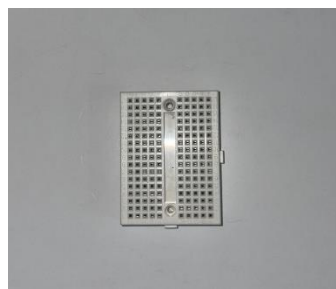


Figura 4. Mini Protoboard
Fuente: Propia.



5.4 Sensores

Un sensor es un dispositivo con la capacidad de detectar cambios en su entorno y mostrar los datos en un sistema. Es decir, convierte un fenómeno físico en un voltaje analógico medible o en una señal digital. Esta información se traduce de manera que sea entendible y visible para el ser humano o también puede ser procesada digitalmente (Adquisición de datos, soluciones y pruebas de medición, 2025). Durante las mediciones realizadas para el cumplimiento de este trabajo, utilizaron dos sensores de parámetros ambientales: El sensor MH-Z19C y el sensor DHT22.

Sensor MH-Z19C

El MH-Z19C (Figura 5) es un sensor que utiliza el principio de infrarrojos no dispersivos (NDIR por sus siglas en inglés), por el cual logra medir con precisión las concentraciones de CO₂ en el ambiente. Este sensor debe utilizarse en un ambiente seco y evitar temperaturas extremas. También puede calcular temperatura (T) y humedad (%). Según su datasheet, este sensor opera con 5 Volts, lo que lo hace compatible con Arduino; también cuenta con una precisión del 5% (50 ppm), tiene unas dimensiones de 3.3*2*0.9 cm, al igual que un peso de 21 gramos, lo que lo hace un sensor ligero y práctico para su uso. Tiene una vida útil mayor a 3 años (Zhengzhou Winsen, 2020).

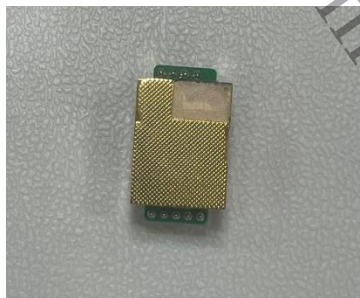


Figura 5. Sensor MH-Z19C
Fuente: Propia.



Sensor DHT22

El DHT22 (Figura 6) es un sensor que mide humedad relativa (%) y temperatura (°C) del aire y es normalmente utilizado tanto en interiores como en exteriores. A pesar de ser un sensor de bajo costo, las mediciones del DHT22 son precisas y de alta calidad. El sensor utiliza un termistor para medir la temperatura del aire. Para la medición de la humedad relativa, utiliza un sensor interno capacitivo. El DHT22 es capaz de medir la humedad relativa en el rango de 0 a 100% y la temperatura en el rango de -40 a 80 °C. En cuanto a precisión, tiene un margen de entre 2 a 5 % de HR y ± 0.5 de °C. Tiene un periodo de detección promedio de 2 segundos, lo que lo hace sensible a los factores que mide, ya que es capaz de detectar cambios de 0.1% de HR y 0.1 de °C. El DHT22 es un sensor pequeño, de bajo consumo y su diagrama de conexión es sencillo, al utilizar sólo pines de tierra (GND), voltaje (VCC) y datos (OUT) (Zhengzhou Winsen, 2015).

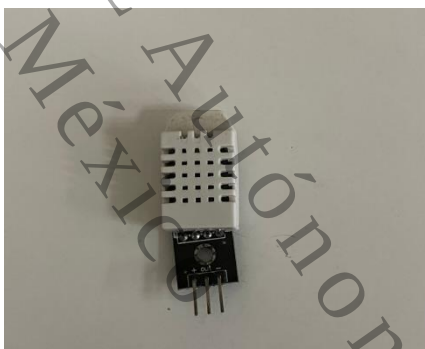


Figura 6. Sensor DHT22
Fuente: Propia.



6. METODOLOGÍA

6.1 Área de estudio

Este trabajo se desarrolló en dos salones de clase de la DACBIOL. Los salones fueron identificados como D10 y D07 con un espacio de 129.3 m³ y 127.040 m³ respectivamente. Ambos salones están climatizados y la cantidad máxima de asistentes que se presentan a clases son de 15 en el primero y 6 en el segundo. Se seleccionaron estos salones por la facilidad de hacer los monitoreos mientras el profesor da su clase. En el aula D10 se tomaron mediciones de 7 a 9 de la mañana y en el aula D07 de 9 a 11 de la mañana los lunes, miércoles y viernes. Ambas aulas de clase se ubican en una segunda planta.

6.2 Desarrollo del modelo matemático teórico de la concentración temporal de CO₂

El modelo matemático simple para la concentración C (mg/m³) de una sustancia inerte que se emite a tasa constante E (mg/min) en un cuarto cerrado de volumen V (L), está dado por la ecuación 5 y proviene de la solución de la ecuación de balance de masa (Ecuación 4) en estado no estacionario donde al tiempo cero ($t=0$) la concentración inicial es C_0 . La ecuación 5 representa una línea recta y predice que la concentración aumenta con el incremento del tiempo.

$$V \frac{dC}{dt} = E; C(t = 0) = C_0 \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$C(t) = C_0 + \left(\frac{E}{V}\right)t \quad (\text{Ecuación 5})$$



La tasa de emisión de CO₂ por respiración normalmente se estima en litros de CO₂ por minuto (L/min). Esta tasa suele representarse como $\dot{V}_{CO_2}$. En la ecuación 5, el término $E/\dot{V}$ tiene unidades de mg/L-min que corresponden a unidades de concentración sobre tiempo. Por conveniencia, la unidad de concentración preferida será la de ppm/min. Estas unidades equivalentes pueden obtenerse al calcular $E/\dot{V}$ con la ecuación 6 con la suposición de que la mezcla de gases en el cuarto cerrado se comporta como un gas ideal. La ecuación 6 ahora involucra la fracción en volumen del CO₂ y el factor 10^6 se aplica para obtener la concentración en ppm correspondiente. Finalmente, la ecuación 7 da el modelo teórico del comportamiento temporal del CO₂ que se aplicó en el desarrollo de este trabajo (Ecuación 7).

$$\frac{E}{\dot{V}} = \frac{\dot{V}_{CO_2}(L/min)}{\dot{V}(L)} \times 10^6 \left(\frac{ppm}{min} \right) \quad (Ecuación 6)$$

$$C(t) = C_0 + \left(\frac{\dot{V}_{CO_2}}{\dot{V}} \times 10^6 \right) t \quad (Ecuación 7)$$

En la ecuación 7, $\dot{V}_{CO_2}$, representa la tasa de generación total de CO₂ que fue la suma de la tasa de generación individual de CO₂ de los estudiantes que estuvieron presentes en el aula de clases durante el desarrollo de este trabajo.

