

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**“PROPUESTA DE MODELO DE PREDICCIÓN DE SATURACIÓN DE CO₂ EN
AULAS UNIVERSITARIAS BAJO CRITERIOS DE CERTIFICACIÓN
SOSTENIBLE”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR

JORGE LUIS BALCAZAR RIOS
ID:0009-0009-9976-795X

ASESOR

MSc. EDWARD SANTA MARÍA DÁVILA
ID:0000-0001-6789-4983

LIMA - PERÚ

2024

© 2024, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados
**“El autor autoriza a la UNI a reproducir la Tesis en su totalidad o en parte,
con fines estrictamente académicos.”**
BALCAZAR RIOS, Jorge Luis
jbalcazarr@uni.pe
937600937

DEDICATORIA

A mis padres Jorge y Amelia

Por darme la vida. Por brindarme la oportunidad de poder estudiar esta carrera tan apasionada e interesante. Asimismo, por confiar en mí y en las decisiones que he tomado hasta el momento.

A mis hermanas Mayli e Ysamar

Por ser parte de mi motivación a culminar mi tesis e incentivar en ellas un futuro profesional.

A mi esposa Xiomara

Por ser mi soporte en los días malos, por promover en mí esas ganas de culminar mi tesis. Por el apoyo y motivación constante en este proceso final.

A mi asesor Edward Santa María

Por su constante preocupación y orientación, que contribuyeron al logro de mis metas y objetivos trazados.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, deseo expresar mi sincero agradecimiento al asesor Edward Santa María por brindarme la oportunidad de investigar este tema desde mis años universitarios, que finalmente se convirtió en el foco de mi tesis. Quiero agradecerle también por su constante seguimiento, dedicación y motivación para culminar mis entregables en este proceso de elaboración de tesis. Le agradezco por fomentar en mí el interés por la investigación y por la confianza depositada en los proyectos que hemos llevado a cabo juntos.

También agradezco al Ingeniero Marck Regalado por ser un gran apoyo en la elaboración de mi tesis, ofreciéndome su ayuda incondicional ante las diversas dudas que surgieron durante la planificación y redacción tanto del plan de tesis como de la propia tesis. Estoy muy agradecido por su colaboración, ya que desempeña un papel crucial en el desarrollo de las investigaciones en la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI.

Asimismo, agradezco a la Universidad Nacional de Ingeniería por proporcionarme un excelente cuerpo docente que contribuyó a mi formación como ingeniero civil. De igual manera, agradezco al Vicerrectorado de Investigación por brindarme la oportunidad de realizar esta investigación.

Además, agradezco a mi familia, especialmente a mis padres y hermanas, con quienes he compartido gran parte de mi etapa universitaria. Les agradezco por permitirme estudiar esta apasionante carrera en la universidad que elegí y por brindarme su apoyo incondicional en todas las decisiones que he tomado a lo largo de mi vida.

Finalmente, expreso mi gratitud a mi esposa por ofrecerme su apoyo emocional y por brindarme constantes palabras de aliento en situaciones en las que no me sentía capaz.

ÍNDICE

Resumen	3
Abstract.....	4
Prólogo	5
Lista de tablas	6
Lista de figuras.....	7
Lista de símbolos y siglas.....	9
Capítulo I: Introducción	10
1.1 Generalidades	10
1.2 Descripción del problema de investigación	11
1.2.1 Problema general.....	14
1.2.2 Problemas específicos	15
1.3 Objetivos del estudio	15
1.3.1 Objetivo general	15
1.3.2 Objetivos específicos	15
1.4 Hipótesis.....	16
1.4.1 Hipótesis general	16
1.4.2 Hipótesis específicas	16
1.5 Antecedentes investigativos	16
Capítulo II: Marco teórico y conceptual	20
2.1 Dióxido de carbono.....	20
2.2 Certificación LEED	20
2.3 Certificación WELL	28
2.4 Calidad del aire interior.....	29
2.5 Regresión lineal.....	30
2.6 Regresión lineal múltiple	31
Capítulo III: Medición de información.....	35
3.1 Metodología de medición	35
3.1.1 Equipo	35
3.1.1.1 PM-106SD	35
3.1.1.2 Equipo “JVCOR02”.....	37
3.1.1.3 Sensor de temperatura y humedad	38
3.1.1.4 Sensor de calidad del aire (CO ₂)	39
3.1.1.5 Lector SD	39
3.1.2 Ambiente de estudio.....	43
3.1.2.1 Información de ambientes	44
3.1.2.2 Ubicación de equipo	47

3.1.2.3 Protocolo de medición	50
3.2 Proceso de toma de datos.....	55
3.2.1 Días de medición.....	55
3.2.2 Encuesta para usuarios.....	60
Capítulo IV: Análisis de modelos de predicción	62
4.1 Análisis de datos	62
4.1.1 Salon g2-122	65
4.1.1.1 Modelos de regresión inicial (G2-122).....	66
4.1.1.2 Modelos de regresión final (G2-122)	68
4.1.2 Salon g2-130	71
4.1.2.1 Modelos de regresión inicial (G2-130).....	71
4.1.2.2 Modelos de regresión final (G2-130)	73
4.1.3 Salon G2-142	75
4.1.3.1 Modelos de regresión inicial (G2-142).....	76
4.1.3.2 Modelos de regresión final (G2-142)	78
4.1.4 Unión	80
4.2 Evaluacion de criterios de certificación	83
4.2.1 Áreas verdes	83
4.2.1.1 Salón G-142	83
4.2.1.2 Salón G-122 Y G2-130.....	85
4.2.2 Calidad de Aire interior	87
4.2.3 Confort del usuario	92
Capítulo V: Propuesta de mejora	94
5.1 Propuesta de mejora para la saturación del CO2	96
5.1.1 Ventilación Natural	96
5.1.2 Ventilación Mecánica	97
5.1.3 Ventilación Natural + Mecánica	100
5.2 Propuesta de mejora de la calidad del aire interior y confort del usuario... 100	100
Conclusiones	102
Recomendaciones.....	104
Referencias bibliográficas.....	106
Anexos	109

RESUMEN

Esta investigación aborda la relación crítica entre la infraestructura construida y la calidad del aire en espacios interiores, centrándose específicamente en aulas universitarias. Se destaca la importancia de garantizar condiciones óptimas, especialmente en entornos de oficina, donde la calidad del aire no solo afecta la salud física, sino también el rendimiento laboral y la concentración. El objetivo general es proponer modelos numéricos que estimen y mejoren los niveles de CO₂, considerando criterios de certificación sostenible.

Los objetivos específicos se enfocan en desarrollar una metodología para medir la calidad del aire interior en aulas universitarias, comparar modelos de predicción del CO₂ respecto a variables como la presencia de personas, aberturas, temperatura y humedad, y proponer mejoras basadas en los mejores modelos de predicción para cada ambiente.

Para la medición, se utilizaron equipos especializados como el PM-106SD y el equipo "JVCOR02". Los escenarios de estudio se ubicaron en aulas de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería, seleccionadas por su idoneidad y la cantidad significativa de personas presentes durante el tiempo de estudio.

El protocolo de medición incluyó la ubicación estratégica del equipo, la obtención de permisos y la realización de mediciones durante cuatro días en diferentes horarios. Además, se complementó con una encuesta a los usuarios para evaluar su satisfacción.

El análisis de datos se enfocó en la creación de modelos matemáticos de regresión lineal, la evaluación de criterios de certificación sostenible, y el abordaje de la problemática de la saturación de CO₂, calidad del aire interior y confort del usuario. Como resultado, se propondrán mejoras para optimizar estos aspectos en ambientes de estudiante.

ABSTRACT

This research addresses the critical relationship between built infrastructure and indoor air quality, specifically focusing on university classrooms. Emphasis is placed on the importance of ensuring optimal conditions, particularly in office environments, where air quality not only impacts physical health but also work performance and concentration. The overall objective is to propose numerical models that estimate and enhance CO₂ levels, considering sustainable certification criteria.

Specific objectives focus on developing a methodology for measuring indoor air quality in university classrooms, comparing CO₂ prediction models with variables such as the presence of individuals, openings, temperature, and humidity, and proposing improvements based on the best prediction models for each environment.

Specialized equipment such as PM-106SD and the "JVCOR02" device were used for measurements. Study scenarios were located in classrooms of the Faculty of Civil Engineering at the National University of Engineering, chosen for their suitability and significant presence of individuals during the study period.

The measurement protocol included strategically placing the equipment, obtaining permissions, and conducting measurements for four days at different times. Additionally, it was complemented with a survey to assess user satisfaction.

Data analysis focused on creating mathematical models of linear regression, evaluating sustainable certification criteria, and addressing the issues of CO₂ saturation, indoor air quality, and user comfort. As a result, proposals for improvements will be suggested to optimize these aspects in study environments.

PRÓLOGO

Las aulas universitarias son espacios donde los estudiantes pasan una gran parte de su tiempo. Sin embargo, la calidad del aire en estos espacios no siempre es óptima, lo que puede tener un impacto negativo en la salud y el rendimiento académico de los estudiantes. La presente investigación se basa en un estudio exploratorio que utiliza instrumentos especializados para medir la concentración de CO₂ en aulas universitarias. El objetivo es obtener información precisa sobre la calidad del aire interior y su relación con las certificaciones ambientales para edificaciones.

Los hallazgos de esta investigación exploratoria pueden contribuir a mejorar las condiciones de estudio en las aulas universitarias, a través de la implementación de medidas para reducir la concentración de CO₂ y mejorar la calidad del aire interior, lo cual se puede leer en las propuestas de mejora.

Este estudio abre la puerta a nuevas investigaciones en el campo de la calidad del aire interior en las aulas universitarias, como el análisis del impacto del CO₂ en la salud y el rendimiento académico de los estudiantes, evaluación de estrategias para reducir la concentración de CO₂ en las aulas, pautas y recomendaciones para la certificación ambiental de edificios universitarios.

En este proceso Jorge Luis Balcazar ha trabajado de forma intensa en la elaboración de protocolos. El proceso se inició en el período de pandemia, donde la preocupación por la ocupación y calidad del aire de ambientes interiores tomó relevancia y notoriedad. Esperamos que el aporte de la investigación permita abrir nuevos proyectos de investigación similares, para la mejora de las aulas y de los ambientes académicos.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características del medidor de temperatura, humedad y CO2...	36
Tabla 2. Horario de medición del equipo.....	50
Tabla 3. Cronograma de medición	52
Tabla 4. Cantidad de personas registradas en el salón G-122	55
Tabla 5. Cantidad de personas registradas en el salón G-130	56
Tabla 6. Cantidad de personas registradas en el salón G-142	56
Tabla 7. Días de medición	57
Tabla 8. Formato de presentación de Data (Salón G2-122)	57
Tabla 9. Formato de presentación de Data (Salón G2-130)	58
Tabla 10. Formato de presentación de Data (Salón G2-142).....	59
Tabla 11. Encuesta de sondeo sobre confort de usuario	61
Tabla 12. Registro de CO2 promedio y #personas (Salón G2-122)	66
Tabla 13. Formato de presentación de Data – Inicial (Salón G2-122)	68
Tabla 14. Registro de CO2 y #personas (Salón G2-122).....	69
Tabla 15. Formato de presentación de Data - Final (Salón G2-122).....	70
Tabla 16. Registro de CO2 promedio y #personas (Salón G2-130)	71
Tabla 17. Formato de presentación de Data - Inicial (Salón G2-130)	72
Tabla 18. Registro de CO2 y #personas (Salón G2-130).....	74
Tabla 19. Formato de presentación de Data – Final (Salón G2-130).....	75
Tabla 20. Registro de CO2 promedio y #personas (Salón G2-142)	76
Tabla 21. Formato de presentación de Data - Inicial (Salón G2-142)	77
Tabla 22. Registro de CO2 y #personas (Salón G2-142).....	79
Tabla 23. Formato de presentación de Data - Final (Salón G2-142).....	80
Tabla 24. Formato de presentación de Data (Unión)	81
Tabla 25. Tabla resumen de modelos óptimos	82
Tabla 26. Crédito LEED – Programa de gestión de la calidad del aire interior	87
Tabla 27. Crédito LEED – Estrategias mejoradas para la calidad del aire interior	89
Tabla 28. Crédito LEED – Comodidad térmica	91
Tabla 29. Crédito LEED – Encuesta sobre el confort de los ocupantes ...	91
Tabla 30. Crédito WELL – Encuesta sobre el confort de los ocupantes ...	92
Tabla 31. Límites permisibles de variables	95
Tabla 32. Coeficientes de la normativa ASHRAE	98
Tabla 33. Propuesta de mejora de la calidad del aire interior y confort del usuario.	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Puntajes máximos y mínimos en LEDD	21
Figura 2. Equipo medidor de temperatura, humedad y concentración de CO2 ..	35
Figura 3. Equipo medidor de temperatura, humedad y CO2 “JVCOR02”	37
Figura 4. Componentes del equipo “JVCOR02”.....	38
Figura 5. Sensor de temperatura y humedad empleado para el dispositivo “JVCOR02”.....	38
Figura 6. Sensor de calidad de Aire – CO2 empleado para el dispositivo “JVCOR02”.....	39
Figura 7. Lector SD empleado para el dispositivo “JVCOR02”	40
Figura 8. Calibración de Temperatura para el dispositivo “JVCOR02”	41
Figura 9. Calibración de humedad para el dispositivo “JVCOR02”	42
Figura 10. Calibración de CO2 para el dispositivo “JVCOR02”.....	42
Figura 11. Ejemplo de Ambiente de medición.....	45
Figura 12. Vista en planta de los salones (G-122, G-130, G-142)	46
Figura 13. Detalle de puertas y ventanas.....	46
Figura 14. Puntos de medición en sala - comedor	47
Figura 15. Altura de posicionamiento de equipo	48
Figura 16. Ubicación de equipo adecuándose al escenario.....	49
Figura 17. Ubicación del equipo en campo	49
Figura 18. Ejemplo de nomenclatura	51
Figura 19. Tiempo de estabilización del equipo	51
Figura 20. Registro de valores monitoreados.....	52
Figura 21. Flujograma de protocolo de medición	53
Figura 22. Medición de CO2 en los 05 días de análisis – Aula G2-122	58
Figura 23. Medición de CO2 en los 05 días de análisis (Salón G2-130).....	59
Figura 24. Medición de CO2 en los 05 días de análisis (Salón G2-142).....	60
Figura 25. Flujograma de análisis	63
Figura 26. Salón G2-142	64
Figura 27. Salón G2-142	65
Figura 28. Fotografía de campo del salón G2-122.....	65
Figura 29. Correlación de # personas vs CO2 (Salón G2-122).....	67
Figura 30. Correlación de # personas vs CO2 (Salón G2-122).....	69
Figura 31. Fotografía de campo del salón G2-130.....	71
Figura 32. Correlación de # personas vs CO2 (Salón G2-130).....	72

Figura 33. Correlación de # personas vs CO2 (Salón G2-130).....	74
Figura 34. Plano de distribución de oficina N°2	75
Figura 35. Correlación de # personas vs CO2 (Salón G2-142).....	77
Figura 36. Correlación de # personas vs CO2 (Salón G2-142).....	79
Figura 37. Área verde 1 frente al salón G-142	83
Figura 38. Área verde 2 frente al salón G-142	84
Figura 39. Zona de descanso frente al salón G-142	84
Figura 40. Estacionamiento frente al salón G2-142	85
Figura 41. Áreas verdes 1 frente a los salones G2-122 y G-130	85
Figura 42. Área verde 2 cercana a los salones G2-122 y G-130	86
Figura 43. Jardín cercano a los salones G2-122 y G2-130.....	86
Figura 44. Resultados de CO2 en escenarios condicionantes.....	95
Figura 45. Propuesta de ventilación natural	97
Figura 46. Resultados de CO2 en escenarios condicionantes.....	99
Figura 47. Propuesta de ventilación mecánica.....	100

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

$^{\circ}\text{C}$: *Grados celsius de temperatura*

$\frac{\text{m}}{\text{s}}$: *Movimiento del aire*

SD: *Tajeta digital segura*

R^2 : *Coeficiente de determinación*

V: *Símbolo de ventana*

P: *Símbolo de puerta*

CO₂: *Concentración de CO₂*

ppm: *Concentración de CO₂*

X1: *número de personas*

X2: *porcentaje de aberturas*

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

El ser humano, en su día a día, requiere contar con una serie de infraestructuras que faciliten y respalden el desarrollo de sus actividades cotidianas. Estas infraestructuras comprenden elementos tan fundamentales como carreteras, puentes y edificaciones. Dentro de este último aspecto, los edificios desempeñan un papel crucial al proporcionar espacios destinados a diversos fines, tales como la educación, la vivienda, el comercio y las oficinas.

En particular, las oficinas constituyen lugares donde las personas invierten significativas horas de su tiempo realizando tareas laborales. Es en este contexto que surge la importancia de garantizar condiciones óptimas, y uno de los aspectos vitales es la calidad del aire interior. Comprender que la salud y el bienestar de quienes ocupan estos espacios están directamente relacionados con la pureza del aire que respiran es esencial.

Es importante mencionar que la concentración del CO₂ incide en el rendimiento y bienestar de los estudiantes, ya que el rendimiento de alumnos y profesores queda mermado cuando los niveles de CO₂ son elevados, esta situación provoca, entre otros, un déficit de atención (Europa Press, 2020)

La calidad del aire en oficinas no solo afecta la salud física, sino también el rendimiento laboral y la concentración. Por lo tanto, proporcionar una atmósfera interior limpia y saludable se convierte en una responsabilidad clave para garantizar el bienestar de los usuarios. La implementación de sistemas de ventilación eficientes, la elección de materiales de construcción que favorezcan la calidad del aire y la adopción de prácticas que minimicen la contaminación son aspectos fundamentales en la creación de entornos laborales propicios para un rendimiento óptimo y un estilo de vida saludable.

Las certificaciones sostenibles como LEED, EDGE y BREEAM son herramientas clave para promover la construcción y el desarrollo urbano sostenible. Estas certificaciones proporcionan una verificación independiente de las características sostenibles de los edificios, lo que garantiza su eficiencia en el uso de recursos, alto rendimiento, salud y rentabilidad. Estas certificaciones no solo benefician a

quienes construyen y operan los edificios, sino también al medio ambiente y a quienes los utilizan, al fomentar una construcción más sostenible, rentable y saludable. (GBCPE, 2016).

En conclusión, la conexión entre la infraestructura construida y la calidad del aire en espacios interiores, especialmente en aulas universitarias, no solo es vital para la salud individual, sino también para el funcionamiento eficiente de las actividades diarias. Abordar este aspecto no solo mejora la productividad laboral, sino que también contribuye al bienestar general de la sociedad.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

En edificios como escuelas, hospitales, oficinas, centros comerciales o residencias de mayores, entre otros, coexisten patógenos (hongos, virus, ácaros), partículas y compuestos volátiles que alteran la calidad del ambiente interior y originan efectos nocivos en la salud de las personas. Lo que, sumado a las condiciones operativas no adecuadas de sistemas de ventilación y recirculación de aire, refrigeración o calefacción, suponen un potencial problema en la calidad del ambiente dentro de los edificios de uso público.

Para poder diseñar un proyecto de construcción, es importante considerar criterios de salud y bienestar de los residentes, como los detallados en algunas certificaciones de construcción sostenible. Tal es el caso de la certificación WELL, de la cual actualmente, existen casi 6,000 proyectos registrados para la obtención de esta certificación en más de 65 países. Es aplicable a proyectos de vivienda, oficinas, centros educativos, locales comerciales y restaurantes (Muñoz, 2017). Por otro lado, se encuentra la certificación LEED, que cuenta con el indicador “Control del suministro de aire exterior” dentro de la categoría “Calidad interior de ambientes”. En esta, se califica con 1 punto si la vivienda posee un sensor de CO₂ que permita dar aviso cuando los niveles de su concentración varíen en 10% o más de los valores del diseño (United States Green Building Council [USGBC], 2009).

(Quispe, 2020) examinó la calidad del aire en oficinas municipales, destacando el CO₂ como la principal fuente de contaminación. Se empleó un enfoque no experimental y correlacional, monitoreando el CO₂ con detectores NDIR durante

15 días. Los resultados revelaron una correlación inversa entre la concentración de CO₂ y la ventilación, con dos oficinas excediendo los límites permitidos. Se recomienda aumentar la ventilación abriendo ventanas durante los descansos prolongados para mitigar la acumulación de CO₂.

Con respecto a las condiciones climáticas, estas nos ayudan a alertar: Calidad interior de ambientes. Calidad del aire, confort térmico e higrotérmico.

Hay algunos esquemas de calificación que examinan Calidad Ambiental Interior, con sus siglas en inglés (IEQ) para edificios, sin embargo, estos tienden a prestar poca atención a los problemas relacionados con la salud y el bienestar de los ocupantes, ya que se establecen amplias cuestiones de sostenibilidad como prioridades más altas (por ejemplo, BREEAM y LEED).

WELL fue desarrollado, no para sustituir los sistemas de certificación de edificios verdes, sino para enfatizar las atenciones especiales para asegurar la salud y el bienestar de los residentes en los edificios. De estos planes, WELL es el plan más reconocido a nivel mundial. Es un sistema de certificación líder para estimar la salud y la sostenibilidad de los edificios (Obrecht et al., 2019).

Como ejemplo de los problemas que genera un mal diseño de la calidad interior de los ambientes, Ferreira y Cardoso (2013) evaluaron 1,019 alumnos de 51 escuelas primarias de la ciudad de Coímbra (Portugal), donde la concentración de CO₂ llegaba a veces a 1,942 ppm, lo que implicaba un riesgo considerable para la salud de los niños. Los síntomas y enfermedades respiratorias más prevalentes identificados en los niños fueron estornudos, estertores, sibilancias, rinitis y asma. Además de ello, la falta de concentración se asoció con las concentraciones de CO₂. La falta de ventilación de interiores causa una mala calidad del aire y provoca mayor incidencia del síndrome del edificio enfermo (Thach et al., 2019).

La relación entre la concentración de CO₂ y el rendimiento en la toma de decisiones fue estudiada por Satish et al. en 2012. Los autores realizaron varias pruebas de rendimiento en las que los participantes estuvieron expuestos a niveles crecientes de CO₂ durante la realización de tareas de toma de decisiones en un entorno de oficina. El desempeño fue evaluado por un total de nueve métricas (orientación a la tarea, búsqueda de información, amplitud de enfoque,

iniciativa, actividad enfocada, etc.) en umbrales de CO₂ de 600, 1.000 y 2.500 ppm respectivamente. El estudio encontró que un aumento de CO₂ de 600 a 1000 ppm redujeron considerablemente los resultados de rendimiento de seis de las nueve métricas. Unos aumentos de 1000 a 2500 ppm disminuirían aún más los resultados de siete de las nueve métricas. Además, a 2500 ppm el desempeño de tres de las nueve métricas (iniciativa, uso de información y estrategia básica) mostró resultados en, o limítrofes, niveles disfuncionales (Satish, et al., 2012).