El método propuesto para estimar la tasa de generación de CO₂ por respiración, se basó en calcular la tasa metabólica basal (BMR, por sus siglas en inglés) individual y combinarla con el nivel de actividad física (PAR) de ese individuo. La BMR se estimó con las ecuaciones 8 y 9. La ecuación 8 estima la BMR de hombres y la ecuación 9 el de mujeres todos en el rango de 18 a 30 años siendo m la masa corporal (kg) de la persona (Persily y de Jonge, 2017). Las ecuaciones 8 y 9 son ecuaciones empíricas y sus coeficientes en realidad son factores de conversión que permiten obtener el BMR en MJ/d. Por ejemplo, las unidades de conversión de los coeficientes 0.063 y 2.896 en la



ecuación 8 son MJ/d-kg y MJ/d respectivamente. Sin embargo, es común escribir estas ecuaciones sin las unidades de medida.

$$BMR(MJ/d) = 0.063m + 2.896 \quad (\text{Ecuación 8})$$

$$BMR(MJ/d) = 0.062m + 2.036 \quad (\text{Ecuación 9})$$

La tasa de generación teórica de CO₂ individual se estimó con la ecuación 10. En esta ecuación P es la presión promedio del aire interior en kPa, T es la temperatura promedio interior en kelvin, FC es un factor de conversión entre la energía usada por el individuo y el CO₂ generado. Este factor de conversión y sus unidades está dado por la ecuación 11. PAR es el índice de actividad física para una persona y su valor depende de la actividad que esté realizando. Por ejemplo, para una persona sentada y quieta PAR=1.2 MET, mientras que si está de pie PAR=1.4 MET (Persily y de Jonge, 2017).

$$\dot{V}_{CO_2}(l s^{-1}) = \left(\frac{101 \text{ kPa}}{P} \right) \left(\frac{T}{273 \text{ K}} \right) BMR(MJ d^{-1}) * FC * PAR \quad (\text{Ecuación 10})$$

$$FC = 4.8 \times 10^{-4} \frac{l \cdot s^{-1} CO_2}{MJ} \cdot d^{-1} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Entonces considerando las ecuaciones 8 a 11, los datos que se requirieron para estimar la tasa de generación de CO₂ de cada estudiante fueron su masa corporal (kg), su edad, su estatura (h) y su género (hombre o mujer). Estos datos se obtuvieron con previo consentimiento del estudiante y se manejaron asociando un número de lista de modo que el nombre del estudiante no figuró en los datos. La tasa de emisión total, $\dot{V}_{CO_2,tot}$ se estimó como la suma de las tasas individuales y la tasa de emisión promedio se estimó dividiendo la tasa de emisión total entre n, el número de personas en el aula de clases. Cómo la ecuación 10 da la tasa en L/s se convertirá a l/min multiplicando por 60 para obtener, por conveniencia, la tasa en L/min.



El siguiente es un ejemplo de cómo se calcula la tasa de generación de CO₂. Se trata de un hombre de 50 años con una masa corporal de 80 kg que permanece en actividad continua durante dos horas (PAR=1.4 met) en una habitación donde la presión del aire interior y su temperatura son 101 kPa y 20 °C respectivamente. En este caso con la ecuación 12 se estimó la tasa metabólica basal ya que es la recomendada para hombres de entre 30 a 60 años (Persily y de Jonge, 2017). Para una persona en actividad continua, la BMR es de 7.493 MJd⁻¹. Con las ecuaciones 10 y 11 se estima su tasa de generación de CO₂ en 0.0054 L/s o 0.324 L/min.

$$BMR(MJd^{-1}) = 0.048 \cdot m + 3.653 \quad (\text{Ecuación 12})$$

$$BMR(MJd^{-1}) = 0.048 \cdot 80 + 3.653 = 7.493$$

$$\dot{V}_{CO_2} = \left(\frac{101 \text{ kPa}}{101 \text{ kPa}} \right) \left(\frac{293 \text{ K}}{273 \text{ K}} \right) * 7.493 \text{ MJd}^{-1} * 4.8 \times 10^{-4} \frac{\text{l} \cdot \text{s}^{-1}}{\text{MJd}^{-1}} * 1.4 = 0.0054 \text{ l/s}$$

Como el cálculo anterior se realizó para cada estudiante y en diferentes días, se desarrolló una hoja de cálculo simple con las siguientes variables:

- Fecha_Hora = fecha y hora de la prueba
- ID = número identificador del estudiante
- DX = identificador del aula de clases (D=07 o 10).
- m = masa corporal del estudiante (kg).
- Sexo = sexo del estudiante (H o M).
- Edad = edad del estudiante (años).
- Temp = temperatura promedio del aire interior (°C).
- Presión = presión promedio del aire interior (kPa).
- $\dot{V}_{CO_2}$ = tasa individual de generación de CO₂ en L/min.



- PAR = nivel de actividad física.
- Estatura = estatura del estudiante (h).

Con esta información se obtuvo la tasa teórica de generación total de CO₂ en l/min. El volumen del aula se determinó midiendo su ancho, fondo y alto con un flexómetro y la concentración inicial de CO₂ con un detector comercial de bajo costo. Con toda esta información, la ecuación 7 se utilizó para estimar la concentración de CO₂ en función del tiempo en minutos y determinar el momento en que la concentración excede las 1000 ppm (Tillet, 2012).

6.3 Generación de datos de concentración de CO₂

Se empleó un detector comercial de CO₂ de bajo costo. Este detector midió la concentración de CO₂ (ppm), la temperatura (°C) y humedad relativa (%) del aire interior del salón de clases con frecuencia de un minuto. El detector guardó los datos registrados, pero estos fueron transcritos manualmente a una base de datos en Excel.

El periodo de monitoreo en los salones de clase fue máximo de dos horas, que es el tiempo que en promedio dura una clase en DACBIOL. El procedimiento fue el siguiente:

1. El aula de clases estuvo ventilada al inicio y sin estudiantes en su interior. Esto se logró abriendo la puerta y ventanas del salón de clases de 10-15 minutos antes de iniciar el experimento.
2. El detector fue calibrado antes de realizar las mediciones. Ya calibrado, fue colocado dentro del salón con ventanas y puerta abiertas antes de que ingresaran los estudiantes al salón.
3. Entrando los estudiantes al salón de clases, las puertas y ventanas fueron cerradas (esto es habitual ya que el aula está climatizada) y se registraron los datos de inicio a fin de la clase.



4. Cada vez que se realizó el experimento, se contabilizó el número de estudiantes (n) presentes y específicamente quienes estuvieron presentes usando su número identificador. Esto fue con el propósito de estimar la tasa de generación teórica de CO_2 por cada experimento.
5. En estos experimentos los aires acondicionados permanecieron encendidos debido a que no se tiene control para apagarlos y encenderlos a discreción. Por cada experimento, se generó una base de datos en Excel cómo se explicó en la sección 5.2.



6.4 Desarrollo del modelo empírico de la concentración temporal de CO₂

La ecuación 13 fue la base para el modelo empírico de la concentración de CO₂ en ppm en función del tiempo en minutos. β representa la tasa total de emisión observada en ppm/min de CO₂, la constante a fue un estimado de la concentración inicial.

$$C_{ppm}(t) = a + \beta t \quad (\text{Ecuación 13})$$

Para obtener $\hat{\beta}$ se siguió el siguiente procedimiento:

1. Se realizaron gráficos de dispersión de los datos obtenidos de CO₂ en función del tiempo para cada experimento de monitoreo. Se esperaba comportamiento lineal. Como la base de datos está en Excel, se utilizó esta herramienta. En cada gráfica, los datos de CO₂ fueron los valores de la serie y mientras que los datos de tiempo fueron los valores de la serie x. Utilizando las opciones de graficado se obtuvo una línea de tendencia lineal (ordenada al origen y pendiente $\hat{\beta}$) y el valor del coeficiente de determinación, R^2 . Excel obtiene la pendiente de la línea de tendencia mediante el método de mínimos cuadrados (Ecuación 14). Este método obtuvo la ecuación de línea recta que mejor ajusta a un conjunto de datos que se comportan linealmente (Montgomery, Pech y Vining, 2006).
2. A partir del valor de β se estableció la tasa total de emisión de CO₂, $\dot{V}_{CO_2, \text{total}}$, despejando esta de la ecuación 15. Esta última tiene las unidades típicas de l/min de CO₂.
3. La tasa individual promedio de CO₂, $\dot{V}_{CO_2, \text{pcp}}$, que fue representativa de cada estudiante se estimó con la ecuación 16.



$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i x_i - n \bar{y} \bar{x}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2} \quad (\text{Ecuación 14})$$

$$\beta \left(\frac{\text{ppm}}{\text{min}} \right) = \frac{\dot{V}_{\text{CO}_2, \text{tot}} (\text{l/min})}{V(l)} \times 10^6 \quad (\text{Ecuación 15})$$

$$V_{\text{CO}_2, \text{pcp}} = \frac{\hat{\beta}}{n} \quad (\text{Ecuación 16})$$

4. Como se realizaron varios experimentos, hubo varias tasas totales y tasas individuales promedio. De modo que se analizó su variación entre los experimentos usando alguna medida como, por ejemplo, la desviación D del valor observado O_i a la media $\bar{O}$, $D = |O_i - \bar{O}|$.
5. Una vez obtenido el modelo empírico se comparó con el modelo matemático y se propusieron ajustes a los parámetros del modelo matemático para mejorar sus valores predichos.

6.5 Desarrollo de un dispositivo electrónico que genere datos de CO₂

El desarrollo de este trabajo permitió la calibración de un sensor MH-Z19C. Este sensor fue desarrollado para medir directamente la concentración de CO₂ en el rango de 400 a 5000 ppm. Al calibrar el sensor se dispuso de un equipo comercial para medir simultáneamente la concentración en puntos diferentes, pero en ppm. Para que este sensor fuera útil, se desarrolló un sistema de adquisición y visualización de datos con base en Arduino uno.

La tabla 3 muestra el costo unitario del hardware que se utilizó para desarrollar el sistema. La tabla 4, 5 y 6 se muestra cómo se conectaron los pines de cada sensor o módulo a la tarjeta Arduino Uno. La imagen 7 muestra físicamente la conexión electrónica



de los diferentes componentes. Este diagrama se desarrolló con el software libre Cirkuit Designer en línea disponible en <https://www.cirkitstudio.com/>.

Tabla 3. Hardware requerido para desarrollar un sistema de adquisición y visualización de datos de bajo costo

Unidades	Componentes usados	Costo
1	Placa Arduino UNO	\$199
1	Shield Datalogger	\$84
1	Sensor MH-Z19C	\$639
1	Sensor DHT22	\$59
1	Pantalla LCD 16x2	\$69
1	Porta batería 18650	\$16
1	Mini Protoboard	\$29
1	Memoria micro-SD Kingston S2 32 Gb	\$109
1	Pila Cr1220	\$59
1	Cable USB a USB tipo B	\$99

Tabla 4. Conexión de LCD 16x2 a Arduino UNO.

LCD	Arduino UNO	Mini protoboard
GND	GND	Puente a mini protoboard
VCC	5 V	Puente a mini protoboard
SDA	A4	
SCL	A5	

Tabla 5. Conexión de MH-Z19C a Arduino UNO.

MH-Z19C	Arduino UNO	Mini protoboard
GND	GND	Puente a mini protoboard
VIN	5 V	Puente a mini protoboard
RX	D6	
TX	D7	

Tabla 6. Conexión de DHT22 a Arduino UNO.

DHT22	Arduino UNO	Mini protoboard
(-)	GND	Directo
(+)	5 V	Puente a mini protoboard
OUT	D5	

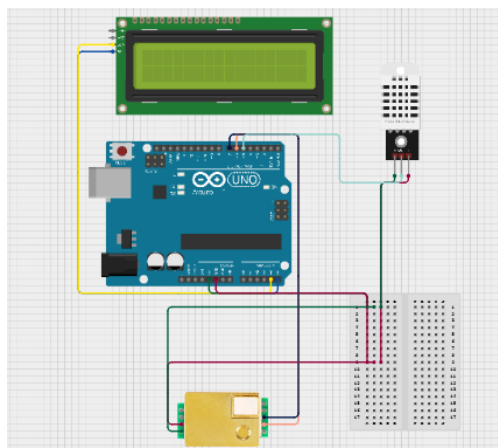


Figura 7. Diagrama electrónico del sistema de adquisición y visualización de datos con Arduino uno

Fuente: Diseño propio en Circuit Designer.

Para calibrar el sensor MH-Z19C se siguieron los siguientes pasos:

1. El sensor se puso a medir simultáneamente con el detector comercial de CO₂ y a su misma frecuencia, 1 dato por cada minuto.
2. Los datos medidos por el sensor MH-Z19C se graficaron contra los datos de concentración de CO₂ medidos en ppm por el detector comercial. Esta gráfica permitió definir el tipo de modelo de regresión que se debía ajustar. Se obtuvo un modelo de regresión lineal simple (Ecuación 13) que estimó la concentración de CO₂ esperada en ppm a partir de la concentración de CO₂ medidos por el sensor.
3. Una vez ajustado un modelo de regresión lineal se programó en el sistema de adquisición de datos de Arduino para interpretar las concentraciones de CO₂ en ppm.



6.6 Programación de un código de Arduino IDE para el uso del sensor MHZ-19C

El código para el sensor MHZ-19C fue desarrollado con la librería MHZ19 cuyo objetivo es mandar señales al sensor para que entre en funcionamiento. La librería DHT activa al sensor DHT22 y la librería software serial se encarga de mandar la señal emitida por los dos sensores a un programa llamado “ARDUINO SERIALCHART”, aquí se mostró la información en la laptop a la que estaba conectado el equipo.

El programa del equipo que se desarrolló está en tres partes, en la parte 1 se cargan las librerías necesarias para el control de los sensores MH_Z19C y DHT22. Para la parte 2 de este programa la función *void setup* se encarga de configurar los sensores para realizar las mediciones. Estas instrucciones se identifican porque emplean la palabra “begin”. Por ejemplo, *dht.begin* inicializa las lecturas al sensor DHT22. Finalmente, en la parte 3 la función *void loop* toma la lectura de los sensores e imprime los datos en el Arduino Live Serial. El Arduino trabaja en milisegundos, por lo que se estableció que los datos fueran recopilados cada 60000 milisegundos, o sea, cada minuto. A continuación, en la tabla 7 se presenta el código con el que se programó el dispositivo y los sensores MH-Z19C, DHT22 y Arduino UNO:

Tabla 7. Código de Arduino para obtener datos de CO₂, temperatura y humedad de los sensores MH-Z19C y DHT22 con el programa Arduino Live Serial.

```
//PROGRAMA CO2-DHT22 con Arduino Live Serial
//Parte 1. Librerías y definición de variables.

#define LIVESERIAL(id, value) { Serial.print(id); Serial.print(':'); Serial.println(value);
}
#include <MHZ19.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#include <DHT.h>

#define DHTPIN 3
#define DHTTYPE DHT22
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
```



```
#define RX_PIN 7
#define TX_PIN 6

MHZ19 myMHZ19;
SoftwareSerial mySerial(RX_PIN, TX_PIN);
unsigned long timer = 0;
float Tdht, HRdht, Tmh, CO2mh;

//Parte 2. Inicialización de los sensores y del monitor serie

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  mySerial.begin(9600);
  myMHZ19.begin(mySerial);
  dht.begin();
  // Turn auto calibration ON (OFF autoCalibration(false))
  //myMHZ19.autoCalibration();
}

//Parte 3. Toma de lectura de los sensores e impresión de datos

void loop() {
  while(Serial.available())
  {
    Serial.print((char)Serial.read());
  }
  if (millis() - timer >= 60000) {
    HRdht = dht.readHumidity();
    Tdht = dht.readTemperature();
    CO2mh = myMHZ19.getCO2();
    Tmh = myMHZ19.getTemperature();
    LIVESERIAL("HR_DHT", HRdht);
    LIVESERIAL("T-DHT", Tdht);
    LIVESERIAL("T-MH", Tmh);
    LIVESERIAL("CO2-MH", CO2mh)
    timer = millis();
  }
}
```