Es sabido que la falta de ventilación en ambientes cerrados eleva el riesgo de contraer enfermedades infecciosas, una persona que esté contagiada de COVID19 con solo toser o incluso hablar estaría esparciendo pequeñas gotas de saliva, pudiendo potencialmente contagiar a las otras personas de su entorno (Aernout et al., 2020).

Según (National Health Insurance Statistical Yearbook, 2021) el número y los gastos médicos de los hospitales domésticos aumentan cada año. La conciencia sobre la salud y su importancia están creciendo gradualmente debido a la reciente pandemia de COVID-19 y los micropolvos.

Por otro lado, Rudnick y Milton (2003) muestran que el riesgo de contraer una infección por medio de pequeñas gotículas o aerosoles tiene una relación directa con la concentración de CO₂. La probabilidad de infección aumenta con el tiempo de exposición y el número de personas infectadas, pero también lo hace por la disminución de una ventilación adecuada (ventilación del exterior, no aire reciclado). Se puede inferir esta investigación que a menor concentración de CO₂, hay una menor tasa de reproducción del virus.

La literatura señala que concentración del CO₂ entre 400 ppm y 800 ppm se considera un ambiente agresivo desde el punto de vista de la Carbonatación; contenidos de humedad entre 60% y 75% la reacción que da lugar a la carbonatación avanza violentamente; temperaturas altas proporciona la movilidad de las moléculas facilitando el transporte de sustancias, como lo es el CO₂ y bajas temperaturas puede dar lugar a condensaciones, que a su vez origina aumentos locales de vapor de agua en la atmósfera y que varía con la temperatura (Peña et al., 2020).

Asimismo, es importante controlar la concentración de CO₂ en un espacio cerrado, la cual no debe ser mayor de aproximadamente 700 ppm por encima de los niveles de CO₂ del aire exterior. Esto permitiría que una mayoría sustancial de los visitantes que ingresan al espacio cerrado estén satisfechos con respecto a los bioefluentes humanos. Las concentraciones de CO₂ en el aire exterior aceptable suelen oscilar entre 300 y 500 ppm; entonces, el rango aceptable de concentración de CO₂ en el aire interior debe oscilar entre 1000 y 1200 ppm (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [ASHRAE], 2013).

Ferreira y Cardoso (2013) menciona que el nivel de la contaminación del aire dentro de los edificios es a menudo mucho peor que el exterior y puede alcanzar cifras de dos a cinco veces, y ocasionalmente hasta cien veces, más altas que los niveles de contaminación en el exterior. Los niveles de contaminación del aire interior se vuelven más relevantes cuando las personas generalmente pasan alrededor del 80% al 90% de su tiempo dentro de los edificios.

Como se puede observar, es muy importante tener un control del CO₂ y poseer una adecuada ventilación puesto que, si no es controlado, podría causar síntomas y enfermedades respiratorias, problemas para poder concentrarse, propagación de contagio a un nivel exponencial y, como consecuencia, se pone en riesgo la salud y bienestar de los ocupantes. En la tesis, se pretende elaborar un protocolo que condicione la variación del flujo de aire en los distintos escenarios, para así optimizar y comparar los escenarios a través de modelos numéricos que permitan estimar y mejorar los niveles de CO₂ con la ayuda de un dispositivo calibrado, considerando los criterios de la certificación sostenible. Por ello, se proponen los siguientes problemas general.

1.2.1 Problema general

Ante lo anteriormente expuesto, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo estimar y mejorar los niveles de CO₂ en ambientes cerrados de aulas universitarias, en el marco de los criterios de certificación sostenible?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cómo evaluar los indicadores de la calidad del aire interior en ambientes de aulas universitarias, teniendo en cuenta los criterios de la certificación sostenible?
- ¿Cómo simular el CO₂ en función de indicadores de la calidad del aire interior en aulas universitarias, teniendo en cuenta los criterios de certificación sostenible?
- ¿Cómo mejorar la calidad del aire interior en aulas universitarias, teniendo en cuenta los criterios de certificación sostenible?

1.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.3.1 Objetivo General

Proponer modelos numéricos que permitan estimar y mejorar los niveles de CO₂ a través de las características de un ambiente cerrado en aulas universitarias, considerando criterios de certificación sostenible.

1.3.2 Objetivos Específicos

Con el fin de cumplir con el objetivo general propuesto, definido a partir del problema general, este se desglosa en una serie de objetivos específicos, los cuales responden individualmente a cada problema específico indicado:

- Proponer una metodología para la medición de la calidad del aire interior en ambientes de aulas universitarias, considerando criterios de certificación sostenible.
- Generar y comparar la calidad de distintos modelos de predicción del CO₂ respecto a los niveles de presencia de personas, porcentaje de aberturas, temperatura y humedad en el interior de los ambientes de aulas universitarias, considerando criterios de certificación sostenible.
- Proponer mejoras al CO₂ en función de los mejores modelos de predicción para cada ambiente de aulas universitarias, considerando criterios de certificación sostenible.

1.4 HIPÓTESIS

1.4.1 Hipótesis general

Es factible hallar una correlación confiable entre las concentraciones de CO₂ en aulas universitarias respecto a la presencia de personas, para proponer mejoras en la calidad interior de ambientes. Se estudiarán los niveles de humedad, temperatura y presencia de personas en aulas universitarias con el objetivo de mejorar la calidad interior de dichos ambientes.

1.4.2 Hipótesis específicas

Con el fin de comprobar la veracidad de la hipótesis general, esta se descompone en una serie de hipótesis específicas, que a la vez se relacionan con cada problema y objetivo específico indicado anteriormente:

- La metodología propuesta para la medición de calidad del aire interior en aulas universitarias será la correcta para cumplir con el objetivo general.
- Luego de la comparación de los distintos modelos de predicción de CO₂ respecto a los niveles de presencia de personas, porcentaje de aberturas, temperatura y humedad en aulas universitarias, se encontrará el modelo óptimo.
- La metodología de medición empleada ayudará a estimar los puntajes solicitados por los lineamientos de la certificación sostenible.

1.5 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

Fan et al. (2017) estudiaron la concentración de dióxido de carbono (CO₂) investigando una típica sala conformada por 6 estudiantes de posgrado con ventilación natural en la en una universidad University Education Science de China. Se monitoreó la temperatura, la humedad relativa y la concentración de CO₂ durante 4 semanas con registradores de datos de CO₂ (en la parte interior) y data meteorológica (en la parte exterior). Todos los instrumentos registraron datos en un intervalo de 5 minutos. Además, a los ocupantes se les entregó una hoja de registro de ocupación, los períodos de tiempo ocupados y desocupados, y las operaciones de apertura/cierre de la ventana/puerta. Los resultados demostraron que, debido a las altas tasas de ocupación, el nivel de CO₂ en interiores a menudo excedía las 1,000 ppm, llegando incluso a un valor pico de 3,000 ppm. Estos resultados implicaron que el espacio estudiado requería

atención para cumplir con un IAQ (Indoor Air Quality) “Calidad del aire interior” aceptable.

Park et al. (2019) evaluaron las condiciones de rendimiento existentes en relación con la satisfacción de los ocupantes en 64 edificios en Pittsburgh, Pensilvania (Estados Unidos), utilizando la Evaluación Nacional del Medio Ambiente Toolkit (NEAT). Con el conjunto de datos generado, se realizó una regresión multivariada y el análisis de coeficientes de correlación múltiple en la calidad del aire interior. Los análisis revelaron que el umbral de CO₂ de 582 ppm es la mayor satisfacción de los ocupantes en edificios de oficinas. Para garantizar una buena calidad del aire, el análisis permitió recomendar las directrices de diseño aplicables, como el contar con ventanas operables. A través de este estudio, se demostró que es posible desarrollar sistemáticamente una buena base de datos que conduzca a umbrales críticos y pautas de diseño para la máxima satisfacción de los ocupantes a través de datos ambientales.

Langer et al. (2015) evaluaron el ambiente interior en 20 casas pasivas nuevas y 21 casas nuevas de construcción convencional en Suecia, durante las temporadas de calor en los períodos 2012/2013 y 2013/2014. La temperatura, la humedad relativa (las tasas de intercambio de aire (AER) se estimaron a partir de las concentraciones de CO₂ medidas en los dormitorios. Las mediciones se realizaron por 2 semanas durante cada una de las cuatro estaciones, a los participantes se les informó abstenerse de abrir las ventanas. Se utilizaron monitores de CO₂ calibrados donde se pudo encontrar que las concentraciones fueron más bajas durante el verano en comparación con la estación fría del año, debido a más apertura frecuente de ventanas durante los meses más cálidos.

Khan et al. (2021) realizaron encuestas para saber los problemas de calidad ambiental interior en edificios, teniendo como variables de análisis la calefacción, ventilación y aire acondicionado. Se utilizó la ayuda de los smartphones, para las encuestas de satisfacción ambiental que se realizaron a los participantes; paralelamente, se realizaron mediciones del ruido, temperatura, concentración de CO₂ y humedad relativa. El estudio demostró que los votos térmicos recolectados con los smartphones podrían estar relacionados con las variaciones en la temperatura interior y el flujo de aire de ventilación. Además, gracias a la

recolección de los datos con aplicativo, ayudan a reajustar las mediciones de calidad ambiental, volviéndolas más precisas.

La relación entre la concentración de CO₂ y el rendimiento en la toma de decisiones fue estudiada por Satish et al. en 2012. Los autores realizaron varias pruebas de rendimiento en las que los participantes estuvieron expuestos a niveles crecientes de CO₂ durante la realización de tareas de toma de decisiones en un entorno de oficina. El desempeño fue evaluado por un total de nueve métricas (orientación a la tarea, búsqueda de información, amplitud de enfoque, iniciativa, actividad enfocada, etc.) en Umbrales de CO₂ de 600, 1.000 y 2.500 ppm respectivamente. El estudio encontró que un aumento de CO₂ de 600 a 1000 ppm redujeron considerablemente los resultados de rendimiento de seis de las nueve métricas. Unos aumentos de 1000 a 2500 ppm disminuirían aún más los resultados de siete de las nueve métricas. Además, a 2500 ppm el desempeño de tres de las nueve métricas (iniciativa, uso de información y estrategia básica) mostró resultados en, o limítrofes, niveles disfuncionales (Satish, et al., 2012).

García et al. (2020) elaboraron un modelo computacional capaz de analizar la calidad de aire en interiores, mediante el monitoreo continuo de parámetros tales como el CO₂, temperatura y humedad relativa. Asimismo, establecieron criterios de calidad del aire en interiores, definidos mediante la evaluación de cada parámetro los cuales correspondieron a 5 niveles: excelente, bueno, regular, mala y peligrosa. El modelo constó de 4 fases: medición, análisis, modelado y un cálculo del índice de calidad de aire para el usuario y fue necesario la utilización de 7056 datos, correspondientes a una semana de medición, 6 datos por hora. Llegando a la conclusión que para evaluar los espacios interiores aún hacen falta normativas y procedimientos que permitan mejorar las condiciones de salud en espacios cerrados.

Como se puede observar de la revisión bibliográfica, se puede comprender que se ha realizado diversos proyectos de investigación respecto a la calidad ambiental enfocada en la concentración de CO₂, utilizando la ayuda de monitores y/o dispositivos medidores de CO₂ calibrados. También, se han realizado registros de personas ocupantes y encuestas de confort al usuario, pudiendo encontrar el exceso de CO₂ en los ambientes medidos. Otros realizaron una regresión

multivariada y el análisis de coeficientes de correlación múltiple gracias a una buena base de datos, donde se pudo encontrar los umbrales de satisfacción del usuario y finalmente se emplearon el uso sistemas mecánicos, mejorando la satisfacción y calidad del ambiente. Sin embargo, se evidencia que hasta el año 2022, en el Perú se ha desarrollado muy poca investigación sobre ello. Para la elaboración de esta tesis, se juntarán estas tres metodologías añadiendo los criterios la certificación sostenible.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 Dióxido de carbono

La concentración de CO₂ es un adecuado indicador de la aceptabilidad del confort ambiental y puede usarse como indicador de la calidad del aire interior. El CO₂ se ha usado como un gas trazador para estudiar técnicas de ventilación (Sánchez et al., 2023).

Comúnmente, el CO₂ no es un contaminante del aire interior y ni se considera un factor causal en la respuesta de la salud humana, sin embargo, investigaciones recientes han informado que con niveles de CO₂ por encima de los niveles exteriores, las personas tienden a estar poco satisfechas con la calidad del aire interior, además reportan síntomas de salud más agudos y trabajan más lento (Fan et al., 2017).

2.2 Certificación LEED

Tiene sus orígenes en 1993 y es una herramienta de construcción verde caracterizada como un conjunto de estándares y requisitos que buscan presentar el nivel de sustentabilidad en las edificaciones, considerando el diseño, construcción, operación, mantenimiento y respectiva demolición (USGBC, 2009).

Una de las asociaciones certificadoras que mayor impacto ha tenido alrededor del mundo y dentro del Perú es la certificación LEED, la cual proviene de EE. UU. y divide sus indicadores en 7 categorías, teniendo un puntaje máximo alcanzable de 110 puntos, donde la categoría de calidad interior de ambientes implica 15 puntos (USGBC, 2009).

- Sitios sustentables (26 puntos)
- Eficiencia hídrica (10 puntos)
- Energía y atmósfera (35 puntos)
- Materiales y recursos (14 puntos)
- Calidad interior de ambientes (15 puntos)
- Innovación en el diseño (6 puntos)
- Prioridad regional (4 puntos)

La máxima puntuación posible es de 110 puntos. Cuando el edificio acumula en total, entre 40 a 49 puntos obtiene la certificación y el rango de Certificado, cuando acumula entre 50 a 59 puntos obtiene el rango de Plata, al conseguir entre 60 a 79 puntos obtiene el rango de Oro, y acumulando entre 80 a 110 puntos obtiene el rango de Platino (Ver figura N° 01).



Figura 1. Puntajes máximos y mínimos en LEED

Fuente: Regalado (2019)

A continuación, se mostrará los créditos de evaluación considerados por parte de la certificación LEED:

Crédito de Calidad Ambiental: Programa de gestión de la calidad del aire interior EE: O&M (Edificios existentes: Operación y mantenimiento) (2 puntos)

Este crédito se aplica a

- Edificios existentes: Operaciones & Mantenimientos (2 puntos)
- EE: O&M Colegios (2 puntos)
- EE: O&M Minorista (2 puntos)
- EE: O&M Centro de datos (2 puntos)
- EE: O&M Hospitalidad (2 puntos)
- EE: O&M Almacenes y centros de distribución (2 puntos)
- EE: O&M Multifamiliar (2 puntos)

Intención: Mantener el bienestar de los ocupantes previniendo y corrigiendo los problemas de calidad del aire interior.

Requisitos:

Desarrollar e implementar un programa de gestión de la calidad del aire interior (IAQ) basado en el Modelo de Educación y Evaluación de la Calidad del Aire Interior de los Edificios (I-BEAM) de la EPA. Incluir el programa de gestión de la IAQ en los requisitos actuales de las instalaciones y en el plan de operaciones y mantenimiento del proyecto.

Actuación

Realizar una auditoría I-BEAM periódicamente (al menos una vez cada cinco años) y revisar el programa de gestión de IAQ según corresponda.

Crédito de Calidad Ambiental: Estrategias mejoradas para la calidad del aire interior EE: O&M (1-2 puntos)

Este crédito se aplica a

- Edificios existentes: Operaciones & Mantenimientos (1- 2 puntos)
- EE: O&M Colegios (1- 2 puntos)
- EE: O&M Minorista (1- 2 puntos)
- EE: O&M Centro de datos (1-2 puntos)
- EE: O&M Hospitalidad (1-2 puntos)
- EE: O&M Almacenes y centros de distribución (1- 2 puntos)
- EE: O&M Multifamiliar (1- 2 puntos)

Intención:

Promover el confort, el bienestar y la productividad de los ocupantes mejorando la calidad del aire interior.

Requisitos:

Opción 1. Estrategias IAQ mejoradas (1 punto)

Cumplir con los siguientes requisitos, según corresponda.

Espacios ventilados mecánicamente:

- A. sistemas de entrada; B. prevención de la contaminación cruzada en el interior; y C. filtración.

Espacios con ventilación natural:

- A. sistemas de entrada; y D. cálculos de diseño de ventilación natural.

Sistemas de modo mixto:

- A. sistemas de entrada; B. prevención de la contaminación cruzada en el interior; C. filtración; D. cálculos de diseño de ventilación natural; y E. cálculos de diseño en modo mixto.

A. Sistemas de entrada

Instale sistemas de entrada permanentes de al menos 10 pies (3 metros) de largo en la dirección principal de viaje para capturar la suciedad y las partículas que ingresan al edificio en las entradas exteriores utilizadas regularmente. Los sistemas de entrada aceptables incluyen rejillas instaladas permanentemente, sistemas ranurados que permiten la limpieza debajo, tapetes desplegables y cualquier otro material fabricado como sistema de entrada con un rendimiento equivalente o mejor. Mantenga todo semanalmente. Además del sistema de entrada, proporcione vestíbulos de entrada presurizados en las entradas de edificios de gran volumen.

B. Prevención de la contaminación cruzada interior

Extraiga lo suficiente cada espacio donde puedan estar presentes o utilizarse gases o productos químicos peligrosos (p. ej., garajes, áreas de limpieza y lavandería, salas de fotocopiado e impresión), utilizando las tasas de extracción determinadas en el requisito previo de EQ Rendimiento mínimo de la calidad del aire interior o un mínimo de 0,50 cm por pie cuadrado (2,54 l/s por metro cuadrado), para crear presión negativa con

respecto a los espacios adyacentes cuando las puertas de la habitación están cerradas. Para cada uno de estos espacios, proporcione puertas que se cierren automáticamente y particiones de cubierta a cubierta o un techo con tapa dura.

C. Filtración

Cada sistema de ventilación que suministre aire exterior a espacios ocupados debe tener filtros de partículas o dispositivos de limpieza de aire que cumplan con uno de los siguientes requisitos de medios de filtración:

- valor mínimo de informe de eficiencia (MERV) de 13 o superior, de acuerdo con la Norma ASHRAE 52.2–2007; o
- Clase F7 o superior según lo define la norma CEN EN 779–2002, Filtros de partículas de aire para ventilación general, Determinación del rendimiento de filtración.
- [ACP de Asia Oriental: Medios de filtración]

Reemplace todos los medios de filtración de aire después de completar la construcción y antes de la ocupación.

D. Cálculos de diseño de ventilación natural.

Demostrar que el diseño del sistema para espacios ocupados emplea las estrategias apropiadas en el Manual de aplicaciones AM10 de la Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE), marzo de 2005, Ventilación natural en edificios no domésticos, Sección 2.4. [ACP de América Latina: Sistemas de ventilación natural diseñados]

E. Cálculos de diseño en modo mixto

Demostrar que el diseño del sistema para espacios ocupados cumple con el Manual de aplicaciones CIBSE 13–2000, Ventilación de modo mixto.

Opción 2. Estrategias IAQ mejoradas adicionales (1 punto)

Cumplir con los siguientes requisitos, según corresponda.

Espacios ventilados mecánicamente (seleccione uno):

- A. prevención de la contaminación exterior; B. mayor ventilación; C. monitoreo de dióxido de carbono; o D. control y monitoreo de fuentes adicionales.

Espacios ventilados naturalmente (seleccione uno):

- A. prevención de la contaminación exterior; D. control y seguimiento de fuentes adicionales; o E. cálculos de ventilación natural habitación por habitación.

Sistemas de modo mixto (seleccione uno):

- A. prevención de la contaminación exterior; B. mayor ventilación; D. control y seguimiento de fuentes adicionales; o E. cálculos de ventilación natural habitación por habitación.

A. Prevención de la contaminación exterior

Diseñar el proyecto para minimizar y controlar el ingreso de contaminantes al edificio. Garantizar, a través de los resultados del modelado computacional de dinámica de fluidos, análisis de dispersión gaussiana, modelado de túnel de viento o modelado de gas trazador, que las concentraciones de contaminantes del aire exterior en las tomas de aire exterior estén por debajo de los umbrales enumerados en la Tabla 1 (o su equivalente local para proyectos fuera de los EE. UU., lo que corresponda). es más estricto).

B. Mayor ventilación

Aumentar las tasas de ventilación del aire exterior de la zona de respiración en todos los espacios ocupados en al menos un 30 % por encima de las tasas mínimas según lo determinado en el requisito previo de EQ Rendimiento mínimo de la calidad del aire interior.

C. Vigilancia del dióxido de carbono

Monitorear las concentraciones de CO₂ dentro de todos los espacios densamente ocupados. Los monitores de CO₂ deben estar entre 3 y 6 pies (900 y 1 800 milímetros) por encima del suelo. Los monitores de CO₂ deben tener un indicador visual o audible o alertar al sistema de automatización del edificio si la concentración de CO₂ detectada excede el punto de ajuste

en más del 10 %. Calcule los puntos de ajuste de CO₂ apropiados utilizando los métodos de ASHRAE 62.1–2010, Apéndice C.

D. Control y supervisión de fuentes adicionales

Para espacios donde es probable que haya contaminantes del aire, evalúe las fuentes potenciales de contaminantes del aire adicionales además del CO₂. Desarrollar e implementar un plan de manejo de materiales para reducir la probabilidad de liberación de contaminantes. Instalar sistemas de monitoreo con sensores diseñados para detectar contaminantes específicos. Una alarma debe indicar cualquier condición inusual o insegura.

E. Cálculos de ventilación natural habitación por habitación

Siga CIBSE AM10, Sección 4, Cálculos de diseño, para predecir que los flujos de aire habitación por habitación proporcionarán una ventilación natural efectiva.

Crédito de Calidad Ambiental: Comodidad térmica EE: O&M (1 punto)

Este crédito se aplica a

- Edificios existentes: Operaciones & Mantenimientos (1 punto)
- EE: O&M Colegios (1 punto)
- EE: O&M Minorista (1 punto)
- EE: O&M Centro de datos (1 punto)
- EE: O&M Hospitalidad (1 punto)
- EE: O&M Almacenes y centros de distribución (1 punto)
- EE: O&M Multifamiliar (1 punto)

Intención:

Promover la productividad, el confort y el bienestar de los ocupantes brindándoles un confort térmico de calidad.

Requisitos:

Cumpla con los requisitos tanto para el diseño de confort térmico como para el control de confort térmico.

Diseño de confort térmico

Opción 1. Norma ASHRAE 55-2010

Diseñe los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) y la envolvente del edificio para cumplir con los requisitos de la Norma ASHRAE 55–2010, Condiciones de confort térmico para la ocupación humana, con erratas o un equivalente local. Para natatorios, demuestre el cumplimiento del Manual de aplicaciones HVAC de ASHRAE,

edición de 2011, Capítulo 5, Lugares de ensamblaje, Condiciones típicas de diseño de natatorios, con erratas.

Opción 2. Normas ISO y CEN

Diseñe los sistemas HVAC y la envolvente del edificio para cumplir con los requisitos de la norma aplicable:

- ISO 7730:2005, Ergonomía del Ambiente Térmico, determinación analítica e interpretación del confort térmico, utilizando el cálculo de los índices PMV y PPD y criterios locales de confort térmico; y
- Norma CEN EN 15251:2007, Parámetros de entrada ambientales interiores para el diseño y evaluación del rendimiento energético de edificios, que aborda la calidad del aire interior, el ambiente térmico, la iluminación y la acústica, Sección A2.