7. RESULTADOS

7.1 Resultados de los modelos matemáticos de CO₂ basados en la ecuación de balance de masa.

En las tablas 8 y 9 se presentan los datos generales de los dos grupos de estudiantes que participaron en este trabajo: la clase de Termodinámica en el horario de 7-9 am y la clase de Monitoreo Atmosférico en el horario de 9-11 am. La mayoría de las clases se impartieron en el aula D07, aunque el grupo de termodinámica al principio tomó clases en el aula D10. El volumen de las aulas de clase consideradas fue de 127.0 m³ para el aula D07 y de 129.3 m³ para el aula D10. A partir de los datos base de edad, estatura, peso y sexo se calcularon la tasa metabólica basal (BMR) y la tasa de generación de CO₂ (V_{CO2}). Para varones (H), la tasa metabólica basal varió entre 7.432 a 8.251 MJ/d y para las mujeres (M) varió entre 5.731 y 7.243 MJ/d. La tasa de generación de CO₂ para varones varió entre 0.2599 y 0.3303 L/min mientras que para las mujeres varió entre 0.2190 y 0.2792 L/min. En promedio la tasa de generación de los varones que participaron en este trabajo fue de 0.301 L/min mientras que para mujeres fue de 0.251 L/min.

Tabla 8. Datos de los estudiantes de la clase de Monitoreo Atmosférico.

ID	Edad	Altura (m)	Peso (kg)	Sexo	BMR (MJ/d)	PAR	V _{CO2} (l/min)
A1	21	1.81	79	H	7.873	1.2	0.2974
P	54	1.60	80	H	7.493	1.4	0.3303
A2	21	1.72	78	H	7.81	1.2	0.2951
A3	21	1.87	85	H	8.251	1.2	0.3117
A4	21	1.66	72	H	7.432	1.2	0.2808
A5	21	1.60	80	H	7.936	1.2	0.3016
A6	22	1.73	76	H	7.684	1.2	0.2903



Tabla 9. Datos de los estudiantes de la clase de Termodinámica.

ID	Edad	Altura (m)	Peso (kg)	Sexo	BMR (MJ/d)	PAR	V _{CO2} (l/min)
A1	19	1.66	77	H	7.747	1.2	0.2960
A2	18	1.86	62	H	6.802	1.2	0.2599
A3	18	1.65	45	M	5.731	1.2	0.2190
A4	18	1.52	58	M	6.55	1.2	0.2503
A5	18	1.49	55	M	6.361	1.2	0.2431
A6	18	1.60	56	M	6.424	1.2	0.2455
A7	18	1.63	69	M	7.243	1.2	0.2768
A8	28	1.64	80	H	7.936	1.2	0.3032
A9	21	1.56	58	M	6.55	1.2	0.2503
A10	18	1.62	60	M	6.676	1.2	0.2551
A11	18	1.67	60	M	6.676	1.2	0.2551
A12	18	1.65	70	M	7.306	1.2	0.2792
A13	19	1.54	53	M	6.235	1.2	0.2382
A14	19	1.58	59	M	6.613	1.2	0.2527
A15	22	1.75	76	H	7.684	1.2	0.2936
P	54	1.60	80	H	7.936	1.4	0.3538

En las tablas 10 y 11, se muestran los parámetros y modelos que describieron el comportamiento temporal del CO₂ en función del tiempo, tomando como base la ecuación de balance de masa. Por cada fecha de monitoreo se adaptó un modelo correspondiente. En la tabla 10 están los modelos para el grupo de Monitoreo Atmosférico mientras que en la tabla 11, los modelos para el grupo de Termodinámica. En ambas tablas, N se refiere a el número de ocupantes, C₀ es la concentración inicial medida con el detector de CO₂, β es la tasa de emisión total de CO₂ en ppm/min y β_{per} es la tasa de generación per-cápita promedio.

De acuerdo con la tabla 10, la tasa de generación total de CO₂ para el grupo de monitoreo atmosférico, varió entre 12.0 y 16.7 ppm/min con un valor promedio de 14.3066 ppm/min. La tasa de generación per-cápita mínima fue de 2.369 ppm/min-per, la máxima fue de 2.401 ppm/min-per mientras que la promedio fue de 2.385 ppm/min-per. La tabla 11 muestra que la tasa mínima de generación total de CO₂ para el grupo de Termodinámica fue de 12.0069 ppm/min, la máxima fue de 16.6706 ppm/min y el



promedio fue de 30.3143 ppm/min. Con respecto a la tasa de generación per-cápita, la mínima fue de 2.087 ppm/min-per, la máxima fue de 2.142 ppm/min-per y el promedio fue de 2.107 ppm/min-per. Ésta última tasa de generación per-cápita es sin considerar el tipo de sexo ya que el grupo de Termodinámica fue mixto. Por ejemplo, considerando el tipo de sexo, se obtuvo que para los hombres la tasa de generación per-cápita promedio fue de 2.764 ppm/min-per y para las mujeres fue de 1.507 ppm/min-per.

Tabla 10. Modelos teóricos del comportamiento temporal de la concentración de CO₂ de la clase de Monitoreo Atmosférico en el aula D07.

Fecha	N	C ₀ (ppm)	β (ppm/min)	β _{per} (ppm/min-per)	Modelo
02/Abril	6	489	14.2126	2.369	$CO2_{teor} = 489 + 14.2126 * t$
09/Abril	6	495	14.2245	2.371	$CO2_{teor} = 495 + 14.2245 * t$
07/Mayo	6	555	14.3912	2.399	$CO2_{teor} = 555 + 14.3912 * t$
19/Mayo	5	462	12.0069	2.401	$CO2_{teor} = 462 + 12.0069 * t$
21/Mayo	6	406	14.3492	2.392	$CO2_{teor} = 406 + 14.3492 * t$
23/Mayo	6	392	14.2799	2.380	$CO2_{teor} = 392 + 14.2799 * t$
28/Mayo	6	681	14.2899	2.382	$CO2_{teor} = 681 + 14.2899 * t$
02/Junio	6	458	14.3348	2.389	$CO2_{teor} = 458 + 14.3348 * t$
06/Junio	7	446	16.6706	2.382	$CO2_{teor} = 446 + 16.6706 * t$

Tabla 11.

Modelos teóricos del comportamiento temporal de la concentración de CO₂ de la clase de Termodinámica en el aula D10 y D07.

Aula	Fecha	N	C ₀ (ppm)	β (ppm/min)	β _{per} (ppm/min-per)	Modelo
D10	02/Abril	15	442	31.1855	2.079	$CO2_{teor} = 442 + 31.1855 * t$
D07	19/Mayo	16	484	33.3963	2.087	$CO2_{teor} = 484 + 33.3963 * t$
D07	21/Mayo	13	434	27.8402	2.142	$CO2_{teor} = 434 + 27.8402 * t$
D07	23/Mayo	12	423	25.5241	2.127	$CO2_{teor} = 423 + 25.5241 * t$
D07	02/Junio	16	635	33.6253	2.102	$CO2_{teor} = 635 + 33.6253 * t$



7.2 Resultados de los modelos empíricos para la concentración de CO₂

En las figuras 8 y 9, se presentan los datos obtenidos de CO₂ con el sensor comercial tanto para la clase de Termodinámica como Monitoreo atmosférico. Estas gráficas representan la variación del CO₂ con respecto al tiempo en minutos y se muestran por cada día de monitoreo. Se puede notar una tendencia lineal de la concentración de CO₂ con respecto al tiempo. Este comportamiento es el esperado porque el modelo teórico de balance de masa predice un modelo de línea recta cuando se tiene una fuente de emisión constante y un espacio cerrado.