Control de confort térmico

Proporcionar controles individuales de confort térmico para al menos el 50% de los espacios para ocupantes individuales. Proporcionar controles de confort térmico grupales para todos los espacios compartidos para varios ocupantes y para cualquier espacio para ocupantes individuales sin controles individuales. Los controles de confort térmico permiten a los ocupantes, ya sea en espacios individuales o en espacios compartidos para varios ocupantes, ajustar al menos uno de los siguientes en su entorno local: temperatura del aire, temperatura radiante, velocidad del aire y humedad.

Crédito de Calidad Ambiental: Encuesta sobre el confort de los ocupantes EE: O&M (1 punto)

Este crédito se aplica a

- Edificios existentes: Operaciones & Mantenimientos (1 punto)
- EE: O&M Colegios (1 punto)
- EE: O&M Minorista (1 punto)
- EE: O&M Centro de datos (1 punto)
- EE: O&M Hospitalidad (1 punto)
- EE: O&M Almacenes y centros de distribución (1 punto)
- EE: O&M Multifamiliar (1 punto)

Intención:

Evaluar el confort de los ocupantes del edificio.

Requisitos:

Administre al menos una encuesta sobre la comodidad de los ocupantes para recopilar respuestas anónimas sobre al menos lo siguiente:

- acústica;
- limpieza del edificio;
- Calidad del aire interior;
- Encendiendo;
- comodidad térmica; y

Las respuestas deben recogerse de una muestra representativa de ocupantes del edificio que represente al menos el 30% del total de ocupantes. Documentar los resultados de la encuesta. Desarrollar e implementar un plan de acción correctiva para abordar los problemas de comodidad si los resultados indican que más del 20% de los ocupantes están insatisfechos. Realizar al menos una encuesta e implementar acciones correctivas. Como mínimo, realice una nueva encuesta al menos una vez cada 2 años.

2.3 Certificación WELL

La Certificación WELL, gestionada por el International WELL Building Institute, garantiza que el espacio certificado considera la salud y bienestar de los ocupantes; es la única que engloba de manera holística tanto los factores físicos del entorno, como las políticas que harán una edificación saludable (Muñoz, 2017).

Esta herramienta que evalúa los edificios se centra en el bienestar y la salud de sus ocupantes. Considera principalmente el confort de los usuarios y estudia la relación entre la salud y el entorno construido. Es un sistema que se basa en la medición, monitoreo y certificación del desempeño del entorno construido que influye en la salud y el bienestar humano a través de conceptos fundamentales y en 3 características del edificio: comportamiento, operación y diseño. Consta de 7 conceptos distintos: aire, agua, nutrición, iluminación, bienestar físico, confort y mente. (Bermeo y Mora, 2021).

2.4 Calidad del aire interior

Significa la calidad del aire dentro y alrededor de edificios y estructuras, particularmente en relación con el confort y la salud de los usuarios del edificio (Kubba, 2017). La calidad del aire interior afecta directamente la salud y el bienestar humano, y las partículas en suspensión, los gases oxidantes (ozono, dióxido de nitrógeno, cloro) y los compuestos orgánicos volátiles causan daños respiratorios, pulmonares y neuronales (WHO, 2021). La Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (EPA) afirma que el aire interior puede estar más contaminado que el aire exterior y la calidad del aire interior es uno de los cinco principales factores de riesgo ambiental para la salud pública (Afroz et al., 2023). La calidad del aire interior es un tema complejo debido a que involucra dominios temáticos en múltiples disciplinas. Existen tres amplias disciplinas distintas pero relacionadas: ciencias ambientales y naturales, ciencias médicas y la Arquitectura e ingeniería de la construcción que considera los elementos de diseño de los edificios para mitigar o mejorar los problemas de calidad del aire interior (Li, 2023). Aire en el que no hay contaminantes conocidos en concentraciones nocivas, determinadas por autoridades competentes y con la cual una mayoría sustancial (80% o más) de las personas expuestas no expresan insatisfacción (ASHRAE, 2013). El nivel interior de CO₂ es comúnmente usado al referirse a la calidad interior del aire (Ponsoni, 2010). De la misma forma, al momento de evaluar la calidad interior del aire, se toman en cuenta los siguientes parámetros (TSI Incorporated, 2013):

- Temperatura (°C)
- Humedad relativa (%)
- Movimiento del aire (m/s)
- Ventilación exterior (volumen / persona)
- Ventilación (Concentración de CO₂)
- Partículas ultra-finas
- Concentración de CO

2.5 Regresión lineal

Consiste en determinar una relación funcional entre variables X e Y con el fin de poder predecir el valor de una variable en base a la otra. La variable que se va a predecir se denomina variable dependiente y la variable que es la base de la predicción se denomina variable independiente Córdova, (2003).

Dados n pares de valores $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), \dots, (x_n, y_n)$ de una variable bidimensional (X, Y) . El proceso de predecir o estimar Y a partir de la variable X es la regresión. La regresión lineal simple de Y con respecto a X , consiste en determinar la ecuación de la recta (2.1):

$$Y = a + bX \quad \text{Ec. 1}$$

que mejor se ajuste a los valores de la muestra, con el fin de poder predecir o estimar Y a partir de la variable X . Un método para determinar la recta que mejor se ajuste a los n datos se la muestra (x_i, y_i) es el método de mínimos cuadrados (Córdova, 2003).

La recta de regresión de mínimos cuadrados de Y en X es aquella que hace mínima la suma de los cuadrados de errores (SCE) cuya expresión es:

$$SCE = \sum_{i=1}^n d_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx_i)]^2 \quad \text{Ec. 2}$$

Donde \hat{y}_i se denomina el valor estimado o predicho o ajustado de Y cuando $X = x_i$. Luego, determinar una recta de regresión de mínimos cuadrados consiste en hallar los valores de a y b de manera que hagan mínima, la suma.

Este requisito se cumple, de acuerdo con el teorema de Gass-Markow, si a y b se determinan resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones normales:

$$\sum_{i=1}^n y_i^2 = na + b \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad \text{Ec. 3}$$

$$\sum_{i=1}^n x_i y_i = a \sum_{i=1}^n x_i + b \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad \text{Ec. 4}$$

Estas ecuaciones se obtienen de igualar a cero las derivadas de SCE con respecto a a y con respecto a b respectivamente consideradas como variables, ya que (x_i, y_i) son datos observados.

Resolviendo el sistema de ecuaciones normales para b , se obtiene:

$$b = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = \frac{s_{xy}}{s_x^2} \quad \text{Ec. 5}$$

Y dividiendo por n la primera ecuación normal, se obtiene:

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad \text{Ec. 6}$$

Reemplazando a en $Y = a + bX$, se obtiene,

$$Y - \bar{y} = b(X - \bar{x}) \quad \text{Ec. 7}$$

que es otra forma de presentar la recta de regresión. Observar que la recta de regresión contiene al punto (\bar{x}, \bar{y}) cuyas componentes son las medias de X y de Y respectivamente (Córdova, 2003).

2.6 Regresión lineal múltiple

Es una extensión de la regresión lineal simple para tomar en cuenta más de una variable independiente. Es decir, en lugar de usar solo una variable independiente X para explicar la variación en Y , se pueden usar simultáneamente varias variables independientes.

El modelo de regresión múltiple para un análisis de regresión múltiple describe una respuesta particular y usando el modelo que se da a continuación (Mendenhall, 2012):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \cdots + \beta_k X_k + \epsilon \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

Y : es la variable de respuesta que se desea predecir

$\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$: son constantes desconocidas

X_1, X_2, \dots, X_k : son variables predictoras independientes que se miden sin error

ϵ : es el error de la variable

Supongamos que Y de dos variables X_1, X_2

Modelo de mínimos cuadrados;

$$Y = \widehat{\beta}_0 + \widehat{\beta}_1 X_1 + \widehat{\beta}_2 X_2 \quad \text{Ec. 9}$$

Para encontrar $\widehat{\beta}_0$, $\widehat{\beta}_1$, $\widehat{\beta}_2$, derivar SCE e igualar a cero $\frac{\partial \text{SCE}}{\partial \widehat{\beta}_{0i}} = 0$, $i = 0, 1, 2$

Luego de la aplicación y simplificación algebraica se obtiene:

$$n\widehat{\beta}_0 + \widehat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n X_{1,i} + \widehat{\beta}_2 \sum_{i=1}^n X_{2,i} = \sum_{i=1}^n Y_i \quad \text{Ec. 10}$$

$$\widehat{\beta}_0 \sum_{i=1}^n X_{1,i} + \widehat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n X_{1,i}^2 + \widehat{\beta}_2 \sum_{i=1}^n X_{1,i} X_{2,i} = \sum_{i=1}^n X_{1,i} Y_i \quad \text{Ec. 11}$$

$$\widehat{\beta}_0 \sum_{i=1}^n X_{2,i} + \widehat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n X_{2,i} X_{1,i} + \widehat{\beta}_2 \sum_{i=1}^n X_{2,i}^2 = \sum_{i=1}^n X_{2,i} Y_i \quad \text{Ec. 12}$$

En forma simbólica

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad \text{Ec. 20}$$

En donde

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 21}$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & X_{1,1} & X_{2,1} \\ 1 & X_{1,2} & x_{2,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & X_{1,n} & x_{2,n} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 22}$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 23}$$

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 24}$$

La matriz X se denomina matriz de diseño

El sistema de ecuaciones del modelo de regresión lineal múltiple de mínimos cuadrados, $K = 2$

$$A\hat{\beta} = C \quad \text{Ec. 25}$$

Puede entonces expresarse con la notación matricial desarrollada para el modelo teórico:

La matriz de coeficientes A se puede construir con la matriz de diseño

$$A = \begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n X_{1,i} & \sum_{i=1}^n X_{2,i} \\ \sum_{i=1}^n X_{1,i} & \sum_{i=1}^n X_{1,i}^2 & \sum_{i=1}^n X_{1,i} X_{2,i} \\ \sum_{i=1}^n X_{2,i} & \sum_{i=1}^n X_{2,i} X_{1,i} & \sum_{i=1}^n X_{2,i}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ X_{1,1} & X_{1,2} & \dots & X_{1,n} \\ X_{2,1} & X_{2,2} & \dots & X_{2,n} \\ 1 & X_{1,n} & x_{2,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & X_{1,1} & X_{2,1} \\ 1 & X_{1,2} & x_{2,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & X_{1,n} & x_{2,n} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 6}$$

En forma simbólica

$$A = X^T X \quad \text{Ec. 27}$$

El vector C puede expresarse también con la matriz de diseño X

$$C = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n Y_i \\ \sum_{i=1}^n X_{1,j} Y_i \\ \sum_{i=1}^n X_{2,j} Y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ X_{1,1} & X_{1,2} & \dots & X_{1,n} \\ X_{2,1} & X_{2,2} & \dots & X_{2,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 28}$$

En forma simbólica:

$$C = X^T Y \quad \text{Ec. 29}$$

Con la notación el modelo de mínimos cuadrados se puede escribir

$$A\hat{\beta} = C \rightarrow X^T X \hat{\beta} = X^T Y \quad \text{Ec. 30}$$

Finalmente, con la inversa de $X^T X$ se pueden obtener los estimadores de mínimos cuadrados (Rodríguez, 2007):

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} (X^T Y) \quad \text{Ec. 31}$$

CAPÍTULO III: MEDICIÓN DE INFORMACIÓN

3.1 METODOLOGÍA DE MEDICIÓN

3.1.1 EQUIPO

A continuación, se detallarán los equipos empleados para la presente investigación:

3.1.1.1 PM-106SD

Se requería un equipo con la capacidad de medir las variables de temperatura, humedad y la concentración de gas CO₂. Con el fin de obtener mediciones verídicas y en tiempo real se consideró utilizar un equipo medidor de material particulado en el aire de la marca LUTRON (Taiwán) cuyo modelo es el PM-10064SD (Ver figura 2), el cual posee reloj y calendario integrado, registro de datos en tiempo real con tarjeta de memoria SD.

Para comenzar a medir simplemente se inserta una tarjeta SD en el ordenador, todos los valores obtenidos se registrarán con la información de tiempo (año, mes, datos, hora, minuto, segundo), esta data se puede descargar directamente a Excel, donde posteriormente se puede realizar un análisis en particular.



Figura 2. Equipo medidor de temperatura, humedad y concentración de CO₂

Fuente: Especificaciones técnicas del medidor de CO₂, temperatura y humedad. (Anexo 1)

Tal como indica las especificaciones técnicas del equipo, los intervalos de muestreo pueden establecerse de 2 a 3600 segundos. Las características de lectura de datos se presentan en la tabla N° 1

PM2.5	Rango	0 a 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Resolución	1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Exactitud	$\pm (10\% \text{ lectura} + 15 \mu\text{g}/\text{m}^3)$
Humedad	Rango	5 % a 95 % H.R.
	Resolución	0.1 % H. R.
	Exactitud	$\geq 70\% \text{ HR}$: $\pm (3\% \text{ lectura} + 1\% \text{ HR})$. $< 70\% \text{ HR}$: $\pm 3\% \text{ HR}$.
Temperatura	Rango	0 °C a 50 °C, 32 °F a 122 °F
	Resolución	0.1 grado de intensidad
	Exactitud	°C: $\pm 0.8 \text{ }^\circ\text{C}$ °F: $\pm 1.5 \text{ }^\circ\text{F}$

Tabla 1. Características del medidor de temperatura, humedad y CO2.

Fuente: Especificaciones técnicas del medidor de temperatura, humedad y CO2. (Anexo 1)

Así mismo el equipo cuenta con un certificado de calibración. (Anexo 2)

3.1.1.2 Equipo "JVCOR02"

Se plantearon diversos escenarios para llevar a cabo las mediciones, lo que implicaba la necesidad de contar con más equipos que pudieran distribuirse de manera que se realizaran mediciones en varios espacios simultáneamente. Además, se buscaba una solución de menor costo. En este contexto, se decidió trabajar con el equipo "JVCOR02", desarrollado por el Ingeniero Javier Cornejo, el cual incluye medidores de humedad, temperatura y concentraciones de CO₂.

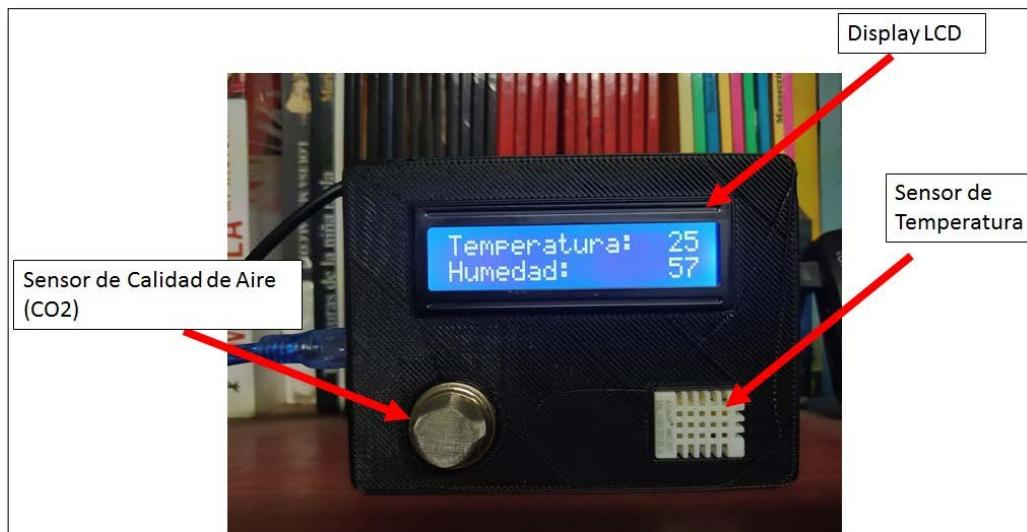


Figura 3. Equipo medidor de temperatura, humedad y CO₂ "JVCOR02"

En la Figura 4, se presenta los cinco (05) componentes del equipo medidor de CO₂ llamado "JVCOR02". Cada uno de estos desempeña un papel importante para la medición y monitoreo de las concentraciones de dióxido de carbono. A continuación, se realiza una descripción de cada uno.

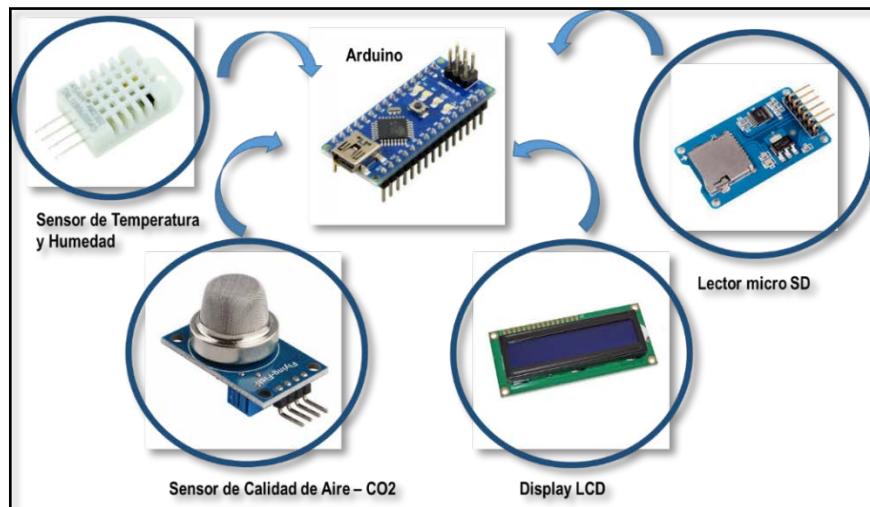


Figura 4. Componentes del equipo “JVCOR02”

A continuación, se detallará el funcionamiento y relación que cada uno estos materiales fueron necesarios para el correcto funcionamiento del equipo:

3.1.1.3 Sensor de temperatura y humedad

El sensor usado para la elaboración del equipo económico de medición es el DHT22. Este sensor mide temperaturas que van de un rango de -40°C hasta los 80°C. El rango de humedad varía del 0 al 100%, con lecturas de hasta cada 2 segundos de intervalo de tiempo. Su bajo precio y sus dimensiones lo hacen apropiado para el presente proyecto.

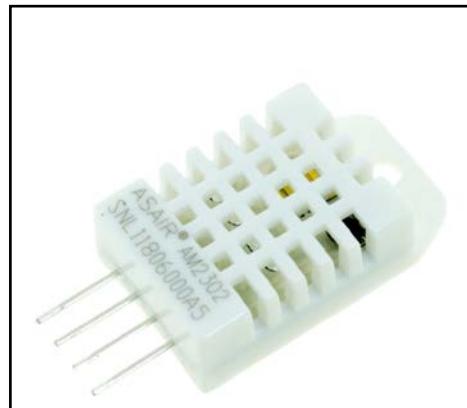


Figura 5. Sensor de temperatura y humedad empleado para el dispositivo “JVCOR02”

3.1.1.4 Sensor de calidad del aire (CO₂)

El sensor usado para la detección de CO₂ es el MQ135. Este es un sensor que permite detectar gases como el dióxido de carbono, así como en menor medida al amoniaco, monóxido de carbono, entre otros. El rango de detección va desde los 100 ppm hasta los 1000 ppm.



Figura 6. Sensor de calidad de Aire – CO₂ empleado para el dispositivo
“JVCOR02”

3.1.1.5 Lector SD

El lector SD es un módulo que permite el almacenamiento de datos en una tarjeta microSD. Entre sus ventajas está su tamaño pequeño y la opción de no perder datos incluso si se interrumpe la alimentación del equipo.

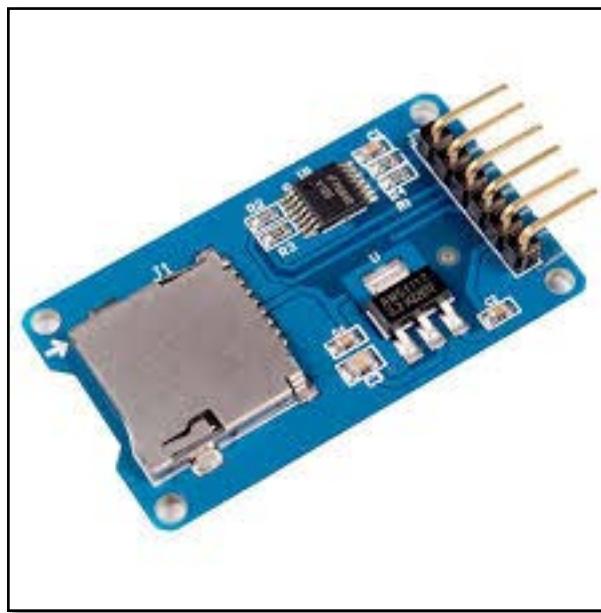


Figura 7. Lector SD empleado para el dispositivo “JVCOR02”

Para tener una mayor certeza de este equipo se realizó una calibración con el equipo PM-1064SD a fin de tener una mayor credibilidad en los datos medidos.

Para esto se realizó una medición de 24 horas tanto para el equipo JVCOR02 y el equipo PM-10064SD, luego de ello se realizó un ajuste para poder generar datos cercanos a los del equipo PM-10064SD, esto proceso se realizó tanto en la temperatura como podemos apreciar en la figura 8, en la humedad relativa como podemos apreciar en la figura 9 y en la concentración de CO₂ como podemos apreciar en la figura 10.

Según se ilustra en la Figura9, se evidencia un coeficiente de determinación ajustado (R^2) de 0.93, lo cual señala una correlación muy robusta en los datos recopilados. Cabe destacar que el intervalo de variación de temperatura para el equipo calibrado se sitúa entre [21 °C – 24 °C], mientras que, en contraste, para el equipo propio, el rango se manifiesta en el intervalo de [26 °C – 28 °C]. Este análisis subraya la consistencia de las mediciones, respaldando la fiabilidad de los resultados.

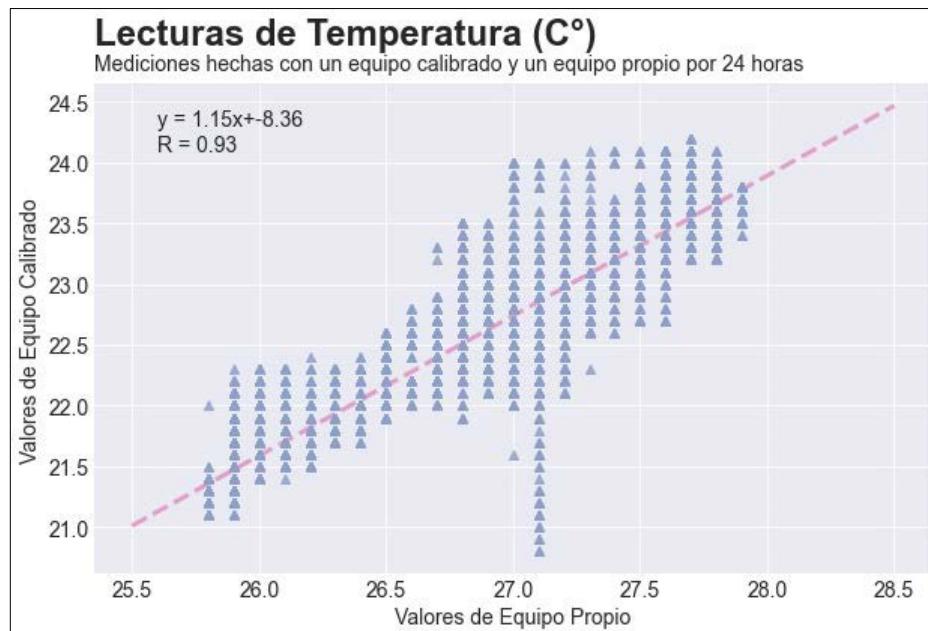


Figura 8. Calibración de Temperatura para el dispositivo “JVCOR02”

Fuente: Ing. Javier Cornejo.