En la figura 8, la gráfica del día 02 de junio, a partir del minuto 55 tiene una ligera anomalía que se debió a la salida de estudiantes del salón de clases. Está ahí para mostrar el efecto que tiene sobre la concentración la cantidad de estudiantes y la ventilación del aula. A excepción de las gráficas mencionadas, todas las demás mostraron resultados esperados, nada fuera de lo habitual, una tendencia lineal del comportamiento del CO₂ con respecto al tiempo. En la clase de Termodinámica se tuvieron concentraciones máximas en un rango de 1200 a 2000 ppm, y concentraciones mínimas en el rango de 400 a 500 ppm. En la clase de Monitoreo Atmosférico las concentraciones máximas estuvieron en el rango de 1200 a 1500 ppm, y las mínimas en el rango de 400 a 600 ppm.



MODELO MATEMÁTICO DEL COMPORTAMIENTO TEMPORAL DEL CO₂
GENERADO POR RESPIRACIÓN EN AULAS DE CLASE

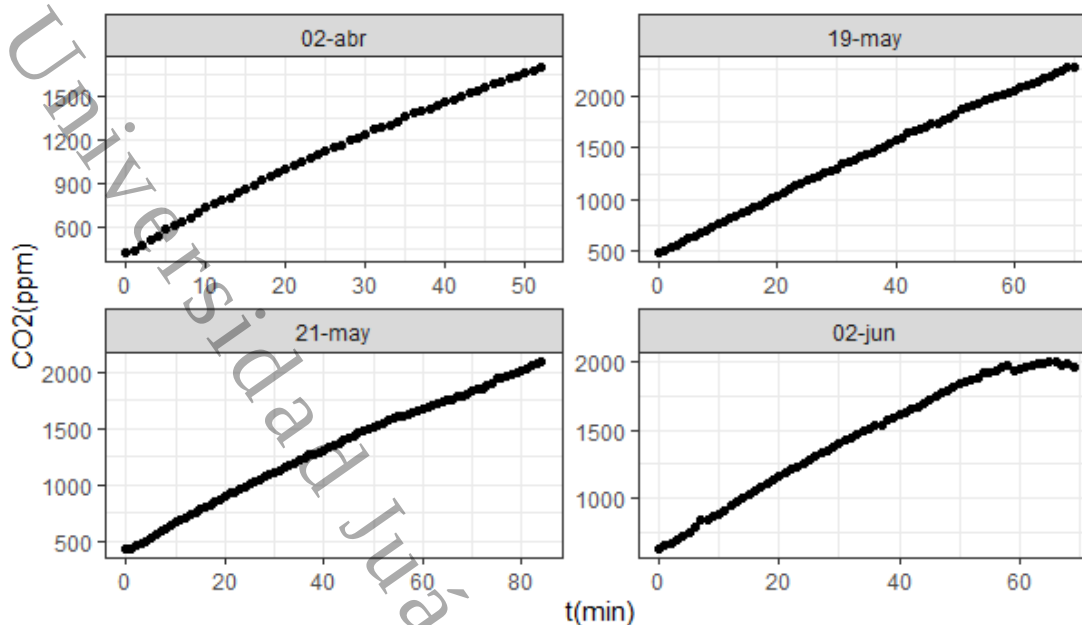


Figura 8. Variación temporal del CO₂ durante las clases de Termodinámica entre las aulas D10 y D07.

Fuente: Elaboración propia en RStudio.

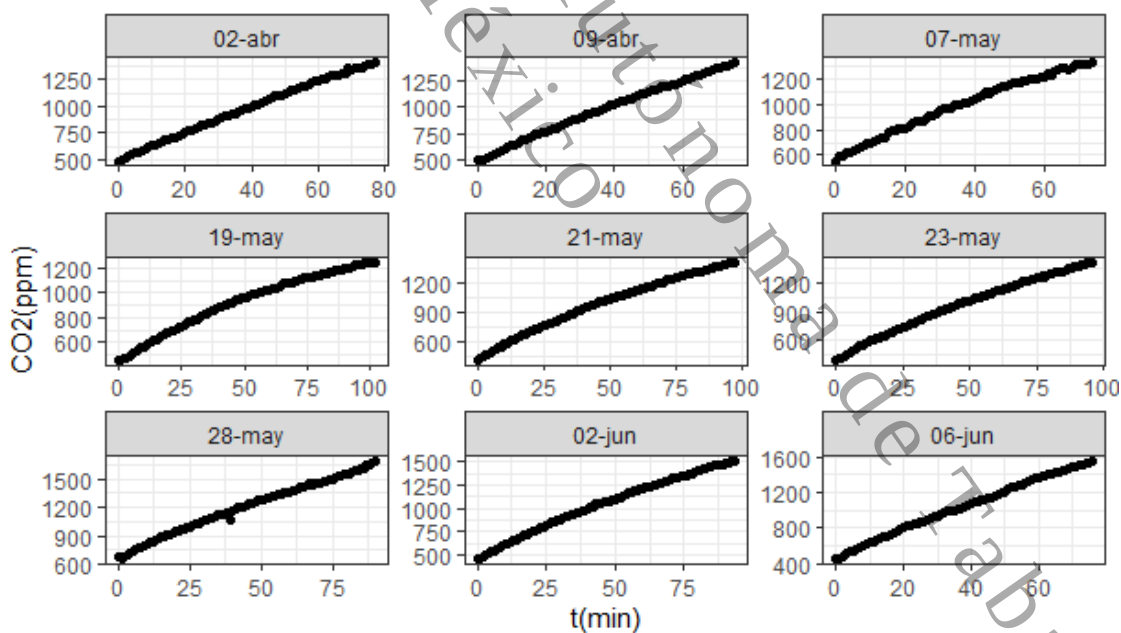


Figura 9. Variación temporal del CO₂ durante las clases de la materia de Monitoreo Atmosférico de 9-11 am en el aula D07.

Fuente: Elaboración propia en RStudio.



En la tabla 12 se muestran los resultados obtenidos de los modelos empíricos que se obtuvieron en todos los experimentos de monitoreo. Cada modelo empírico contiene información de la concentración inicial y la tasa total de generación de CO₂ en ppm/min. La tabla 11 también muestra la tasa de generación per cápita observada calculada como la tasa de generación total dividida entre el número de personas. Por ejemplo, para monitoreo atmosférico, el 02 de abril según el modelo empírico, la concentración inicial estimada fue de 513.02 ppm, la tasa total fue de 12.033 ppm/min y la per cápita fue de 2.01 ppm/min-per; mientras que en el modelo teórico la concentración inicial fue de 489 ppm, la tasa de generación total fue de 14.2126 ppm/min y la per cápita fue de 2.369 ppm/min-per por arriba de la empírica (Tabla 10). De acuerdo con la tabla 12, la tasa de generación per cápita empírica varió entre 1.32 y 2.06 ppm/min-per con una media de 1.74 ppm/min-per. En general, se observó que el modelo teórico sobre estimó las tasas totales de generación de CO₂. Esto se refleja en la tabla 12 donde se observa la desviación media absoluta. La desviación media representa la diferencia de tasa de generación promedio entre el modelo teórico y empírico. En el caso del 02 de abril, la tasa total observada estuvo 2.1796 ppm/min por debajo de los estimado con el modelo teórico.

Tabla 12. Resultados obtenidos del modelo empírico.

Fecha	Grupo	N	R ²	Modelo empírico	βper (ppm/min-per)
02/abril	Monitoreo Atmosférico	6	0.9982	$513.02 + 12.033 * t$	2.01
09/abril	Monitoreo Atmosférico	6	0.9969	$515.41 + 12.337 * t$	2.06
07/mayo	Monitoreo Atmosférico	6	0.99	$612 + 10.355 * t$	1.73
19/mayo	Monitoreo Atmosférico	5	0.9755	$528.57 + 7.79 * t$	1.56
21/mayo	Monitoreo Atmosférico	6	0.9873	$490.09 + 10.093 * t$	1.68
23/mayo	Monitoreo Atmosférico	6	0.9918	$564.06 + 10.549 * t$	1.76
28/mayo	Monitoreo Atmosférico	6	0.9938	$713.53 + 10.793 * t$	1.80
02/junio	Monitoreo Atmosférico	6	0.9919	$523.63 + 11.113 * t$	1.85
06/junio	Monitoreo Atmosférico	7	0.9975	$489.77 + 14.405 * t$	2.06
02/abril	Termodinámica	15	0.9945	$475.99 + 24.568 * t$	1.64
19/mayo	Termodinámica	16	0.9985	$516.05 + 25.861 * t$	1.62
21/mayo	Termodinámica	13	0.9945	$493.21 + 19.522 * t$	1.50
23/mayo	Termodinámica	12	0.9838	$345.43 + 21.953 * t$	1.83
02/junio	Termodinámica	16	0.979	$720.22 + 21.043 * t$	1.32



La tabla 13 muestra la desviación media absoluta entre la tasa total de generación de CO₂ (β) estimada para el modelo matemático y la obtenida con el modelo empírico. La desviación media estuvo en el rango de 1.8875 a 12.5823 que en porcentaje corresponde a 15.3% a 59.8%. Revisando se notó que el rango más alto de la desviación corresponde al día 02 de junio de la clase de Termodinámica. La única anomalía observada es que el monitoreo inició con una concentración alta de CO₂ de 635 ppm (ver tabla 11). Esto pudiera implicar que lo adecuado fue iniciar el monitoreo con concentraciones iniciales de CO₂ bajas, es decir, con espacios bien ventilados inicialmente.

Tabla 13.

Desviación media absoluta de la tasa de generación total de CO₂ teórica y observada.

Fecha	Grupo	$\beta_{\text{teórico}}$ (ppm/min)	$\beta_{\text{observado}}$ (ppm/min)	DMA (ppm/min)
02/abril	Monitoreo Atmosférico	14.2126	12.033	2.1796
09/abril	Monitoreo Atmosférico	14.2245	12.337	1.8875
07/mayo	Monitoreo Atmosférico	14.3912	10.355	4.0362
19/mayo	Monitoreo Atmosférico	12.0069	7.79	4.2169
21/mayo	Monitoreo Atmosférico	14.3492	10.093	4.2562
23/mayo	Monitoreo Atmosférico	14.2799	10.549	3.7309
28/mayo	Monitoreo Atmosférico	14.2899	10.793	3.4969
02/junio	Monitoreo Atmosférico	14.3348	11.113	3.2218
06/junio	Monitoreo Atmosférico	16.6706	14.405	2.2656
02/abril	Termodinámica	31.1855	24.568	6.6175
19/mayo	Termodinámica	33.3963	25.861	7.5353
21/mayo	Termodinámica	27.8402	19.522	8.3182
23/mayo	Termodinámica	25.5241	21.953	3.5711
02/junio	Termodinámica	33.6253	21.043	12.5823



7.3 Calibración del sensor MH-Z19C

La figura 10 es la gráfica del comportamiento de la concentración del CO₂ del detector vs la medida por el MH-Z19C durante la clase de termodinámica (izquierda) y la clase de monitoreo (derecha). La línea recta continua es la curva de calibración. Las ecuaciones 17 (Termodinámica) y 18 (Monitoreo Atmosférico) muestran las ecuaciones de línea recta ajustadas o curvas de calibración. La ecuación 17 es la curva de calibración para la case de termodinámica ($R^2 = 0.9984$); mientras que la ecuación 18 es para la clase de Monitoreo Atmosférico ($R^2 = 0.9952$). En ambas ecuaciones $y_{\text{corregido}}$ es el valor corregido de la concentración de CO₂ mientras que y_{MH} es la lectura del sensor MH-Z19C.

$$y_{\text{corregido}} = 0.911 - 196.63 \cdot y_{\text{BMH}} \quad R^2 = 0.9984 \quad (\text{Ecuación 17})$$

$$y_{\text{corregido}} = 0.8643 - 82.407 \cdot y_{\text{BMH}} \quad R^2 = 0.9952 \quad (\text{Ecuación 18})$$

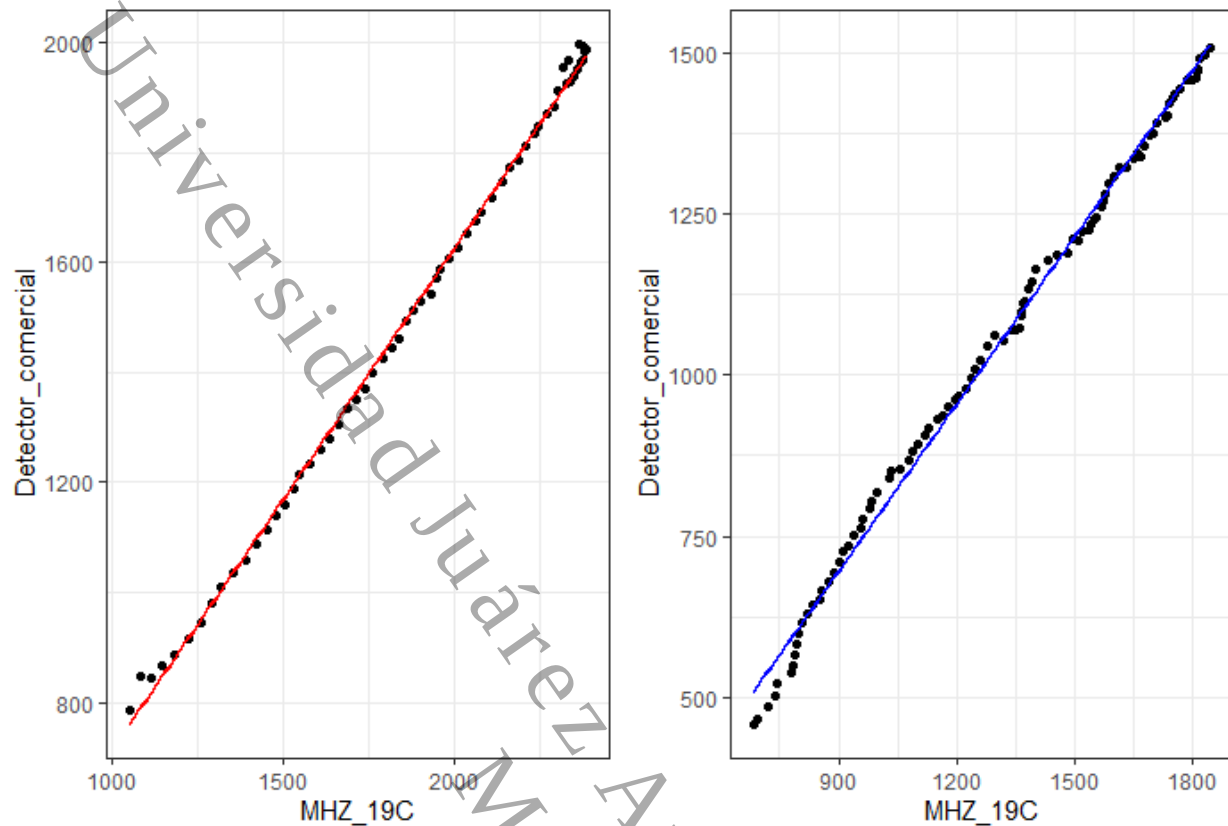


Figura 10. Relación de la concentración generada por el sensor MH-Z19C con respecto al sensor comercial, del día 02 de junio en la clase de Termodinámica (7-9 a.m.) y Monitoreo Atmosférico (9-11 a.m.).