Para el caso de la Figura 10, se evidencia un coeficiente de determinación ajustado (R^2) de 0.92, lo cual señala una correlación muy buena en los datos recopilados. Cabe destacar que el intervalo de variación de humedad relativa para el equipo calibrado se sitúa entre [62 °C – 75 °C], mientras que, en contraste, para el equipo propio, el rango se manifiesta en el intervalo de [50 °C – 56 °C]. Este análisis subraya la consistencia de las mediciones, respaldando la fiabilidad de los resultados.

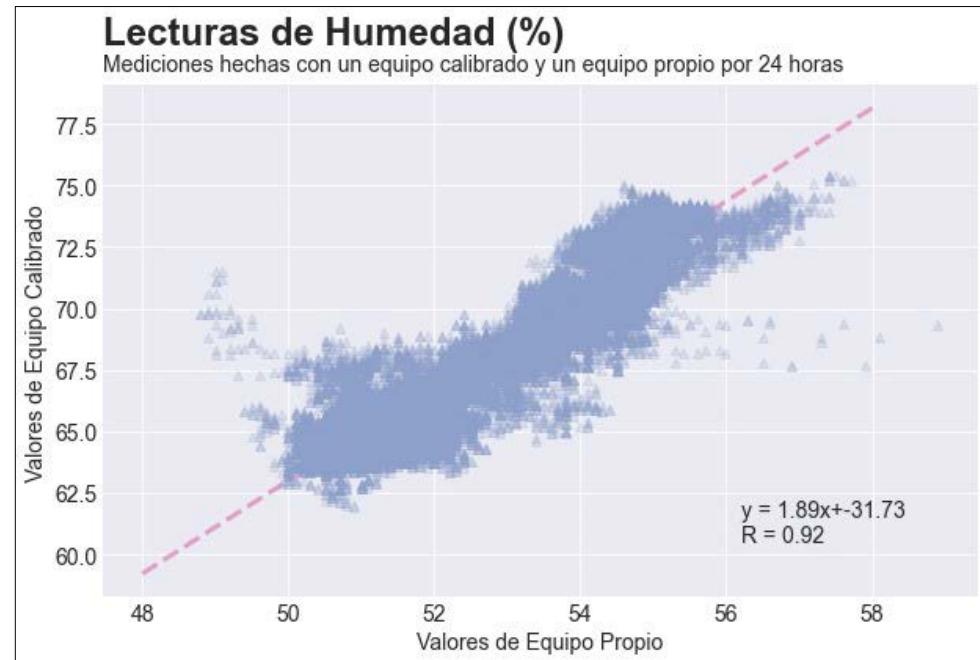


Figura 9. Calibración de humedad para el dispositivo “JVCOR02”

Finalmente, en la Figura 11 se muestra las gráficas generadas por el equipo propio (color morado) y el equipo calibrado (color rojo) como se puede observar existe cierta variación entre la cantidad de datos obtenidos al largo de las 24 horas de medición. Sin embargo, se logró ajustar mediante una regresión lineal, obteniéndose $24.96x - 100.69$.

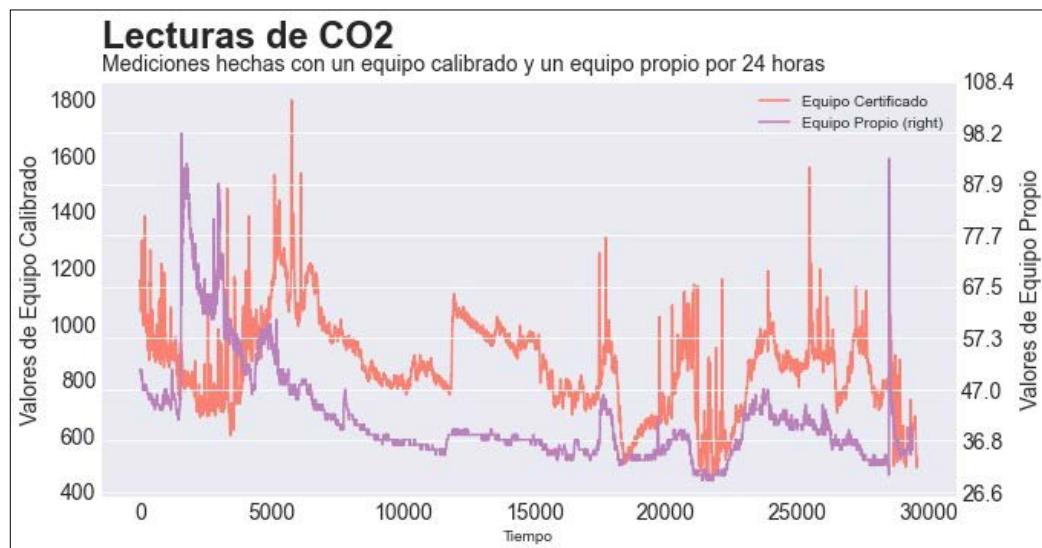


Figura 10. Calibración de CO₂ para el dispositivo “JVCOR02”

3.1.2 AMBIENTE DE ESTUDIO

En el marco de esta investigación, se llevaron a cabo análisis en diversos escenarios, incluyendo restaurantes, oficinas de trabajo, gimnasios y viviendas. También se consideraron las aulas de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). A continuación, se detallan las dificultades y razones que llevaron a descartar algunos escenarios previos:

Restaurantes:

- Complicaciones para realizar mediciones debido a la constante entrada y salida de personas.
- Dificultades en la coordinación con los propietarios y permisos necesarios.
- Ventilación variable en la Av. Habich, dificultando la medición precisa del CO₂.
- Valores obtenidos no fueron adecuados para los análisis buscados.

Oficinas de Trabajo:

- Baja aportación de personas al nivel de CO₂ en el ambiente.
- Mínimas variaciones, no acordes a los análisis deseados.

Gimnasios:

- Buena ventilación debido a las actividades realizadas.
- Dificultades para correlacionar la cantidad de personas con el porcentaje de ventilación.
- Valores de CO₂ dentro del rango aceptable, pero no ideales para el estudio.

Dada la problemática identificada en los escenarios anteriores, se optó por evaluar los ambientes de estudio de la **Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI)**. Esta elección se basó en:

- Considerable cantidad de personas presentes en un rango de tiempo significativo.
- Espacio manejable en relación con las aberturas para la entrada y salida de CO₂.

- Ausencia de ventilación mecánica adicional, facilitando las mediciones.
- Presencia de alumnos estudiando en los salones en un rango de 20 a 40 personas por cada tiempo determinado (1 a 2 horas de promedio)
- Falta de áreas de ventilación entre ventanas y puertas.

En resumen, la elección de las aulas de la FIC UNI se fundamenta en la combinación de condiciones ideales para la investigación y la exclusión de otros escenarios debido a diversas problemáticas identificadas.

Teniendo en cuenta todos los criterios antes mencionados se optó por realizar las mediciones de concentración de CO₂ en 3 escenarios diferentes en coordinación con las autoridades universitarias.

- Salón G-122
- Salón G-130
- Salón G-142

3.1.2.1 Información de ambientes

Los salones G-122, G-130 y G-142, presentan 2 puertas metálicas para el ingreso y salida de los estudiantes (P-1, P-2) y tres ventanas ubicadas al frente de estas puertas (V-1, V-2, V-3). Dentro del ambiente se cuenta con 24 mesas con capacidad de 2 estudiante por mesa. Sin embargo, no se ha presentado alguna condición donde se encuentren los 48 estudiantes en algún horario de medición.

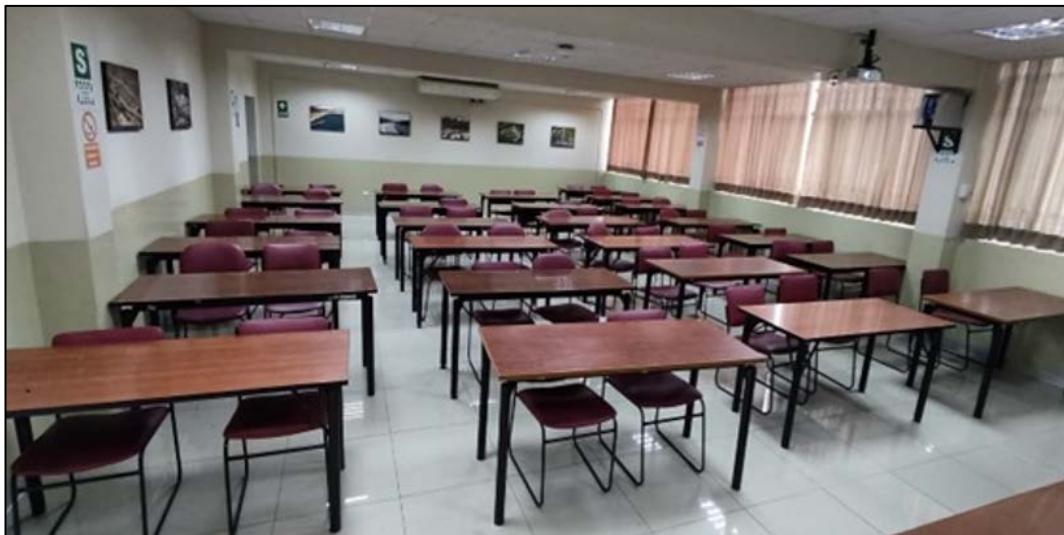


Figura 11. Ejemplo de Ambiente de medición

Se llevó a cabo la medición de los distintos salones designados para las mediciones, mediante una visita de campo durante la cual se recopiló información fotográfica y se realizaron mediciones específicas en las unidades que influían en la entrada y salida de CO₂, como puertas y ventanas. Se tomaron medidas de los salones G-122, G-130 y G-142, revelando ligeras variaciones en sus dimensiones. No obstante, con fines prácticos, se consideraron estas tres dimensiones como una única medida compuesta. A continuación, se presenta la vista en planta que ilustra las dimensiones de estos salones:

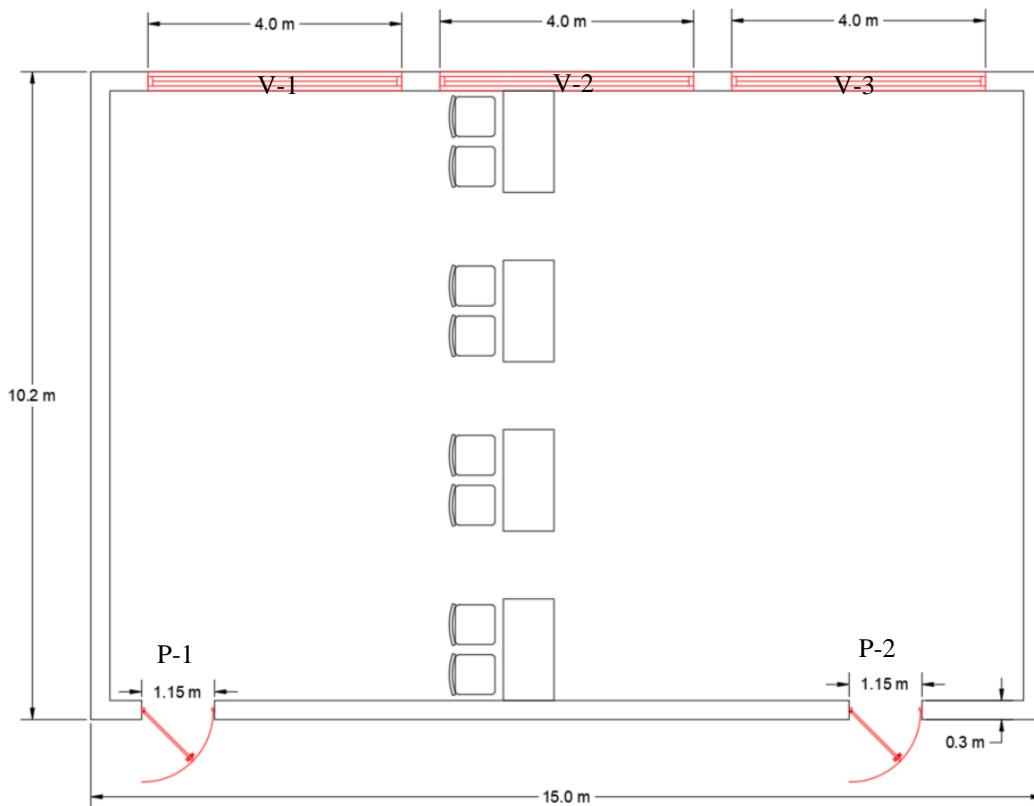


Figura 12. Vista en planta de los salones (G-122, G-130, G-142)

De igual manera se realizaron las mediciones para el caso de las puertas (P-1, P-2) y ventanas (V-1, V-2, V-3) teniendo dimensiones similares en los tres escenarios. Esto lo podemos observar en la Figura N°13.

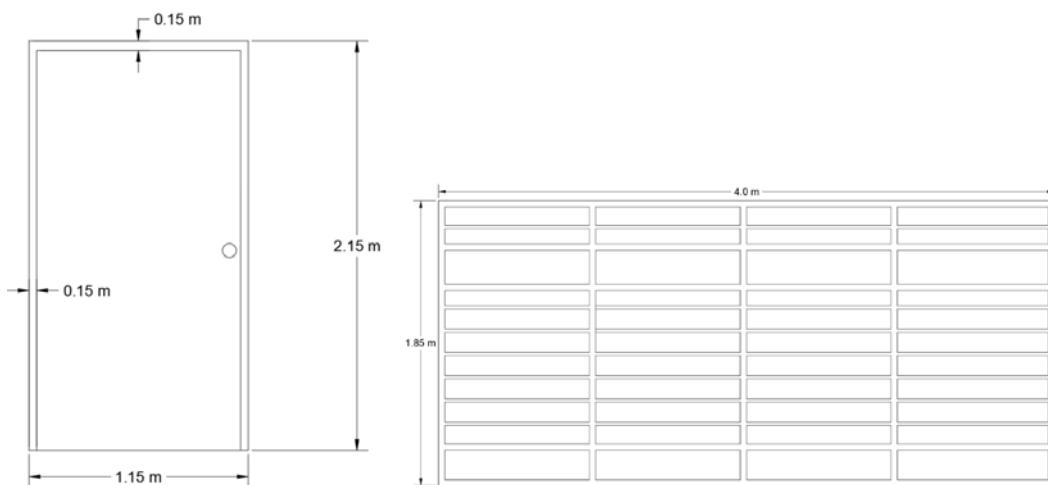


Figura 13. Detalle de puertas y ventanas.

3.1.2.2 Ubicación de equipo

Con el fin de asegurar un funcionamiento óptimo, evitando alguna interrupción al paso por criterios de seguridad (evacuación), el equipo se sitúa en la margen izquierda de cada salón, junto a las ventanas. Esta disposición se debió a la necesidad de contar con una conexión a la línea de tomacorrientes. La ubicación de este equipo se adaptó a la distribución de los tomacorrientes en cada ambiente. Es importante destacar que el equipo se colocó a una altura de 0.90 metros desde el suelo, teniendo en cuenta lo solicitado por la certificación LEED, que indica que los monitores de CO₂ deben estar entre (0.9 a 1.8m) sobre el suelo (USGBC,2018). Esta elección se basó en la naturaleza de los escenarios, que eran salones de estudio donde las personas que generan flujos y variaciones de CO₂ suelen estar sentadas.

Es importante mencionar que los registros de medición obtenidos en los márgenes izquierdo, derecho o en el centro de los ambientes de estudio, tienen una ligera variación, esto lo demostró (Regalado, 2021). Quien realizó siete mediciones, corresponden a los 4 extremos del ambiente, 2 a los puntos medios de sus dimensiones más largas y uno al centro de este (Figura 13) encontrando que el promedio de los 7 puntos se aproxima al calculado en el centroide del ambiente.

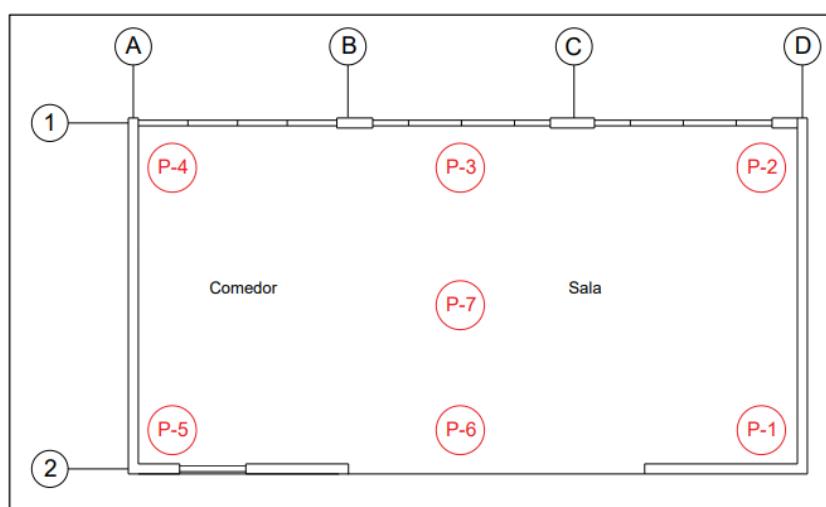


Figura 14. Puntos de medición en sala - comedor

Fuente: (Regalado,2021)

Es por ello que no se consideró la ubicación del equipo como una variable de análisis en estos modelos.

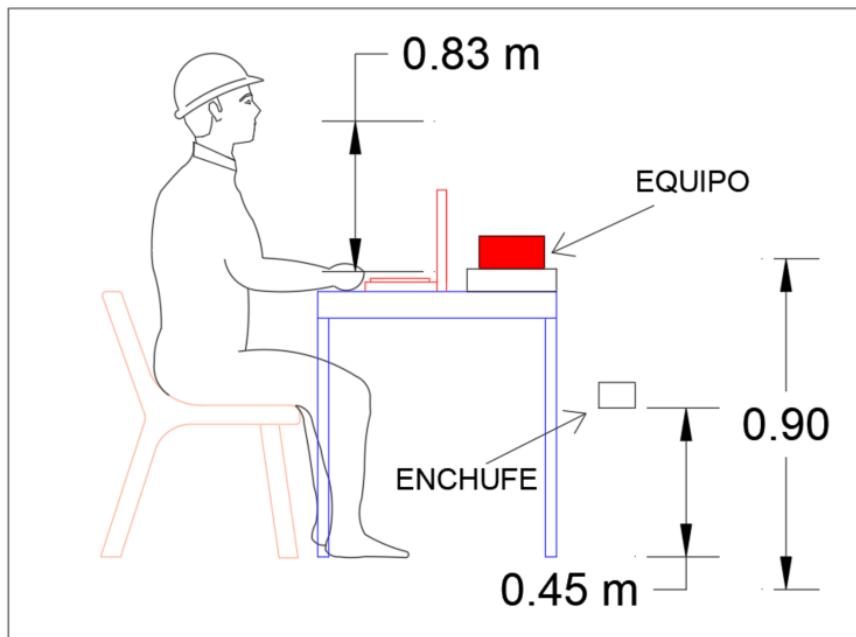


Figura 15. Altura de posicionamiento de equipo

Posteriormente se muestra una vista en planta de la ubicación del equipo de medición en los distintos salones respectivos. En la zona del margen izquierdo del salón, cerca de la ventana central.

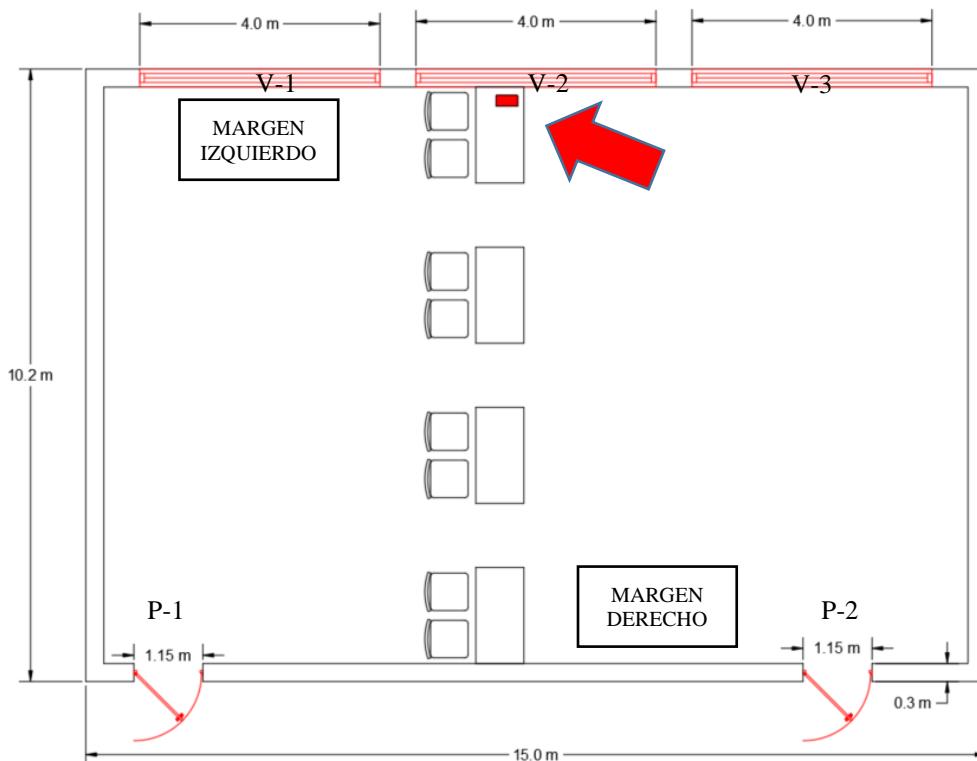


Figura 16. Ubicación de equipo adecuándose al escenario

A continuación, se muestra la Figura 17, donde se puede apreciar la ubicación del equipo de medición en el escenario de estudio. Es de esa manera como se ubicó el equipo y como este pudo captar una serie de datos.



Figura 17. Ubicación del equipo en campo

3.1.2.3 Protocolo de medición

Luego de definir los escenarios, se realiza una inspección previa (visita de campo) para poder ubicar el equipo de CO₂ (cerca a tomacorrientes), la persona designada tiene que solicitar el permiso adecuado de poder dejar enchufado el equipo durante 4 días sin desconexión alguna, para ello se debe coordinar con el dueño o encargado del lugar, brindando la seguridad del equipo.