Aunque las curvas de calibración no incluyen la cantidad de estudiantes presentes durante el experimento de monitoreo, es posible que si tenga un efecto en la curva. Por eso sería adecuado realizar la calibración siempre que la cantidad de personas varía significativamente. Por ejemplo, si lo habitual es un salón de clases donde hay alrededor de 10 estudiantes, habría que hacer de nuevo la calibración cuando habitualmente estén presentes alrededor de 30 estudiantes.



8. DISCUSIÓN

Un valor típico de generación de CO₂ según Persily y de Jonge (2017) es de 0.270 L/min para varones con un peso promedio de 77 kg y un nivel de actividad física de 1.2 met y de 0.216 L/min para mujeres con un peso promedio de 66 kg con el mismo nivel de actividad, ambos en edades de entre 16 y 21 años. El estimado teórico en este trabajo fue de 0.301 L/min para hombres y 0.251 L/min para mujeres, pero el peso promedio para hombres varió entre 62 y 85 kg mientras que para mujeres varió entre 45 y 70 kg. Además, la edad varió principalmente entre 18 y 28 años. Aun así, el orden del estimado teórico es del orden de los estimados de Persily y de Jonge (2017).

Típicamente, las tasas de generación de CO₂ se dan en litros de CO₂ por segundo, minuto u hora cómo se observa en la tabla 8. Sin embargo, para propósitos de modelación matemática la unidad conveniente fueron ppm/min. La ecuación 6 se utilizó para hacer esta conversión. Esto facilitó la comparación entre los modelos teóricos (Tablas 10 y 11) y los modelos empíricos (Tabla 12). El resultado, fue que el modelo teórico sobre estimó la tasa de generación de CO₂, fue el esperado. Esto se debe a que el modelo teórico considera un espacio cerrado de forma hermética mientras que la realidad es que las puertas de las aulas de clase tienen rendijas por donde escapa el aire y lo mismo sucede con las ventanas.

Los modelos empíricos que se obtuvieron en este trabajo no incluyen la temperatura ni la humedad relativa del aire interior, solo el tiempo transcurrido en minutos como variable predictora. En su estudio de la calidad del aire en espacios cerrados, Gutierrez et. al. (2023) demostraron que la correlación de la concentración de CO₂ con estas variables, aunque significativa fue baja, mucho menor que 0.5. Además, se consideró que no era necesario incluirlas en el modelo empírico porque el clima siempre estuvo funcionando y ambas variables se mantuvieron casi constantes en cada experimento de monitoreo. En la calibración del sensor MH-Z19C tampoco fue necesario



incluir otras variables ya que el coeficiente de determinación R^2 fue alto, mayor a 0.9. Esto muestra el potencial de este sensor para utilizarlo en proyectos de calidad del aire interior. Aunque el CO₂ no se considera contaminante en interiores, su acumulación en niveles superiores a 1000 ppm indica que un espacio no tiene buena ventilación y de realizarse otras actividades en su interior, es muy posible que la calidad del aire sea mala.

9. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos fueron los esperados, a como fue plasmado en los objetivos y de acuerdo con la metodología, aquí finalmente se presentan las conclusiones de los datos obtenidos:

- La tasa teórica de generación de CO₂ varió con el sexo. En promedio fue de 0.3012 L/min para los hombres y de 0.2512 L/min para las mujeres.
- La tasa de generación de CO₂ máxima fue 0.279 L/min para una mujer con una estatura de 1.60 m y 70 kg de peso, mientras que la mínima fue de 0.219 L/min, con una estatura de 1.65 m y 45 kg de peso.
- El sexo, el peso y la masa corporal influyeron en la estimación de la tasa de generación de CO₂. La tasa máxima en hombres fue de 0.354 L/min, con una estatura de 1.60 y 80 kg de peso, mientras que la mínima fue de 0.260 L/min, con una estatura de 1.86 m y 60 kg de peso. Para las mujeres, la máxima fue 0.279 L/min con una estatura de 1.60 m y 70 kg de peso, mientras que la mínima fue de 0.219 L/min, con una estatura de 1.65 m y 45 kg de peso.
- La estimación empírica de la tasa de generación per-cápita de CO₂ varió entre aulas de clase. En promedio fue de 1.834 ppm/min-per para la clase de Monitoreo Atmosférico y de 1.582 ppm/min-per para la clase de Termodinámica.



- El sensor BMH-Z19C fue adecuado para monitorear concentraciones de CO₂. El coeficiente de correlación entre los datos medidos por el sensor y el detector comercial fue superior a 0.9.
- Las tasas de generación per cápita observadas de CO₂ se pueden utilizar para obtener modelos teóricos más representativos del comportamiento del CO₂ temporal en un aula de clases. Pero para personas en espacios cerrados en otro rango de edades sería importante estimar las tasas de generación per cápita realizando mediciones directas y siguiendo la metodología de este trabajo para ajustar modelos matemáticos.



10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2019). ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2019: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. ASHRAE.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2022). ASHRAE Position Document on Indoor Carbon Dioxide. ASHRAE.
- Arduino. (2025, 17 enero). ¿Qué es Arduino? <https://arduino.cl/que-es-arduino/> Adquisición de datos | Soluciones de prueba y medición. (2025, 4 febrero). Soluciones de Adquisición de Datos (DAQ). <https://dewesoft.com/es>.
- Carbon dioxide. (2025, 8 enero). Wisconsin Department Of Health Services. <https://www.dhs.wisconsin.gov/chemical/carbondioxide.htm>. Centers for Disease Control and Prevention. (s. f.). CDC. <https://www.cdc.gov/>.
- Earl, Bill (2024). Adafruit Data Logger Shield. <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-data-logger-shield.pdf>.
- Espinoza Contreras, D. N. (2024). Análisis descriptivo del nivel de confort del aire interior de una residencia particular con dispositivos de bajo costo. Tesis de licenciatura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Environmental Protection Agency. (2018). Building Air Quality: A Guide for Building Owners and Facility Managers. U.S. Environmental Protection Agency.
- Fernández, J. L. (s. f.). Temperatura. Fisicalab. <https://www.fisicalab.com/apartado/temperatura>.
- González, M. F., De Garayo Balsategui, S. D., & Sarasibar, X. A. (2021). La monitorización de la calidad del aire interior como herramienta de evaluación y mejora de la salubridad de un espacio. Anales de Edificación, 6(3), 13. <https://doi.org/10.20868/ade.2020.4610>.
- Gutierrez, F. J. Q., Sanchez, M. N. R., & Carpio, J. E. P. (2023). Dióxido de carbono en interiores y COVID-19 evaluación de la calidad del aire y su relación con la



ventilación, temperatura y humedad. Memoria Investigaciones En Ingeniería, 25, 2-12.