Como parte inicial de la toma de datos se planteó medir por 4 días, por ejemplo, de lunes a jueves, el día 1 (lunes) y día 4 (jueves) con el fin de obtener una lectura de datos representativos.

Se realizará la lectura de información por una cantidad de cuatro días, donde el equipo “JVCOR02” estará conectado, con la ayuda de un tomacorriente cercano a la zona donde exista presencia de mayor concentración de CO₂.

Los horarios de medición serán de la siguiente manera, por cada día de medición:

8:00 a. m.	Enchufar el equipo
.	.
.	.
.	.
20:00 p. m.	Retirar el equipo

Tabla 2. Horario de medición del equipo.

También, se incluye la cantidad de personas presentes según el momento de medición. Más adelante se presentará esta información (por ejemplo, en la Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6).

Es recomendable asignarle una nomenclatura a cada abertura que se encuentre en los ambientes, para poder distinguir por donde podría existir una entrada y salida de flujo de CO₂.

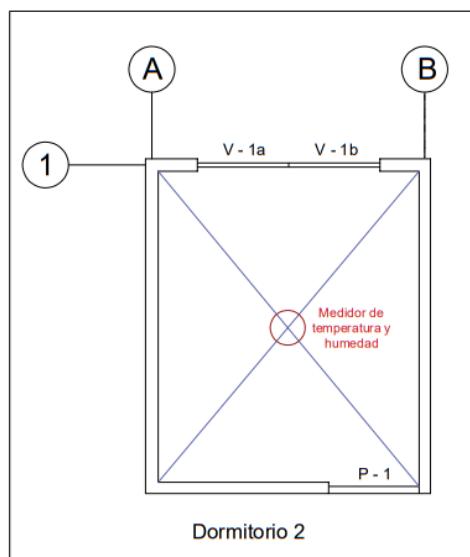


Figura 18. Ejemplo de nomenclatura

Fuente: (Regalado, 2019)

Dado el comportamiento disperso del nivel de CO₂ por cambiar al realizar una abertura o cierre de alguno de las aberturas (ej. Al abrir una ventana, ingresa un flujo de aire del exterior), la estabilización del ambiente completo tomará cierto tiempo (ej. 5-10 minutos). Este tiempo debe ser encontrado con medidas de prueba. Para poder eliminarlos de la data de procesamiento ya que corresponderían a valores no acordes a las mediciones.

A continuación, un ejemplo para el caso de temperatura:

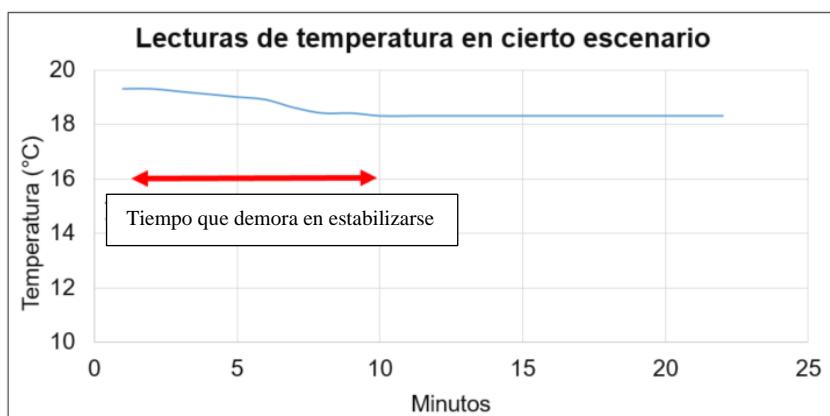


Figura 19. Tiempo de estabilización del equipo

Los días de las mediciones y la realización del ordenamiento de información y depuración de datos, finalmente el procesamiento de estos se realizará acorde al siguiente cuadro:

Horario	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6
8:00 a. m.	Enchufar equipo	Enchufar equipo	Enchufar equipo	Enchufar equipo	Ordenamiento y depuración de datos	Procesamiento de datos
.		
.		
.		
20:00 p. m.	Retirar el equipo	Retirar el equipo	Retirar el equipo	Retirar el equipo		

Tabla 3. Cronograma de medición

Mencionar que los valores registrados se almacenan en un lector SD, que se encuentra insertado dentro del equipo JVCOR02 y que posteriormente nos arroja un archivo CSV, con toda la data almacenada como se muestra en la figura 20.

A	B	C	D	E
1	Equipo:,JVCOR02			
2	FECHA:,HORA:,TEMPERATURA,HUMEDAD,GAS,TEMPERATURA2			
3	2023/01/04,18:9:25,21.70,75.60,565,52			
4	2023/01/04,18:9:28,21.60,76.30,565,38			
5	2023/01/04,18:9:30,21.60,76.40,566,30			
6	2023/01/04,18:9:33,21.60,76.20,565,30			
7	2023/01/04,18:9:36,21.60,76.10,565,26			
8	2023/01/04,18:9:39,21.60,76.10,565,24			
9	2023/01/04,18:9:42,21.60,76.00,565,24			
10	2023/01/04,18:9:45,21.60,75.70,565,24			
11	2023/01/04,18:9:48,21.60,75.40,565,23			
12	2023/01/04,18:9:51,21.60,75.20,565,23			
13	2023/01/04,18:9:54,21.60,75.00,565,23			
14	2023/01/04,18:9:57,21.60,75.00,565,23			
15	2023/01/04,18:10:0,21.60,74.80,565,22			
16	2023/01/04,18:10:3,21.50,74.60,565,22			
17	2023/01/04 18:10:6 21.50 74.60 565.22			

Figura 20. Registro de valores monitoreados

Finalmente se muestra en la siguiente figura, un flujograma resumido en cuanto a los pasos a considerar en el protocolo de medición planteado, teniendo en cuenta que este sea estandarizado y genérico.

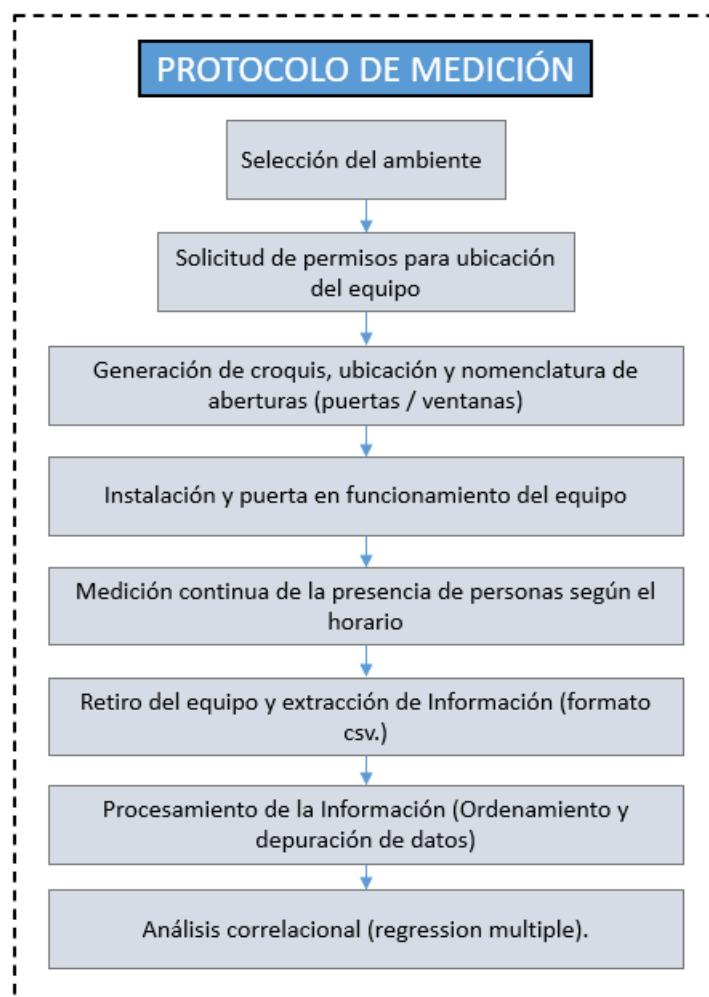


Figura 21. Flujograma de protocolo de medición

Cabe mencionar que la certificación LEED, en el capítulo de CRÉDITO EQ: ESTRATEGIAS MEJORADAS DE LA CALIDAD DEL AIRE INTERIOR: Monitores de dióxido de carbono solo pide que existan equipos medidores de CO₂ y que se respete la ubicación de (0.9 – 1.8m) de rango desde el nivel del suelo (USGBC,2018)

HIPÓTESIS DE MODELADO

Flujo de aire por marcos de puertas y ventanas: Por recomendación experta de profesionales afines al tema (ing. Marck Regalado), que colaboraron como co-asesores, recomendaron que estas variables no sean estudiadas debido a la limitación de adaptabilidad de equipos existentes. Adicionalmente, para edificaciones formales, se considera que el Flujo de aire en los marcos no debería ser una variable por estudiar, ya que en el modelamiento 3D del aire, se considera un sellado exacto. Además, por criterio de expertos, se señala que el área de cualquier mínimo marco sin sellar no es considerable comparada con el área de las aberturas completas (la Puerta o Ventana). Anexar un Excel de juicio de expertos para sustentar

Salón con cortinas y sin cortinas: Según explicación de juicio experto (co-asesor de la tesis), se señala que la presencia de cortinas influye en la concentración de partículas en suspensión (polvo) y partículas COV (compuestos orgánicos volátiles), variable que no es estudiada en la presente tesis. Se recomienda que otros también incluyan esta variable en futuras investigación.

Invierno, Verano: Según criterios expertos, no existe una afectación del nivel de temperatura en la concentración de CO₂. Ambos son reflejo de la calidad interior de un ambiente y deben ser controladas. En general, al hablar de confort térmico, no solo depende de la época del año, sino de la sensación de las personas, su estado físico, el tipo de vestimenta que utilicen, etc. Es decir, independiente de la época del año, es posible adaptarse y encontrar un confort térmico adecuado.

Estas consideraciones se extrajeron de la encuesta realizada a profesionales especialistas en el tema, esta se puede ver a más detalle en el Anexo 4.

3.2 PROCESO DE TOMA DE DATOS

3.2.1 DÍAS DE MEDICIÓN

Para esta investigación, se realizaron mediciones en los salones G-122, G-130, G-142, los días 03/01/2023 (martes), 04/01/2023 (miércoles), 06/01/2023 (jueves) y 09/01/2023 (lunes). En el horario de 8 am a 8pm en la mayoría de los casos.

Las mediciones se llevaron a cabo por 4 días, en un horario promedio de 8:00 am a 8:00 pm, contabilizando el número de personas que se encontraban en el salón durante los horarios de clase. La frecuencia de medición del equipo es cada 3 segundos. Siendo la variable independiente: Niveles de CO₂ y las variables dependientes: cantidad de personas y la ventilación (estado de abertura entre puertas y ventanas).

A continuación, se muestra los horarios de medición en cada uno de los salones y la cantidad de personas registradas en ese horario de medición. Para el aula G2-122, las presencias de personas se dan a partir de las 10:00 am, los martes y miércoles en el horario de 12:00 a 14:00 no se presentó personas. Luego el viernes hubo presencia de personas en el horario de 10:00 a 12:00 y para el lunes solo en el horario de 14:00 a 16:00 y 16:00 a 18:00. Esto se puede observar en la Tabla 4.

G-122				
	3/01/2023	4/01/2023	6/01/2023	9/01/2023
	Martes	Miércoles	Viernes	Lunes
08:00-10:00				
10:00-12:00	11	32	40	
12:00-14:00				
14:00-16:00	16	36		12
16:00-18:00			32	32
18:00-19:00	30	22		
19:00-20:00	30	22		

Tabla 4. Cantidad de personas registradas en el salón G-122

Para el caso del salón G2-130, la cantidad de personas que comenzó a registrarse fue a partir de las 10 am, excepto el lunes que solo hubo un registro de personas en el horario de 14:00 a 16:00. Los martes no hubo presencia de personas en los horarios de 12:00 a 14:00 pm y tampoco en el horario de 16:00 a 18:00, el miércoles no hubo presencia de personas en el horario de 12:00 a 16:00, de igual manera ocurrió el viernes. Esto lo podemos observar en la tabla 5.

G-130				
	3/01/2023	4/01/2023	6/01/2023	9/01/2023
	Martes	Miércoles	Viernes	Lunes
08:00-10:00				
10:00-12:00	8	24	33	
12:00-14:00				
14:00-16:00	18			35
16:00-18:00		22	14	

Tabla 5. Cantidad de personas registradas en el salón G-130

Para el salón G-142, hubo intervalos de tiempos en los que no se presentaban un registro de números de personas e intervalos de tiempo que si, en este caso si fue variable.

G-142				
	3/01/2023	4/01/2023	6/01/2023	9/01/2023
	Martes	Miércoles	Viernes	Lunes
08:00-10:00		30		
10:00-12:00	24		30	35
12:00-14:00		38		
14:00-16:00	19		43	36
16:00-18:00		14		28
18:00-19:00	23		37	
19:00-20:00	23	34		
20:00-21:00		34		

Tabla 6. Cantidad de personas registradas en el salón G-142

En la tabla 7, se muestran los días de medición realizados en las fechas mostradas, según el proceso de evaluación.

Día 1	Día 2	Día 3	Día 4
3/01/2023	4/01/2023	6/01/2023	9/01/2023

Tabla 7. Días de medición

A continuación, se muestran los registros de datos obtenidos para los distintos salones. Esta data presentada en la tabla 8, tabla 9 y tabla 10 han sido extraídas de la data total registrada de cada salón.

En la figura 38, figura 39 y figura 40 se puede observar cómo varían las concentraciones de CO2 en los diferentes días de medición.

Fecha	Hora	Temperatura (°C)	Humedad (%)	GAS CO2 (ppm)
03/01/2023	09:12:26	24.5	93.6	520
03/01/2023	09:12:29	24.5	93.7	520
03/01/2023	09:12:32	24.5	93.5	520
03/01/2023	09:12:35	24.5	93.5	520
04/01/2023	10:15:40	27.6	89.0	700
04/01/2023	10:15:43	27.6	89.3	700
04/01/2023	10:15:46	27.6	89.2	700
04/01/2023	10:15:49	27.6	89.2	700
06/01/2023	12:20:01	28.7	51.7	600
06/01/2023	12:20:04	28.7	51.7	600
06/01/2023	12:20:07	28.7	51.7	600
06/01/2023	12:20:10	28.7	51.7	600
09/01/2023	14:20:10	29.3	64.8	450
09/01/2023	14:20:13	29.3	64.8	450
09/01/2023	14:20:16	29.3	64.8	450
09/01/2023	14:20:19	29.3	64.8	450

Tabla 8. Formato de presentación de Data (Salón G2-122)

Es importante mencionar que las concentraciones de CO₂ presentadas en el aula G2-122 se da en el día (04/01/2023). Esto se pudo generar por la gran cantidad presentada en el horario de 10:00 a 16:00.

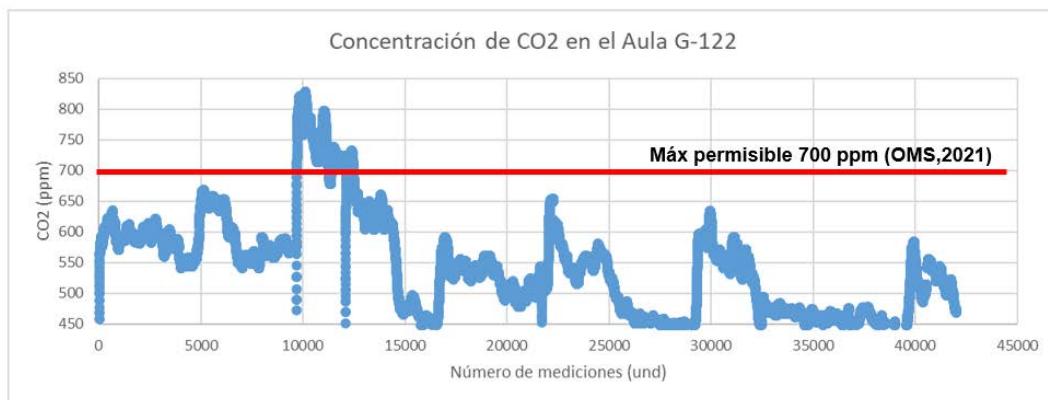


Figura 22. Medición de CO₂ en los 05 días de análisis – Aula G2-122

En la tabla 9, se muestra un resumen de los registros obtenidos en campo para el caso del salón G2-130.

Fecha	Hora	Temperatura (°C)	Humedad (%)	GAS CO ₂ (ppm)
03/01/2023	09:12:26	26.5	85.5	600
03/01/2023	09:12:29	26.5	85.5	600
03/01/2023	09:12:32	26.5	85.5	600
03/01/2023	09:12:35	26.5	85.5	600
04/01/2023	10:15:40	30.2	65.4	750
04/01/2023	10:15:43	30.2	65.4	750
04/01/2023	10:15:46	30.2	65.4	750
04/01/2023	10:15:49	30.2	65.4	750
06/01/2023	12:20:01	28.1	66.8	550
06/01/2023	12:20:04	28.1	66.8	550
06/01/2023	12:20:07	28.1	66.8	550
06/01/2023	12:20:10	28.1	66.8	550
09/01/2023	14:20:10	27.7	76.8	480
09/01/2023	14:20:13	27.7	76.8	480
09/01/2023	14:20:16	27.7	76.8	480
09/01/2023	14:20:19	27.7	76.8	480

Tabla 9. Formato de presentación de Data (Salón G2-130)

En el horario de 14:00 a 16:00 del día 04/01/23 se presenta un notorio incremento en la cantidad de número de personas, esto podría ser uno de los motivos por el cual se presenta un incremento en la concentración registrada de CO₂ para este caso de estudio.

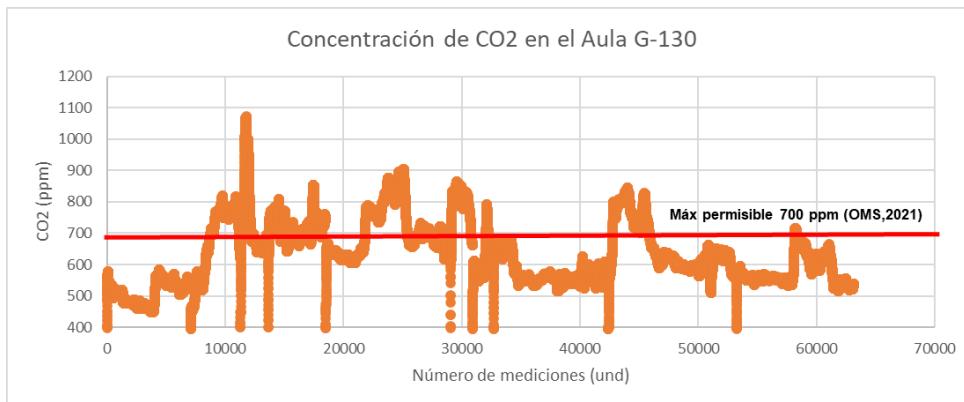


Figura 23. Medición de CO₂ en los 05 días de análisis (Salón G2-130)

En la tabla 10, se muestra un resumen de los registros obtenidos en campo para el caso del salón G2-142.

Fecha	Hora	Temperatura (°C)	Humedad (%)	GAS CO ₂ (ppm)
03/01/2023	09:12:26	26.5	85.5	600
03/01/2023	09:12:29	26.5	85.5	600
03/01/2023	09:12:32	26.5	85.5	600
03/01/2023	09:12:35	26.5	85.5	600
04/01/2023	10:15:40	30.2	65.4	750
04/01/2023	10:15:43	30.2	65.4	750
04/01/2023	10:15:46	30.2	65.4	750
04/01/2023	10:15:49	30.2	65.4	750
06/01/2023	12:20:01	28.1	66.8	550
06/01/2023	12:20:04	28.1	66.8	550
06/01/2023	12:20:07	28.1	66.8	550
06/01/2023	12:20:10	28.1	66.8	550
09/01/2023	14:20:10	27.7	76.8	480
09/01/2023	14:20:13	27.7	76.8	480
09/01/2023	14:20:16	27.7	76.8	480
09/01/2023	14:20:19	27.7	76.8	480

Tabla 10. Formato de presentación de Data (Salón G2-142)

En los días 06/01/2023 se presenta un notorio incremento en la concentración de CO₂ en el horario de 14:00 a 19:00, mientras que en el día 09/01/2023 el incremento es presentado en el horario de 14:00 a 16:00, esto podría ser a la presencia de una alta cantidad de personas comparado con los otros horarios.

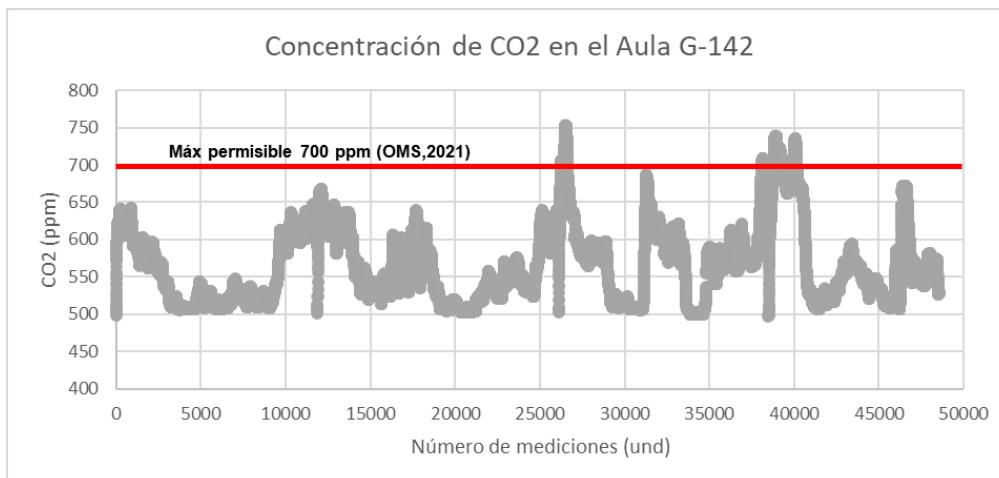


Figura 24. Medición de CO₂ en los 05 días de análisis (Salón G2-142)

Se identificarán las áreas de ventilación, sean puertas y ventanas que sean capaces de generar flujo de ventilación de aire el cual serán generados al abrir o cerrar estas aberturas. Para incluir el análisis el estado de las aberturas, se decidió incorporar una variable dicotómica en cada uno, representada con el valor de 1 si se encontraban completamente cerradas y con el valor 0 si estaban completamente abiertas.

3.2.2 ENCUESTA PARA USUARIOS

Con el propósito de evaluar la satisfacción del usuario en cada caso de estudio, y de acuerdo con los horarios preestablecidos, se proporcionó a las personas presentes en el salón una encuesta elaborada en Google Forms a través de WhatsApp, permitiéndoles registrar sus respuestas. Las se centraron en el confort del usuarios, basado en características de calidad interior en el ambiente, validando la aplicación de los conceptos establecidos por la normativa WELL. En la Tabla 11 se detallan estas preguntas:

Número	Concepto
Pregunta N°1	Diseño adecuado respecto a la ubicación de mobiliarios
Pregunta N°2	¿La temperatura del lugar es confortable?
Pregunta N°3	¿Siente fatiga o cansancio al momento de realizar sus actividades en dicho espacio?
Pregunta N°4	¿Siente que la ventilación natural del espacio es adecuada?
Pregunta N°5	¿Las ventanas y puertas se encuentran en buen estado para poder abrir las o cerrarlas?
Pregunta N°6	¿Fácil contagiate de alguna enfermedad respiratoria en el ambiente donde se encuentra?
Pregunta N°7	¿Está conforme con la limpieza (Espacio limpido) del espacio donde se encuentra?
Pregunta N°8	¿Considera que la cantidad de personas es adecuada para el espacio donde se encuentra o considera que es demasiada?
Pregunta N°9	¿Considera que existe una alta presencia de humedad en el espacio?
Pregunta N°10	¿Considera que al tener las ventanas abiertas y puertas, mejorara el confort del ambiente donde se encuentra?
Pregunta N°11	¿NO se siente fatiga o cansancio al momento de realizar sus actividades en dicho espacio?
Pregunta N°12	¿La temperatura del lugar NO es confortable?
Pregunta N°13	¿Considera que al tener las ventanas abiertas y puertas, NO mejorara el confort del ambiente donde se encuentra?
Pregunta N°14	¿Siente que la ventilación natural del espacio NO es adecuada?

Tabla 11. Encuesta de sondeo sobre confort de usuario

Las preguntas 2, 3, 4, 5 guardan relación con las preguntas 11, 12, 13, 14 respectivamente. Ya que las preguntas finales son la negación de estas, que sirven para poder confirmar la veracidad de las respuestas elaboradas en las preguntas inicial.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE MODELOS DE PREDICCIÓN

4.1 ANÁLISIS DE DATOS

Dentro del contexto general de la investigación, como paso inicial, se lleva a cabo la creación de modelos matemáticos de regresión lineal, culminando con la identificación de los modelos óptimos para cada caso de estudio y su posterior integración.

Posteriormente, se procede a evaluar criterios relacionados con la certificación sostenible, tales como las áreas verdes, con el objetivo de armonizar los resultados obtenidos en los modelos matemáticos, considerando la posible influencia de la saturación de CO₂, que podría atribuirse a la presencia de árboles cercanos a los entornos de estudio. Además, se examinan cuatro créditos de evaluación de la certificación LEED para evaluar la calidad del aire interior en los ambientes de estudio. Finalmente, se aborda el confort del usuario mediante una encuesta diseñada para conocer la satisfacción de quienes utilizan estas aulas de estudio.

Como conclusión se propondrán propuestas de mejoras para abordar la problemática de la alta saturación de CO₂, calidad del aire interior y confort del usuario.

A continuación, se presenta un flujograma que detalla el análisis de esta investigación.

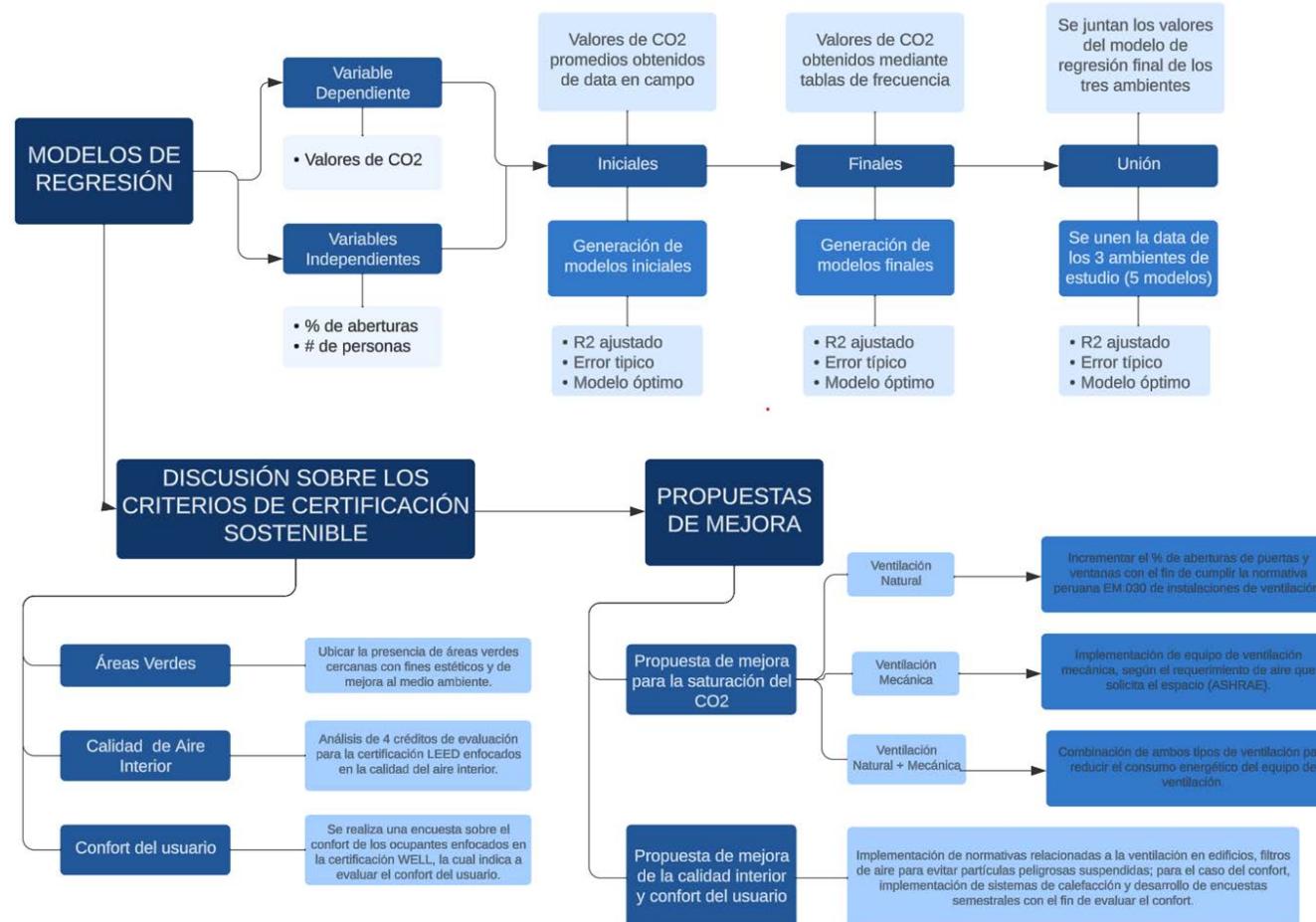


Figura 25. Flujograma de análisis

Ingresando a la parte de los modelos matemáticos, se realizaron dos tipos de análisis en cada salón de estudio, para la evaluación de la correlación múltiple primero se optaron por realizar **modelos de regresión inicial** que consistió en relacionar el valor de CO₂ promedio con las variables de estudio: cantidad de personas y % de aberturas (ventilación), luego de ello se realizaron los **modelos de regresión final** que en este caso se prefirió utilizar una tabla de frecuencias con los rangos de CO₂ obtenidos. Se empleó el valor de CO₂ más frecuente, determinado según los porcentajes de frecuencia encontrados.

En ambos casos se encontraron los valores de R₂ ajustado y % de error, para poder encontrar el modelo óptimo para la interpretación del valor de CO₂.

Finalmente se **unieron los datos de los tres salones de estudio** para poder generar una correlación múltiple a fin de encontrar un modelo global de estos ambientes de análisis, para este caso solo se empleó la unión de los modelos de regresión final. Comparando los resultados de R₂ ajustado y % de error para finalmente encontrar el modelo óptimo para esta investigación.

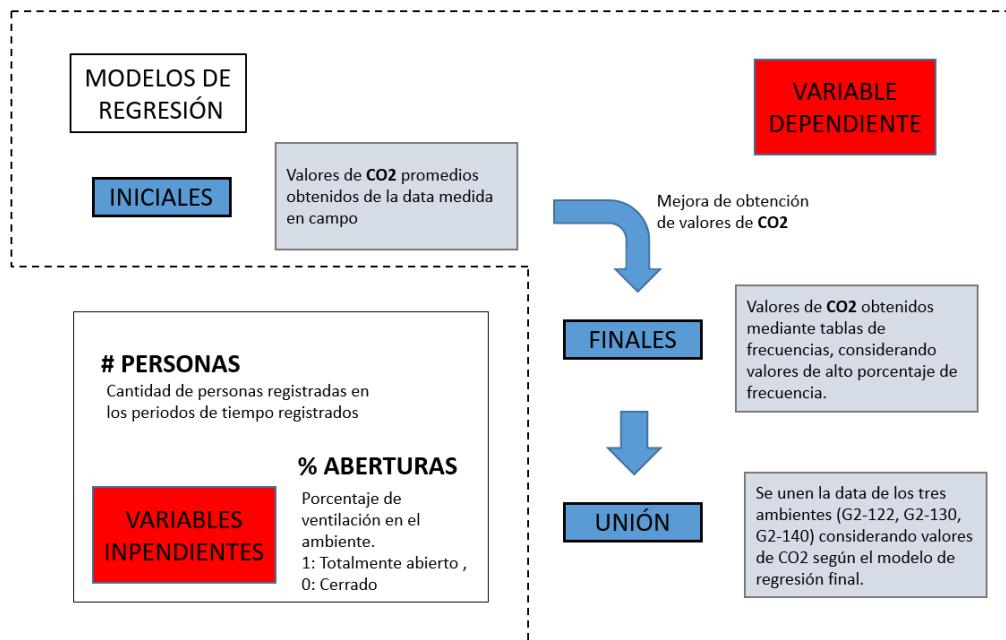


Figura 26. Salón G2-142

A continuación, se mostrará los modelos matemáticos para cada ambiente de estudio; que tienen un mejor comportamiento en cuanto a predicción según los datos medidos, condiciones del equipo y escenario elegido; los otros modelos estarán en el apartado de anexos.

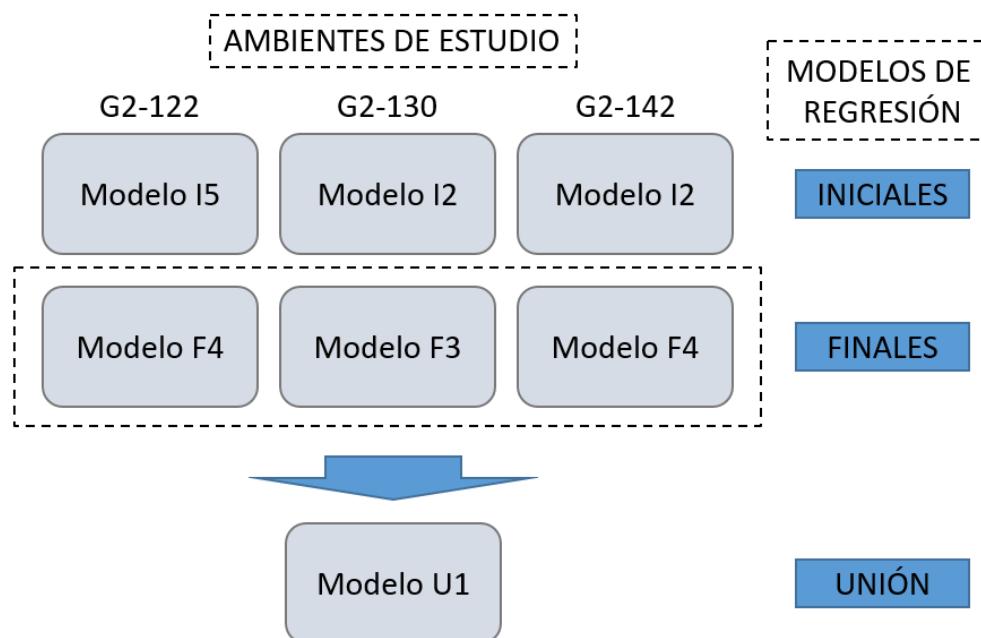


Figura 27. Salón G2-142

4.1.1 SALON G2-122



Figura 28. Fotografía de campo del salón G2-122

4.1.1.1 Modelos de regresión inicial (G2-122)

Para la elaboración de estos modelos, se consideró la cantidad de CO₂ como un valor promedio de los datos obtenidos en los horarios y días establecidos, para que posteriormente sean correlacionados con la cantidad de personas que permanecían en el espacio y el porcentaje deertura de las puertas y ventanas que generaban una variación en cuanto a la cantidad de CO₂ establecida.

Como se podrá observar en la figura 29, se muestra una buena correlación entre la cantidad de CO₂ y el número de personas registradas en los diferentes horarios de medición.

REGISTRO				
Día	Horario	Ítem	CO ₂ promedio	# personas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	450	11
	2:00 - 4:00	2	490	16
	6:00 - 8:00	3	610	30
4/01/2023	10:00 - 12:00	4	630	32
	2:00 - 4:00	5	650	36
	6:00 - 8:00	6	510	22
6/01/2023	10:00 - 12:00	7	690	40
	4:00 - 6:00	8	590	32
9/01/2023	2:00 - 4:00	9	460	12
	4:00 - 6:00	10	550	32

Tabla 12. Registro de CO₂ promedio y #personas (Salón G2-122)

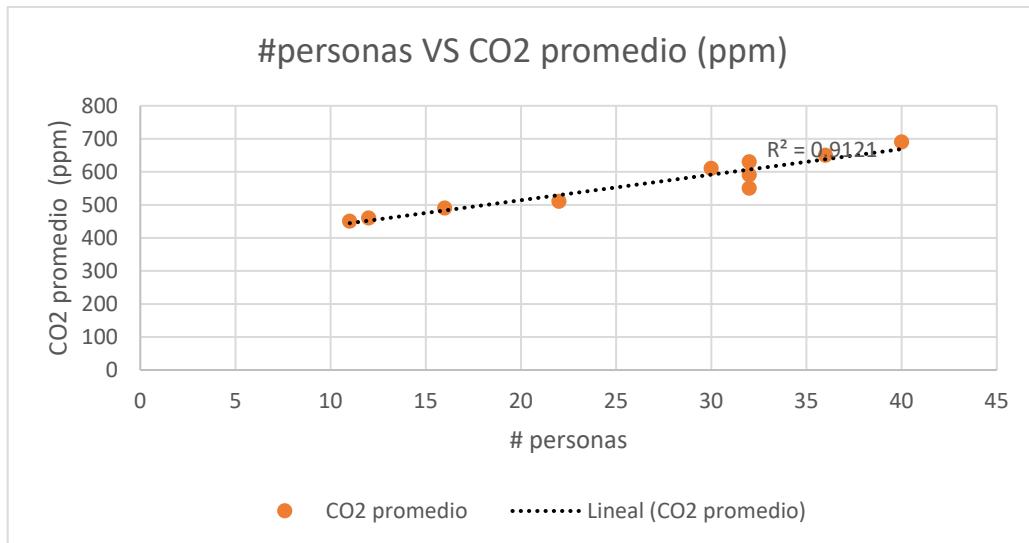


Figura 29. Correlación de # personas vs CO2 (Salón G2-122)

Se realizó un análisis de significancia de las variables que deberían considerarse en los modelos, obteniendo que solo era representativo considerar la presencia de personas.

También se intentó correlacionar numéricamente con la temperatura y humedad, pero no se identificó algo significativo.

La correlación encontrada no pretende ser única para cualquier ambiente. La intención es que esto se replique en otro ambiente, obteniendo una gráfica de correlación específica para cada caso

Una vez verificada esta buena correlación entre la variable # de personas y el valor promedio de CO2 medido, se procede a generar cinco (05) modelos, teniendo en cuenta la consideración de los "**modelos de regresión inicial**" los modelos lo podremos apreciar a más detalle en el Anexo 3. A continuación, se mostrará el resumen de los modelos, resaltando el de mejor predicción para este caso de análisis del salón G2-122.

Resumen de modelos iniciales (G2-122)

Nº	Modelo	R2 ajustado	Error
1	$CO2 = 378.63 + 7.39*X1 - 14.39*X2'$	0.894	27.258
2	$CO2 = 395.15 + 7.27*X1 - 34.22*X2$	0.899	26.608
3	$CO2 = 116.90 + 347.71*\log(X1) - 50.17*X2$	0.848	32.573
4	$CO2 = 251.92 + 67.56*\sqrt{X1} - 41.41*X2$	0.877	29.300
5	$CO2 = 462.67 + 0.15*(X1)^2 - 26.41*X2$	0.912	24.790

Tabla 13. Formato de presentación de Data – Inicial (Salón G2-122)

De la tabla resumen se puede observar que el modelo nº5 presentado para el caso inicial, cuenta con un mejor R^2 ajustado de 0.912 y un error menor de 24.790 a diferencia de los demás casos. Así mismo, los coeficientes encontrados tienen un adecuado valor de incidencia en el modelo.

Las incidencias del número de personas al cuadrado multiplicado por un factor de 0.15 es considerable, de igual manera el factor de -26.41 para el caso de las aberturas.

Por ejemplo, considerando un valor de $X1=40$ y $X2=0.3$ la incidencia de la variable # de personas es de +210 y la de la variable % de aberturas -7 siendo valores creíbles considerando que las condiciones del escenario son casi cerradas, obteniéndose un valor de CO2 690, relativamente alto por la cantidad máx. de personas que se encuentran en el ambiente.

Aun así, se propone mejorar los valores de CO2 establecidos que se obtuvieron de las mediciones, para ello se propuso trabajar con una tabla de rangos y frecuencias, para poder obtener un valor de CO2 promedio más acorde a los datos obtenidos.

4.1.1.2 Modelos de regresión final (G2-122)

Para la elaboración de estos modelos, se obtuvo la cantidad de CO2 mediante la creación de una tabla de frecuencias con los rangos de CO2 obtenidos. Se empleó el valor de CO2 más representativo, determinado según los porcentajes de frecuencia encontrados. Posteriormente, estos valores fueron correlacionados con la cantidad de personas presentes en

el espacio y el porcentaje de apertura de puertas y ventanas, ya que esto generaba una variación en la cantidad de CO₂ establecida.

Como se podrá observar en la figura 30, se muestra una buena correlación entre la cantidad de CO₂.

REGISTRO				
Día	Horario	ítem	CO ₂ promedio	# personas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	450	11
	2:00 - 4:00	2	490	16
	6:00 - 8:00	3	700	30
4/01/2023	10:00 - 12:00	4	570	32
	2:00 - 4:00	5	650	36
	6:00 - 8:00	6	510	22
6/01/2023	10:00 - 12:00	7	760	40
	4:00 - 6:00	8	640	32
9/01/2023	2:00 - 4:00	9	460	12
	4:00 - 6:00	10	550	32

Tabla 14. Registro de CO₂ y #personas (Salón G2-122)

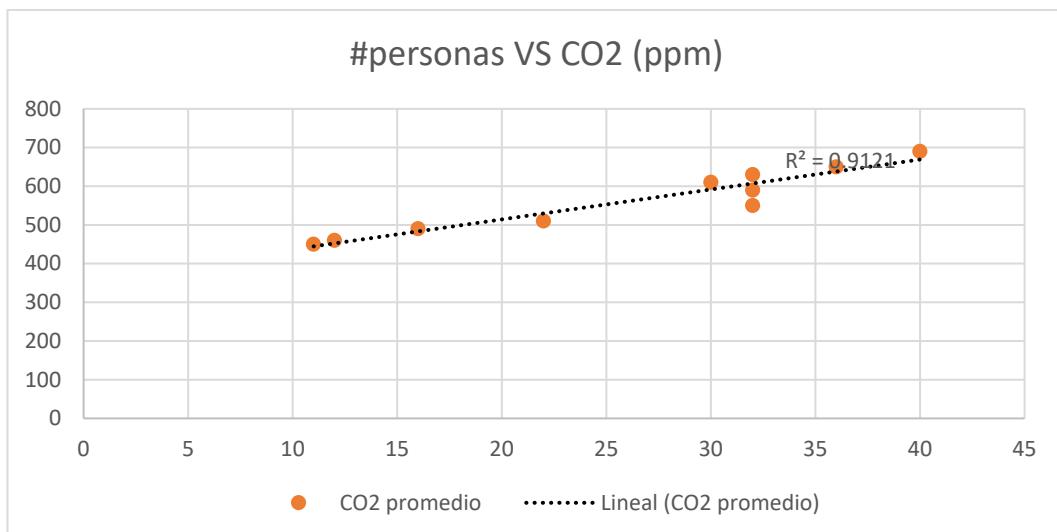


Figura 30. Correlación de # personas vs CO₂ (Salón G2-122)

Una vez verificada esta buena correlación entre la variable # de personas y el valor promedio de CO₂ medido, se procede a generar cinco (05) modelos, teniendo en cuenta la consideración de los “modelos de

regresión final" los modelos lo podremos apreciar a más detalle en el Anexo 3. A continuación, se mostrará el resumen de los modelos, resaltando el de mejor predicción para este caso de análisis del salón G2-122.

Resumen de modelos finales (G2-122)

Nº	Modelo	R2 ajustado	Error
1	$CO2 = 476.72 + 6.57*X_1 - 102.05*X_2$	0.917	30.467
2	$CO2 = 518.90 + 6.70*X_1 - 170.92*X_2$	0.891	34795
3	$CO2 = 261.71 + 320.80*\log(X_1) - 185.40*X_2$	0.866	38.668
4	$CO2 = 386.94 + 62.23*\sqrt{X_1} - 177.52*X_2$	0.880	36.568
5	$CO2 = 580.21 + 0.14*(X_1)^2 - 163.12*X_2$	0.902	33.048

Tabla 15. Formato de presentación de Data - Final (Salón G2-122)

De la tabla resumen se puede observar que el modelo nº5 presentado para el caso final, cuenta con un mejor R2 ajustado de 0.902 y un error menor de 33.048 a diferencia de los demás casos. Sin embargo, los coeficientes encontrados tienen un bajo valor de incidencia en el modelo.

Las incidencias del número de personas al cuadrado multiplicado por un factor de 0.14 es muy bajo.

Por el contrario, el modelo 4 tiene un mejor factor de incidencia para las variables de número personas y la variable de abertura.

Utilizando un dato de ejemplo, para un valor de $X_1 = 40$, $X_2 = 0.3$ y $CO2 \text{ real} = 760$. Remplazando en el modelo se tendrían lo siguiente:

$$CO2 \text{ teórico} = 386.94 + 62.23*\sqrt{40} - 177.52*0.3 = 727.20$$

Como se puede apreciar en el ejemplo anterior, el modelo más óptimo para estos casos finales del salón G2-122 es el modelo 4.

4.1.2 SALON G2-130



Figura 31. Fotografía de campo del salón G2-130

4.1.2.1 Modelos de regresión inicial (G2-130)

Para la elaboración de estos modelos, se consideró la cantidad de CO₂ como un valor promedio de los datos obtenidos en los horarios y días establecidos, para que posteriormente sean correlacionados con la cantidad de personas que permanecían en el espacio y el porcentaje deertura de las puertas y ventanas que generaban una variación en cuanto a la cantidad de CO₂ establecida.