- IQAir Staff Writers (2021, septiembre 21). indoor carbon dioxide. <https://www.iqair.com/mx/newsroom/indoor-carbon-dioxide-co2>
- Sensor MH-Z19 gas CO2 Dióxido de Carbono (compatible). (s. f.). Naylamp Mechatronics - Perú. <https://naylampmechatronics.com/sensores-gas/1256-sensor-mh-z19-gas-co2-dioxido-de-carbono-compatible.html>
- Shield Datalogger V1.0. (s. f.). Naylamp Mechatronics - Perú. <https://naylampmechatronics.com/ardusystem-shields/274-shield-datalogger-v1.html>.
- Sistema Meteorológico Nacional. (febrero 14, 2025). Comisión Nacional del agua (CONAGUA) https://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/Normales_Climatologicas/Normales9120/tab/nor9120_27054.txt.
- Majumdar, D., & Chatterjee, S. (2020). Modelling Accumulation of Respiratory-CO₂ in Closed Rooms Leading to Decision-Making on Room Occupancy. MAPAN, 35(3), 323-332. <https://doi.org/10.1007/s12647-020-00372-7>.
- Matías Velázquez, A. A. y Torrez Cortés P. J. (2015). Modelo para la estimación de la exposición a la contaminación del aire interior en edificios de la División Académica de Ciencias Biológicas. Tesis de licenciatura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Meteo Navarra - Gobierno de Navarra. (2025, febrero 10). <https://meteo.navarra.es/>
- Montgomery D.C., Peck E.A. y Vining G.G (2006). Introducción al análisis de regression lineal. Tercera edición. CECSA. México.
- Mkt, S. (2022, 17 diciembre). Humedad Relativa: ¿Por Qué es Importante que las Empresas la Midan? SensorGO. <https://sensorgo.mx/humedad-relativa/>



- National Institute for Occupational Safety and Health. (2023). NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards: Carbon Dioxide (CO₂). Centers for Disease Control and Prevention.
- Occupational Safety and Health Administration. (2024). Carbon Dioxide (CO₂) – Chemical Sampling Information. U.S. Department of Labor.
- Persily A, de Jonge L. Carbon dioxide generation rates for building occupants. *Indoor Air*. 2017 Sep;27(5):868-879. doi: 10.1111/ina.12383. Epub 2017 Apr 27. PMID: 28321932; PMCID: PMC5666301.
- Pessaeg, N. L., & Taire, D. (2024). Ventilación de espacios educativos en el contexto de COVID-19 en Puerto Madryn, Argentina. *Meteorologica*, 49, 028. <https://doi.org/10.24215/1850468xe028>
- Rafferty, & P, J. (2015, 29 mayo). Heat wave | Temperature Extremes, Climate Change & Heat Stress. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/heat-wave-meteorology>
- Ramos H.S; Magaña E.V.; Carrera-Velúeta J.M. (2018). Modelación de la calidad del agua, del aire y del transporte de contaminantes en suelo. UJAT.
- Ramos Pérez, R. (2024). Estudio del comportamiento de parámetros meteorológicos básicos del aire ambiente exterior medidos con sensores de bajo costo. Tesis de licenciatura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Tillett, T. (2012). Don't Hold Your Breath: Indoor CO₂ Exposure and Impaired Decision Making. *Environmental Health Perspectives*, 120(12). <https://doi.org/10.1289/ehp.120-a475a>
- Liu, T. (s.f.) Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22. Archivo PDF. <https://cdn.sparkfun.com/assets/f/7/d/9/c/DHT22.pdf>.
- UNIT Electronics. (2025, 6 febrero). Display LCD 16×2 fondo azul / amarillo - UNIT Electronics. <https://uelectronics.com/producto/display-lcd-16x2-fondo-azul->



amarillo/#.~:text=Este%20display%20tiene%20un%20tama%C3%B1o,microcontrolador%20o%20tarjeta%20de%20desarrollo.

- UNIT Electronics. (2025, febrero 1). Mini Protoboard 170 Pts - Breadboard - UNIT Electronics. https://uelectronics.com/producto/mini-protoboard-170-pts/?srsltid=AfmBOoolqSFxqUSZ93M_3SK5ECEqo5lruHwB2RQ7zOOtQSAK_0HZ7s3F
- Vorobioff, J., Boggio, N. G., Checozzi, F. R., Garrón, T. P., & Rinaldi, C. (2024b). Monitor de CO₂ para medida de la ventilación en ambientes cerrados, prevención del COVID-19 y mejora del rendimiento laboral. *Tecnura*, 27(78), 142-156. <https://doi.org/10.14483/22487638.19522>.
- Young, H. D., Ford, A. L., & Freedman, R. A. (2009). Física universitaria. Volumen 1. <http://up-rid2.up.ac.pa:8080/xmlui/handle/123456789/1598>.
- Zemitis, J., Bogdanovics, R., & Bogdanovica, S. (2021). The Study of Co₂ Concentration in A Classroom During The Covid-19 Safety Measures. *E3S Web Of Conferences*, 246, 01004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124601004>.
- Zhengzhou Winsen Electronics Technology CO, Ltd. (2015). Air Quality Gas Sensor. Archivo PDF. [https://www.winsensor.com/d/files/PDF/Semiconductor%20Gas%20Sensor/MQ135%20\(Ver1.4\)%20-%20Manual.pdf](https://www.winsensor.com/d/files/PDF/Semiconductor%20Gas%20Sensor/MQ135%20(Ver1.4)%20-%20Manual.pdf).
- Zhengzhou Winsen Electronics Technology CO, Ltd. (2020). Infrared CO₂ sensor module. Archivo PDF. [https://www.winsen-sensor.com/d/files/infrared-gas-sensor/ndir-co2-sensor/mh-z19b-co2-manual\(ver1_6\).pdf](https://www.winsen-sensor.com/d/files/infrared-gas-sensor/ndir-co2-sensor/mh-z19b-co2-manual(ver1_6).pdf)

Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional	
Título de Tesis:	MODELO MATEMÁTICO DEL COMPORTAMIENTO TEMPORAL DEL CO₂ GENERADO POR RESPIRACIÓN EN AULAS DE CLASE
Autor(a) o autores(ras) de la Tesis:	De la Cruz Herrera Hector Jesus, Ramos Herrera Sergio.
ORCID:	https://orcid.org/0009-0001-3909-8979
Resumen de la Tesis:	El presente trabajo desarrolló un modelo matemático para la predicción del comportamiento del dióxido de carbono (CO ₂) generado en el proceso de respiración por los estudiantes en dos aulas de clase. La investigación surgió de la necesidad de conocer el nivel de exposición que tienen alumnos y maestros a concentraciones de CO ₂ al estar en horario de clases.
Palabras claves de la Tesis:	Dióxido de carbono, modelo matemático, sensor, tasa de generación, nivel de exposición.
Referencias citadas:	- Persily A, de Jonge L. Carbon dioxide generation rates for building occupants. Indoor Air. 2017 Sep;27(5):868-879. doi: 10.1111/ina.12383. Epub 2017 Apr 27. PMID: 28321932; PMCID: PMC5666301. - Pessaeg, N. L., & Taire, D. (2024). Ventilación de espacios educativos en el contexto de COVID-19 en Puerto Madryn, Argentina. Meteorologica, 49, 028. https://doi.org/10.24215/1850468xe028