Como se podrá observar en la figura 32, se muestra una buena correlación entre la cantidad de CO₂ y el número de personas registradas en los diferentes horarios de medición.

REGISTRO				
Día	Horario	Ítem	CO ₂ promedio	# personas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	470	8
	1:00 - 4:00	2	540	18
4/01/2023	10:00 - 12:00	7	680	33
	4:00 - 6:00	8	640	24
6/01/2023	10:00 - 12:00	4	590	22
	4:00 - 6:00	5	760	38
	6:00 - 8:00	6	700	35
9/01/2023	2:00 - 4:00	7	800	42

Tabla 16. Registro de CO₂ promedio y #personas (Salón G2-130)

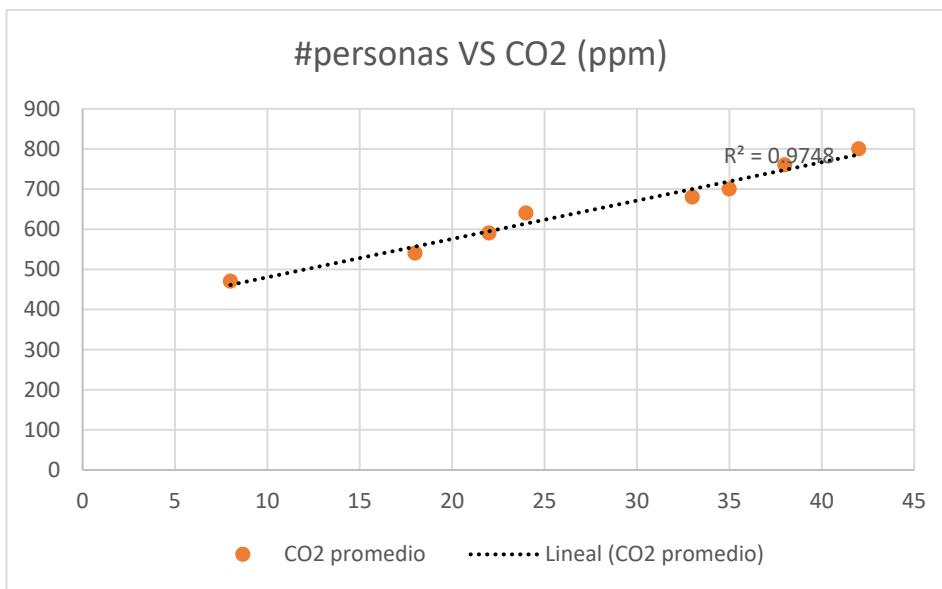


Figura 32. Correlación de # personas vs CO2 (Salón G2-130)

Una vez verificada esta buena correlación entre la variable # de personas y el valor promedio de CO2 medido, se procede a generar cinco (05) modelos, teniendo en cuenta la consideración de los “**modelos de regresión inicial**” los modelos lo podremos apreciar a más detalle en el Anexo 3. A continuación, se mostrará el resumen de los modelos, resaltando el de mejor predicción para este caso de análisis del salón G2-130.

Resumen de modelos iniciales (G-130)

Nº	Modelo	R2 ajustado	Error
1	CO2= 396.95 + 9.37*X ₁ - 11.52*X ₂	0.968	19.742
2	CO2= 406.45 + 9.28*X ₁ - 22.95*X ₂	0.968	19.541
3	CO2= 66.15 + 429.31*log(X ₁) - 27.18*X ₂	0.857	41.895
4	CO2= 214.05 + 87.12*√X ₁ - 20.44*X ₂	0.933	28.696
5	CO2= 524.48 + 0.17*(X ₁) ^2 - 44.79*X ₂	0.957	22.928

Tabla 17. Formato de presentación de Data - Inicial (Salón G2-130)

De la tabla resumen se puede observar que el modelo nº1 presentado para el caso inicial, cuenta con un mejor R2 ajustado de 0.968 y un error menor

de 19.742 a diferencia de los demás casos. Sin embargo, los coeficientes encontrados tienen un bajo valor de incidencia en el modelo.

Las incidencias del número de personas multiplicado por un factor de 9.37 es muy bajo, de igual manera el factor de -11.52 para el caso de las aberturas.

Por el contrario, el modelo 2 tiene un mejor factor de incidencia para las variables de número personas y la variable de abertura.

Utilizando un dato de ejemplo, para un valor de $X_1 = 38$, $X_2 = 0.3$ y $CO_2 \text{ real} = 760$. Remplazando en el modelo se tendrían lo siguiente:

$$CO_2 \text{ teórico} = 406.45 + 9.28 * 38 - 22.95 * 0.3 = 752.27$$

Aun así, se propone mejorar los valores de CO_2 establecidos que se obtuvieron de las mediciones, para ello se propuso trabajar con una tabla de rangos y frecuencias, para poder obtener un valor de CO_2 promedio más acorde a los datos obtenidos.

4.1.2.2 Modelos de regresión final (G2-130)

Para la elaboración de estos modelos, se obtuvo la cantidad de CO_2 mediante la creación de una tabla de frecuencias con los rangos de CO_2 obtenidos. Se empleó el valor de CO_2 más representativo, determinado según los porcentajes de frecuencia encontrados. Posteriormente, estos valores fueron correlacionados con la cantidad de personas presentes en el espacio y el porcentaje de apertura de puertas y ventanas, ya que esto generaba una variación en la cantidad de CO_2 establecida.

Como se podrá observar en la figura 33, se muestra una buena correlación entre la cantidad de CO_2 .

REGISTRO				
Día	Horario	ítem	CO2 promedio	# personas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	470	8
	1:00 - 4:00	2	540	18
4/01/2023	10:00 - 12:00	7	680	33
	4:00 - 6:00	8	720	24
6/01/2023	10:00 - 12:00	4	590	22
	4:00 - 6:00	5	760	38
	6:00 - 8:00	6	750	35
9/01/2023	2:00 - 4:00	7	600	42

Tabla 18. Registro de CO2 y #personas (Salón G2-130)

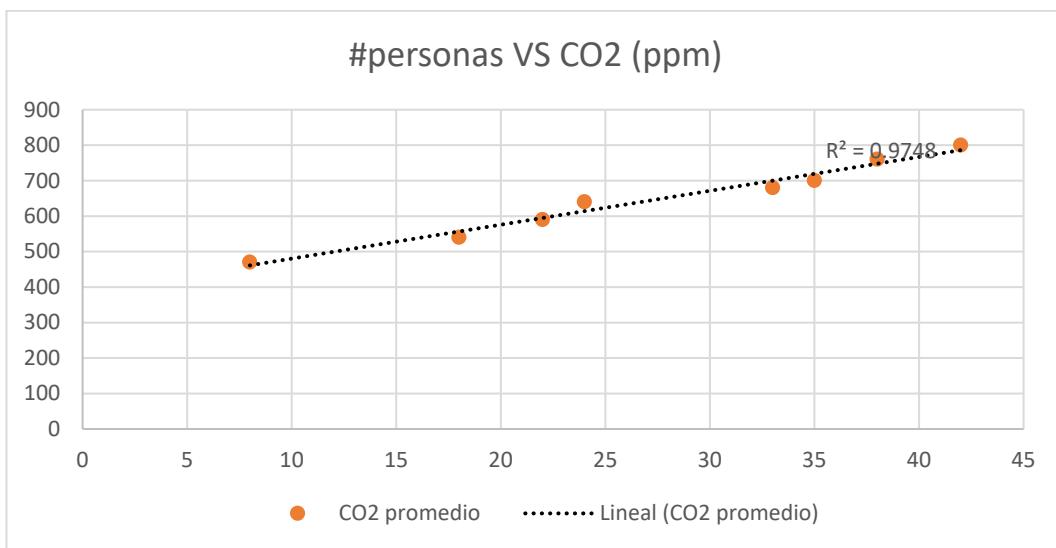


Figura 33. Correlación de # personas vs CO2 (Salón G2-130)

Una vez verificada esta buena correlación entre la variable # de personas y el valor promedio de CO2 medido, se procede a generar cinco (05) modelos, teniendo en cuenta la consideración de los “**modelos de regresión final**” los modelos lo podremos apreciar a más detalle en el Anexo 3. A continuación, se mostrará el resumen de los modelos, resaltando el de mejor predicción para este caso de análisis del salón G2-130.

Resumen de modelos finales (G2-130)

Nº	Modelo	R2 ajustado	Error
1	$CO2 = 600.90 + 4.41*X_1 - 133.27*X_2$	0.831	43.152
2	$CO2 = 688.95 + 3.63*X_1 - 242.35*X_2$	0.823	44.216
3	$CO2 = 490.89 + 207.87*\log(X_1) - 229.12*X_2$	0.886	35.399
4	$CO2 = 588.99 + 37.98*\sqrt{X_1} - 233.87*X_2$	0.858	39.642
5	$CO2 = 580.21 + 0.14*(X_1)^2 - 163.12*X_2$	0.761	51.384

Tabla 19. Formato de presentación de Data – Final (Salón G2-130)

De la tabla resumen se puede observar que el mejor modelo presentado para el caso inicial es el modelo n°3, ya que cuenta con un mejor R^2 ajustado de 0.886 y el error es el menor a diferencia de los demás casos. Además, los coeficientes encontrados tienen un alto valor de incidencia en el modelo.

Las incidencias del logaritmo del número de personas multiplicado por un factor de 207.87 es alto, de igual manera el factor de -229.12 para el caso de las aberturas es considerable.

Utilizando un dato de ejemplo, para un valor de $X_1 = 35$, $X_2 = 0.25$ y $CO2 \text{ real} = 750$. Remplazando en el modelo se tendrían lo siguiente:

$$CO2 \text{ teórico} = 490.89 + 207.87*\log(35) - 229.12*0.25 = 750.54$$

Como se puede apreciar en el ejemplo anterior, el modelo óptimo para estos casos finales del salón G2-130 es el modelo 3.

4.1.3 SALON G2-142



Figura 34. Plano de distribución de oficina N°2

4.1.3.1 Modelos de regresión inicial (G2-142)

Para la elaboración de estos modelos, se consideró la cantidad de CO₂ como un valor promedio de los datos obtenidos en los horarios y días establecidos, para que posteriormente sean correlacionados con la cantidad de personas que permanecían en el espacio y el porcentaje deertura de las puertas y ventanas que generaban una variación en cuanto a la cantidad de CO₂ establecida.

Como se podrá observar en la figura 35, se muestra una buena correlación entre la cantidad de CO₂ y el número de personas registradas en los diferentes horarios de medición.

REGISTRO				
Día	Horario	ítem	CO ₂ promedio	# personas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	510	24
	2:00 - 4:00	2	450	19
	6:00 - 8:00	3	500	23
4/01/2023	8:00 - 10:00	4	540	30
	12:00 - 2:00	5	650	38
	4:00 - 6:00	6	430	14
	7:00 - 9:00	7	580	34
6/01/2023	10:00 - 12:00	8	550	30
	2:00 - 4:00	9	560	35
	6:00 - 8:00	10	630	37
9/01/2023	10:00 - 12:00	11	600	43
	4:00 - 6:00	12	600	36
	6:00 - 8:00	13	530	28

Tabla 20. Registro de CO₂ promedio y #personas (Salón G2-142)

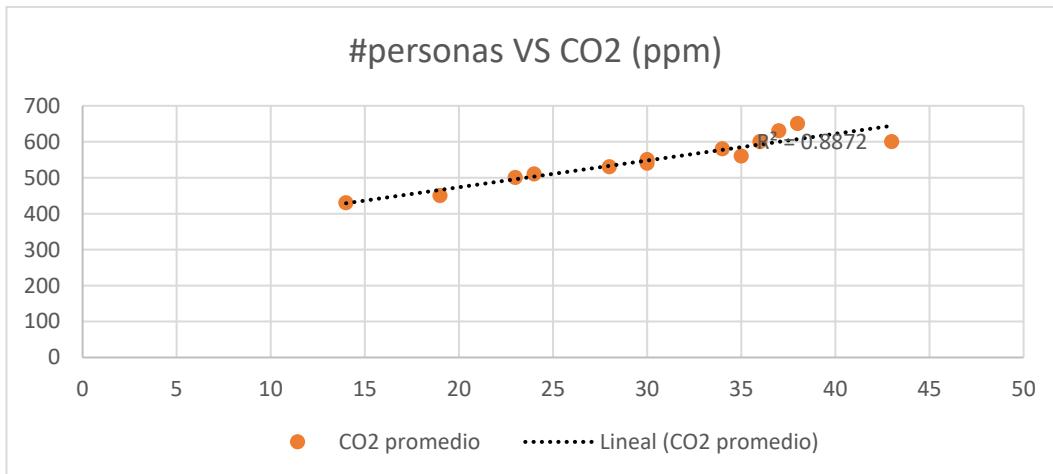


Figura 35. Correlación de # personas vs CO2 (Salón G2-142)

Una vez verificada esta buena correlación entre la variable # de personas y el valor promedio de CO2 medido, se procede a generar cinco (05) modelos, teniendo en cuenta la consideración de los “**modelos de regresión inicial**” los modelos lo podremos apreciar a más detalle en el Anexo 3. A continuación, se mostrará el resumen de los modelos, resaltando el de mejor predicción para este caso de análisis del salón G2-142.

Resumen de modelos iniciales (G2-142)

Nº	Modelo	R2 ajustado	Error
1	CO2= 336.74 + 7.25*X ₁ - 10.31*X ₂	0.871	23.440
2	CO2= 339.61 + 7.23*X ₁ - 14.57*X ₂	0.869	23.660
3	CO2= -95.77 + 443.20*log(X ₁) - 4092*X ₂	0.858	24.652
4	CO2= 141.28 + 75.94*√X ₁ - 8.80*X ₂	0.871	23.476
5	CO2= 449.49 + 0.12*(X ₁) ^2 - 29.25*X ₂	0.831	26.868

Tabla 21. Formato de presentación de Data - Inicial (Salón G2-142)

De la tabla resumen se puede observar que el modelo nº1 presentado para el caso inicial, cuenta con un mejor R2 ajustado de 0.871 y un error menor de 23.440 a diferencia de los demás casos. Sin embargo, los coeficientes encontrados tienen un bajo valor de incidencia en el modelo.

Las incidencias del número de personas por un factor de 7.23 es muy bajo, de igual manera el factor de -10.31 para el caso de las aberturas.

Por el contrario, el modelo 2 tiene un mejor factor de incidencia para las variables de número personas y sobre todo la variable de abertura.

Utilizando un dato de ejemplo, para un valor de $X_1 = 38$, $X_2 = 0.8$ y $CO_2 \text{ real} = 650$. Remplazando en el modelo se tendrían lo siguiente:

$$CO_2 \text{ teórico} = 339.61 + 7.23 * 38 - 14.57 * 0.8 = 602.66$$

Debido a esto, se proponer mejorar los valores de CO_2 establecidos que se obtuvieron de las mediciones, para ello se propuso trabajar con una tabla de rangos y frecuencias, para poder obtener un valor de CO_2 promedio más acorde a los datos obtenidos

4.1.3.2 Modelos de regresión final (G2-142)

Para la elaboración de estos modelos, se obtuvo la cantidad de CO_2 mediante la creación de una tabla de frecuencias con los rangos de CO_2 obtenidos. Se empleó el valor de CO_2 más representativo, determinado según los porcentajes de frecuencia encontrados. Posteriormente, estos valores fueron correlacionados con la cantidad de personas presentes en el espacio y el porcentaje de apertura de puertas y ventanas, ya que esto generaba una variación en la cantidad de CO_2 establecida.

Como se podrá observar en la figura 36, se muestra una buena correlación entre la cantidad de CO_2 .

REGISTRO				
Día	Horario	ítem	CO2 promedio	# personas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	510	24
	2:00 - 4:00	2	450	19
	6:00 - 8:00	3	500	23
4/01/2023	8:00 - 10:00	4	680	30
	12:00 - 2:00	5	620	38
	4:00 - 6:00	6	430	14
	7:00 - 9:00	7	700	34
6/01/2023	10:00 - 12:00	8	550	30
	2:00 - 4:00	9	560	35
	6:00 - 8:00	10	750	37
9/01/2023	10:00 - 12:00	11	600	43
	4:00 - 6:00	12	730	36
	6:00 - 8:00	13	550	28

Tabla 22. Registro de CO2 y #personas (Salón G2-142)

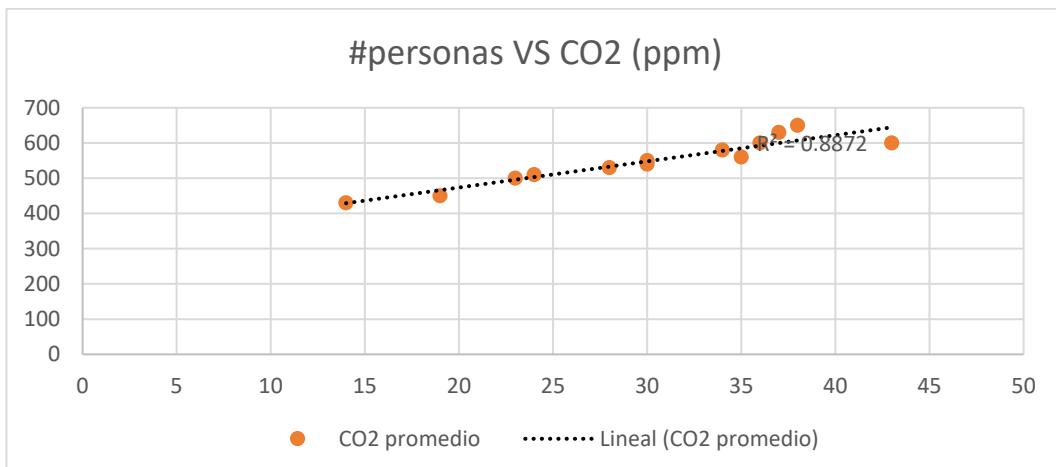


Figura 36. Correlación de # personas vs CO2 (Salón G2-142)

Una vez verificada esta buena correlación entre la variable # de personas y el valor promedio de CO2 medido, se procede a generar cinco (05) modelos, teniendo en cuenta la consideración de los “**modelos de regresión final**” los modelos lo podremos apreciar a más detalle en el Anexo 3. A continuación, se mostrará el resumen de los modelos, resaltando el de mejor predicción para este caso de análisis del salón G2-142.

Resumen de modelos finales (G2-142)

Nº	Modelo	R2 ajustado	Error
1	$CO2 = 434.99 + 7.49*X_1 - 118.95*X_2$	0.868	37.815
2	$CO2 = 501.77 + 6.77*X_1 - 201.52*X_2$	0.846	40.782
3	$CO2 = 101.18 + 410.62*\log(X_1) - 193.39*X_2$	0.836	42.148
4	$CO2 = 318.13 + 70.79*\sqrt{X_1} - 196.51*X_2$	0.844	41.088
5	$CO2 = 603.77 + 0.11*(X_1)^2 - 214.89*X_2$	0.837	42.000

Tabla 23. Formato de presentación de Data - Final (Salón G2-142)

De la tabla resumen se puede observar que el mejor modelo presentado para el caso inicial es el modelo nº1, ya que cuenta con un mejor R^2 ajustado de 0.868 y el error es el menor a diferencia de los demás casos. Sin embargo, los coeficientes encontrados tienen un valor de incidencia bajos.

Las incidencias del número de personas multiplicado por un factor de 7.49 es bajo, de igual manera el factor de -118.95 para el caso de las aberturas. En cambio, el modelo nº4 presenta una importante incidencia en la variable del # de personas, que en este caso viene representado por la raíz del valor multiplicado por 70.79

Utilizando un dato de ejemplo, para un valor de $X_1 = 34$ y $X_2 = 0.2$

Remplazando en el modelo se tendrían lo siguiente:

$$CO2 = 318.13 + \sqrt{34} - 196.51 * 0.2 = 671.97$$

4.1.4 UNIÓN

Para la generación de estos modelos de regresión lineal, se une la data de los tres ambientes de estudio (G2-122, G2-130, G2-142) considerando valores de CO2 según el modelo de **regresión final**.

A continuación, se mostrará el resumen de los modelos para este caso de análisis, el detalle de estos cinco (05) modelos se pueden apreciar en el Anexo 3.

Resumen de modelos (Unión)

Nº	Modelo	R2 ajustado	Error
1	CO2= 471.21 + 6.38*X ₁ - 92.49*X ₂	0.787	46.085
2	CO2= 508.97 + 6.22*X ₁ - 149.01*X ₂	0.763	48.560
3	CO2= 282.38 + 291.65*log(X ₁) - 166.36*X ₂	0.728	52.409
4	CO2= 385.70 + 58.05*√X ₁ - 155.56*X ₂	0.749	50.047
5	CO2= 603.77 + 0.11*(X ₁) ² - 214.89*X ₂	0.766	48.231

Tabla 24. Formato de presentación de Data (Unión)

De la tabla resumen se puede observar que el mejor modelo presentado para el caso de los modelos unidos es el modelo n°1, ya que cuenta con un mejor R² ajustado de 0.787 y el error es el menor a diferencia de los demás casos. Además, los coeficientes e incidencias generados por las variables # de personas y % de aberturas tienen muy buena coincidencia con los valores reales de CO₂.

En términos generales, se han generado treinta y cinco modelos (35): diez (10) correspondientes al entorno G2-122, otros diez (10) al entorno G2-130, diez (10) al entorno G2-142, y cinco (05) que resultan de la combinación de los tres entornos de estudio.

La selección de los modelos más representativos en estos casos de estudio se centró en la influencia de las variables, como el número de personas y el porcentaje de apertura generado por puertas y ventanas. En todos los modelos, se observa claramente la relación directa entre la variable independiente 'Número de Personas' y la variable dependiente 'CO₂', mientras que se presenta una relación inversa en el caso de la variable independiente 'Porcentaje de Aberturas'

Para el caso del ambiente G2-122, en los análisis de regresión inicial el mejor modelo se generó elevando al cuadrado la variable de # de personas, para el análisis de regresión final se generó con la raíz de la variable # de personas. En el ambiente G2-130, en los análisis de regresión inicial el mejor modelo se generó simplemente con el valor del # de personas, para el análisis de regresión final se generó con el logaritmo de la variable # de personas.

Finalmente, para el ambiente G2-142, en los análisis de regresión inicial el mejor modelo se generó simplemente con el valor del # de personas, para el análisis de regresión final se generó con la raíz de la variable # de personas.

Al generar la unión de estos modelos, el modelo con mejor predicción de los valores de CO₂ fue la relación lineal entre la cantidad de personas y el % de aberturas, considerando 0: cuando está completamente cerrado y 1: completamente abierto.

A continuación, se muestran los mejores modelos encontrados en este capítulo de análisis de datos.

Ambiente	Tipo de Análisis	N°	Modelo	R2 ajustado	Error
G2-122	R.Inicial	5	$CO_2 = 462.67 + 0.15*(X1)^2 - 26.41*X2$	0.91	24.79
	R.Final	4	$CO_2 = 386.94 + 62.23*\sqrt{X1} - 177.52*X2$	0.88	36.57
G2-130	R.Inicial	2	$CO_2 = 406.45 + 9.28*X1 - 22.95*X2$	0.97	19.54
	R.Final	3	$CO_2 = 490.89 + 207.87*\log(X1) - 229.12*X2$	0.87	23.66
G2-142	R.Inicial	2	$CO_2 = 339.61 + 7.23*X1 - 14.57*X2$	0.84	41.09
	R.Final	4	$CO_2 = 318.13 + 70.79*\sqrt{X1} - 196.51*X2$	0.79	46.09
G2-122 G2-130 G2-142	R. Unión	1	$CO_2 = 471.21 + 6.38*X1 - 92.49*X2$	0.79	46.09

Nota: R. Inicial: Valores de CO₂ promedios; R. Final: Valores de CO₂ obtenidos por tablas de frecuencias en consideración a los valores más recurrentes.

Tabla 25. Tabla resumen de modelos óptimos

4.2 EVALUACION DE CRITERIOS DE CERTIFICACIÓN

Los bajos niveles de CO₂ encajan con el hecho de la alta presencia de áreas verdes. Es por ello que se realizó un diagnóstico con el fin de corroborar los resultados obtenidos en los diferentes modelos de regresión lineal múltiple generados. A continuación, se detalla el diagnóstico encontrado.

4.2.1 Áreas verdes

Dentro de la Universidad Nacional de Ingeniería se cuenta con diversas áreas verdes, y la Facultad de Ingeniería Civil no es la excepción, más que por un uso estético se usan las áreas verdes para contribuir a la mejora del medio ambiente.

4.2.1.1 Salón G-142

Al frente de la entrada de este salón se ubica dos pequeñas áreas verdes. La primera se muestra en la figura 37, la segunda en la figura 38. Además de contar con un pequeño parque con una variedad de árboles alrededor. Todo esto genera un gran aporte de oxígeno y reducción de dióxido de carbono en los salones.



Figura 37. Área verde 1 frente al salón G-142



Figura 38. Área verde 2 frente al salón G-142

Frente a este salón también se tiene una zona de descanso para los estudiantes, donde también existen áreas verdes y presencia de árboles. Esto se muestra en la Figura 39.



Figura 39. Zona de descanso frente al salón G-142

Cerca de las ventanas de estos salones se ubica un área verde de forma trapezoidal y de gran extensión. Además, se encuentra el estacionamiento de la Facultad de Ingeniería Civil. Todo esto genera un buen aporte de

oxígeno, por la presencia de árboles, y a su vez, aporte de dióxido de carbono en los salones, por la presencia de autos.



Figura 40. Estacionamiento frente al salón G2-142

4.2.1.2 Salón G-122 Y G2-130

Al frente de la entrada de este salón se ubican dos pequeñas áreas verdes lejanas, que no cuentan con árboles. Todo esto no genera un buen aporte de oxígeno y ni reducción de dióxido de carbono en el salón.



Figura 41. Áreas verdes 1 frente a los salones G-122 y G-130

Cerca de las ventanas de este salón se ubica un área verde de gran extensión mostrada en la figura 42. Además, se encuentra cercana a la entrada de la Facultad de Ingeniería Civil que cuenta con una variedad de árboles. Todo esto genera un buen aporte de oxígeno y reducción de dióxido de carbono en el salón.



Figura 42. Área verde 2 cercana a los salones G2-122 y G-130

Cerca de estos salones se encuentra un pequeño jardín que cuenta con una variedad de plantas como se muestra en la figura 43. Todo esto genera un buen aporte de oxígeno y reducción de dióxido de carbono para los dos (02) salones.



Figura 43. Jardín cercano a los salones G2-122 y G2-130

4.2.2 Calidad de Aire interior

Como parte de la evaluación de los ambientes de estudio (G2-122, G2-130 y G2-142) se analizaron cuatro créditos de la certificación LEED enfocados en la calidad del aire interior. Con el fin de verificar el cumplimiento de estos ambientes en consideración a los requerimientos de la certificación LEED.

A continuación, se muestran los diferentes créditos de evaluación:

CRÉDITO LEED	AMBIENTES DE ESTUDIO		
Programa de gestión de la calidad del aire interior	G2-122	G2-130	G2-142
<u>Intención: Mantener el bienestar de los ocupantes previniendo y corrigiendo los problemas de calidad del aire interior.</u>			
¿Cuenta con una implementación de algún programa de gestión de calidad del aire interior?	X	X	X

Tabla 26. Crédito LEED – Programa de gestión de la calidad del aire interior

Fuente: Propia

En la tabla 26 se muestra que, los espacios de estudio no cuentan con la implementación de un sistema de gestión de calidad interior. Sin embargo, es posible implementarlo.

CRÉDITO LEED	AMBIENTES DE ESTUDIO		
Estrategias mejoradas para la calidad del aire interior	G2-122	G2-130	G2-142
<u>Intención: Promover el confort, el bienestar y la productividad de los ocupantes mejorando la calidad del aire interior.</u>			
Opción 1: Estrategias mejoradas			
<u>Espacios ventilados mecánicamente</u>			
¿Cuenta con la instalación de algún sistema que permita captar la suciedad y partículas que ingresen en el ambiente tales como, sistemas ranurados en las entradas? ¿Cuenta con vestíbulos de entrada presurizados?	-	-	-
¿Cuenta con equipos de extracción con el fin de obtener una mejor calidad de aire interno?	-	-	-

¿Cuenta con un sistema de automatización de cierre de puertas y ventanas?			
¿Los sistemas de ventilación que suministran aire exterior cuentan con filtros de partículas?	-	-	-
<u>Espacios con ventilación natural</u>			
¿Cuenta con la instalación de algún sistema que permita captar la suciedad y partículas que ingresen en el ambiente tales como, sistemas ranurados en las entradas? ¿Cuenta con vestíbulos de entrada presurizados?	X	X	X
¿Cuenta con un diseño de ventilación apropiado según el Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE)?	X	X	X
Opción 2: Estrategias mejoradas adicionales			
<u>Espacios ventilados mecánicamente</u>			
¿Cuenta con un modelado computacional que garantize que las concentraciones de contaminantes del aire exterior estén por debajo de los umbrales permitidos?	-	-	-
Cuenta con tasas de ventilación del aire exterior, de por lo menos un 30% por encima de las tasas mínimas según lo determinado en el modelo computacional?	-	-	-
Existe un monitoreo de concentraciones de CO ₂ con un equipo ubicado en el rango de 0.9 m y 1.8m por encima del suelo y adicionalmente a ello cuenta con un sistema de alerta al detectar valores altos de CO ₂ ?	-	-	-

Existe un monitoreo de contaminantes del aire, adicional al gas de CO ₂ complementada con una alarma de alerta.	-	-	-
<u>Espacios con ventilación natural</u>			
¿Cuenta con un modelado computacional que garantice que las concentraciones de contaminantes del aire exterior estén por debajo de los umbrales permitidos?	X	X	X
Existe un monitoreo de contaminantes del aire, adicional al gas de CO ₂ complementada con una alarma de alerta.	X	X	X
¿Presenta un diseño para el cálculo del flujo del aire?	X	X	X

Tabla 27. Crédito LEED – Estrategias mejoradas para la calidad del aire interior

En relación con los espacios mencionados, se constató únicamente la presencia de ventilación natural, sin la incorporación de sistemas de ventilación mecánica.

En cuanto a la evaluación de la Opción 1, según se detalla en la tabla 27, se evidencia que los entornos de estudio carecen de la implementación de sistemas destinados a capturar partículas o suciedad presentes en el ambiente. Además, no disponen de vestíbulos de entrada presurizados ni cuentan con un diseño de ventilación adecuado.

En lo que respecta a la evaluación de la Opción 2 del crédito, se observa que los espacios analizados no cuentan con un modelo computacional que asegure que las concentraciones de contaminantes en el aire exterior se encuentren por debajo de los límites permitidos. Asimismo, no se realiza un monitoreo integral de contaminantes del aire, más allá del dióxido de carbono (CO₂), y no se proporciona un cálculo detallado del flujo de aire.

Es crucial destacar que en este estudio se llevó a cabo el monitoreo del dióxido de carbono (CO₂) únicamente en momentos específicos y no de forma continua. Además, el equipo utilizado solo tenía la capacidad de medir este gas, excluyendo la posibilidad de evaluar otros tipos de gases contaminantes que podrían estar presentes. Asimismo, es importante señalar que el equipo carecía de un sistema de alerta que pudiera advertir a los usuarios sobre un aumento en los niveles máximos de CO₂.

CRÉDITO LEED	AMBIENTES DE ESTUDIO		
Comodidad térmica	G2-122	G2-130	G2-142
<u>Intención: Promover la productividad, el confort y el bienestar de los ocupantes brindándole un confort térmico de calidad.</u>			
Opción 1: Norma ASHRAE 55-2010			
<u>Espacios ventilados mecánicamente</u>			
¿Cuenta con un sistema de calefacción que cumpla con los requisitos de la norma ASHRAE?	-	-	-
Opción 2: Normas ISO 7730:2005 y CEN EN 15251:2007			
¿Cuenta con sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado que cumplan con las normativas ISO y CEN?	X	X	X
	X	X	X

<p>¿Cuenta con controles individuales de confort térmico para al menos el 50% de los espacios capaces de controlar la temperatura del aire, velocidad del aire y humedad?</p>		
---	--	--

Tabla 28. Crédito LEED – Comodidad térmica

En la tabla 28 se muestra que, los espacios de estudio no cuentan un sistema de calefacción adecuado y no existe un control individual del confort térmico de al menos el 50% de los espacios, que puedan controlar la temperatura del aire, velocidad y humedad.

CRÉDITO LEED	AMBIENTES DE ESTUDIO		
Encuesta sobre el confort de los ocupantes			
<u>Intención: Evaluar el confort de los ocupantes del edificio</u>	G2-122	G2-130	G2-142
<p>Se ha realizado una encuesta sobre la comodidad de los ocupantes para recopilar respuestas anónimas sobre al menos lo siguiente: acústica, limpieza del edificio, calidad del aire interior, encendido y comodidad térmica (1 encuesta cada 2 años) a fin de mejorar la satisfacción de los usuarios.</p>	X	X	X

Tabla 29. Crédito LEED – Encuesta sobre el confort de los ocupantes

En la tabla 29 se observa que, estos ambientes no han contado con alguna evaluación de encuesta para los usuarios que se encuentran en estas aulas de clase. Sin embargo, como parte de los criterios de la certificación WELL se consideró realizar una encuesta a las personas que se encontraban dentro de estos ambientes de estudio.

4.2.3 Confort del usuario

En esta evaluación nos enfocamos en el confort del usuario, considerando ciertos requerimientos por parte de la certificación WELL, en la tabla 30 se muestra los resultados de las encuestas, en valores porcentuales indicando favoridad o en contrariedad.

Para más detalle de los resultados lo podemos encontrar en el anexo 4, a continuación, se muestran los resultados de la encuesta:

Nº	Concepto	Favor	Contra
1	Diseño adecuado respecto a la ubicación de mobiliarios	82.43%	
2	¿La temperatura del lugar es confortable?	68.24%	
3	¿Siente fatiga o cansancio al momento de realizar sus actividades en dicho espacio?		65.54%
4	¿Siente que la ventilación natural del espacio es adecuada?	52.02%	
5	¿Las ventanas y puertas se encuentran en buen estado para poder abrirlas o cerrarlas?	63.51%	
6	¿Fácil contagiarse de alguna enfermedad respiratoria en el ambiente donde se encuentra?	43.24%	
7	¿Está conforme con la limpieza (Espacio limpio) del espacio donde se encuentra?	85.14%	
8	¿Considera que la cantidad de personas es adecuada para el espacio donde se encuentra o considera que es demasiada?		62.16%
9	¿Considera que existe una alta presencia de humedad en el espacio?		62.84%
10	¿Considera que al tener las ventanas abiertas y puertas, mejorara el confort del ambiente donde se encuentra?	68.25%	
11	¿NO se siente fatiga o cansancio al momento de realizar sus actividades en dicho espacio?	56.08%	
12	¿La temperatura del lugar NO es confortable?		63.51%
13	¿Considera que al tener las ventanas abiertas y puertas, NO mejorara el confort del ambiente donde se encuentra?		53.37%
14	¿Siente que la ventilación natural del espacio NO es adecuada?		62.49%

Tabla 30. Crédito WELL – Encuesta sobre el confort de los ocupantes

Se destaca, a partir de la información presentada en la Tabla 30, que los usuarios experimentan un elevado nivel de confort en los ambientes de estudio. Más del 50% de las personas que estuvieron presentes durante diferentes períodos de medición afirmaron disfrutar de un diseño de mobiliario adecuado, experimentar una temperatura confortable, no experimentar fatiga o cansancio al realizar sus actividades en el espacio de estudio, aseguran que las puertas y ventanas están en buen estado para abrir o cerrar según sea necesario, están satisfechos con la limpieza del

lugar y perciben que la humedad es relativamente normal. Además, consideran que abrir las ventanas y puertas contribuiría a mejorar el confort del ambiente.

Sin embargo, solo el 52.2% siente que el ambiente cuenta con una ventilación adecuada, y un 43.24% afirma que es fácil contagiarse de alguna enfermedad respiratoria en el entorno.

CAPÍTULO V: PROPUESTA DE MEJORA

Es importante mencionar que, respecto a los modelos generados en el capítulo cinco, cuando se tiene la mayor cantidad de personas que son cuarenta y cinco (45) y se mantiene las puertas y ventanas abiertas, los valores de CO₂ no superan los límites admisibles según la ASHRAE; sin embargo, cuando las puertas y ventanas permanecen cerrados, si se supera los valores máximos tales como se muestra en la tabla 31. Además, según la encuesta realizada a los usuarios que se encontraban en las aulas de estudio solo un 52.2% asegura tener una ventilación adecuada.

Parámetros IEQ y umbrales reconocidos internacionalmente para la evaluación de edificios completos			
Parámetro IEQ	Umbral citado	Referencia	Método/Instrumentación
Velocidad del aire	<0.2ms ⁻¹	NABERS	
<u>Temperatura</u>	21-24°C	ASHRAE 55	
<u>Humedad relativa (HR)</u>	30-70%	ASHRAE 55	
<u>Dióxido de carbono (CO₂)</u>	1000 ppm 800ppm	ASHRAE 62 WELL	Graywolf IQ-610 (5 min log)
Monóxido de carbono (CO)	9 ppm	LEED V4/WELL/NABERS	
Ozono (O ₃)*	80 ppb 51 ppb	LEED V4/NEPM/WELL/WHO	
Partículas (PM ₁₀)	50 µg/m ³	LEDD V4/WELL/NABERS	GrayWolf PC-3016A (5 min log)
Partículas finas (PM _{2.5})*	15 µg/m ³	LEED V4/WELL	
Orgánicos volátiles totales	500 µg/m ³	LEDD V4/WELL/NABERS	EPA Compendium Method TO17 (aproximadamente 8 horas a 0.3L/min)
Formaldehído	100 µg/m ³ 33 µg/m ³	NABERS/WHO/WELL	Compendium Method TO11A (aproximadamente 8 horas a 0.2-0.5L/min)

Confort acústico	35-45 dB	NABERS	Cirrus class 1 (según las instrucciones del fabricante)
Iluminación (Lux)	320 lux – h 160 lux - v	AS1680	Testo 545 (según las instrucciones del fabricante)
Para evaluar la calidad del aire y el confort acústico, térmico y de iluminación en todo el edificio Rose Bowl, se requirió un número mínimo de muestras prescrita por NABERS y una metodología de medición acreditada por ISO 17025 (NABERS, 2015). Se realizaron mediciones en todos los tipos principales de espacios que fueron presente en todo el Norte.			

Tabla 31. Límites permisibles de variables

Es fundamental señalar que la medición de CO₂ en los ambientes de estudio se llevó a cabo bajo condiciones controladas, primero con todas las puertas y ventanas cerradas y posteriormente con todas las aberturas completamente abiertas. Los resultados promedio de los niveles de CO₂ obtenidos en un intervalo de 25 minutos se presentan en la Figura 46.

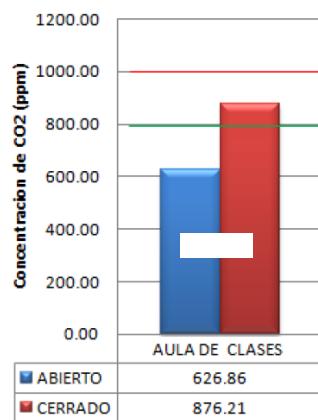


Figura 44. Resultados de CO₂ en escenarios condicionantes.

Como se evidencia en la Figura 45, los niveles de CO₂ superan los límites establecidos, por lo cual se llevarán a cabo propuestas de mejora con el objetivo de reducir la saturación de CO₂.

También se agregarán propuestas relacionadas a la calidad del aire interior y confort del usuario, pues como vemos en las tablas 26, 27, 28 Y 29 existe cierta deficiencia en el cumplimiento de los criterios de sostenibilidad.

5.1 Propuesta de mejora para la saturación del CO₂

Ante la problemática causada por elevados niveles de CO₂ en los ambientes de estudio, se evaluará tres (03) distintas formas de ventilación para los tres (03) casos de estudio.

Primero se evaluará la posibilidad de proponer una ventilación natural a la ya existente, luego una ventilación mecánica y finalmente la unión de estas dos.

Cabe resaltar que el área en planta de los ambientes es 134.24 m² y el área de ventanas y puertas en condición actual es 27.025 m².

5.1.1 Ventilación Natural

Es la ventilación mediante efectos térmicos, del aire exterior, a través de vanos u otras aberturas de la edificación sin utilizar equipos electromecánicos. Según la Norma EM.030 de Instalaciones de ventilación en el apartado 7.1 de Requisitos específicos para el diseño de sistemas de ventilación mecánica “Todos los ambientes habitualmente usados por seres humanos serán dotados de ventilación por medio de ventanas con un área libre de ventilación no menor a un veinteavo (1/20) de la superficie del piso de la habitación”, por lo que las 3 áreas de estudio cumplirían el mencionado apartado de la norma, sin embargo, en la práctica no se abre en 100% de las ventanas. El área necesaria para el cumplimiento adecuado de las áreas de ventilación natural sería 6.71 m² que representa la veinteava parte del área en planta (134.24 m²); notamos que las áreas de ventanas y puertas suman 27 m² lo cual superan los 6.71m² requeridos, pero en la práctica estas puertas y ventanas solo se abren un 20% de 27 m² el cual sería 5.4m².

$$6.71 - 5.4 = 1.31 \text{ m}^2 \text{ (Este valor representa el 4.9% de } 27 \text{ m}^2)$$

Finalmente, se recomendaría tener un mínimo de aberturas entre puertas y ventanas del 25% de estas áreas juntas y colocar afiches informativos respecto a ello.

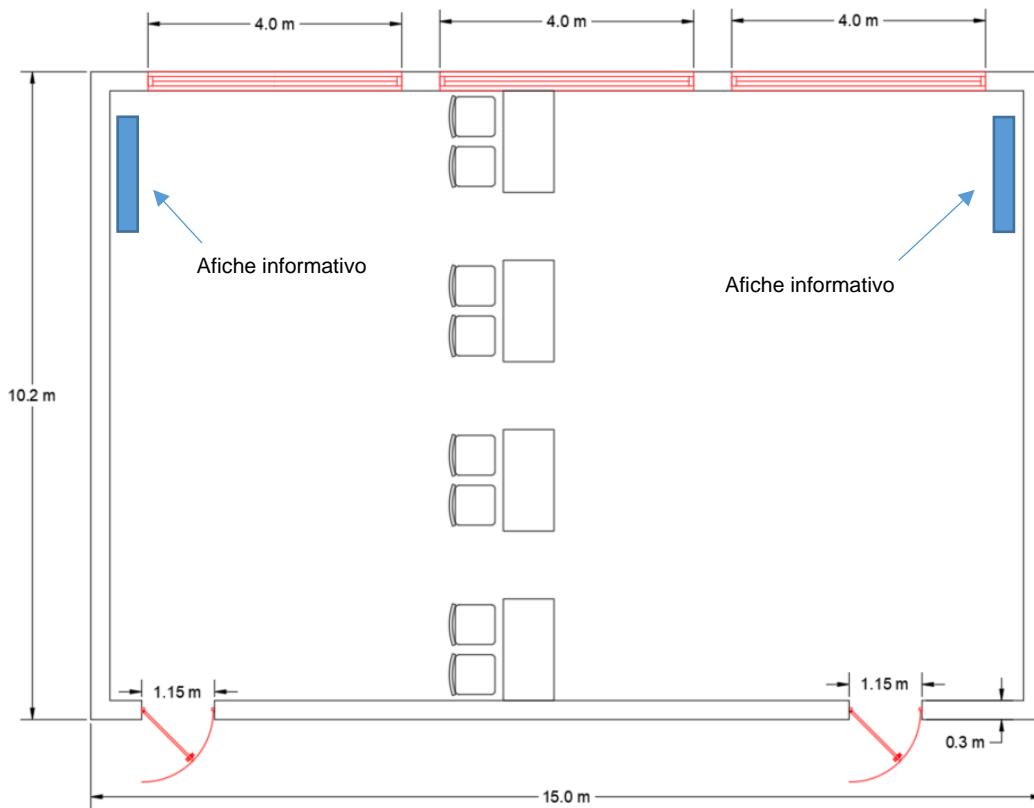


Figura 45. Propuesta de ventilación natural

5.1.2 Ventilación Mecánica

Para el caso de optar por una ventilación mecánica, en primera instancia se debe calcular el requerimiento del aire, que según la ASHRAE se puede calcular de la siguiente manera:

$$V_{bz} = R_p * P_z + R_a * A_z \quad \text{Ec. 63}$$

Donde:

Pz: Cantidad de personas

Az: Área del espacio

De igual manera es importante conocer el uso del espacio de análisis y la cantidad de personas que pueden permanecer en el.

Tabla 6-1: Tasas mínimas de ventilación en la zona de respiración (continuación)
(Esta tabla no es válida de forma aislada; debe utilizarse junto con las notas adjuntas)

Categoria de ocupantes	Tarifa de aire exterior de personas		Tasa de aire exterior del área		Notas	Valores predeterminados		Clase de aire
	ft ³ /m/ u	L/s/ u	ft ³ /m/ u	L/s/ m ²		#/100 m ²	ft ³ /m/ u	
Edificio de oficinas								
<u>Espacio de oficina</u>	5	2.5	0.06	0.3		5	17	8.5
Areas de recepción	5	2.5	0.06	0.3		30	7	3.5
Teléfonos/ entrada de datos	5	2.5	0.06	0.3		60	6	3.0
Vestíbulos de entrada principales	5	2.5	0.06	0.3		10	11	5.5

Tabla 32. Coeficientes de la normativa ASHRAE

Considerando los valores de $R_p = 5 \text{ cfm/person}$, $R_a = \text{cfm/ft}^2$

$P_z = 45 \text{ person}$ y $A_z = 150 \text{ m}^2 = 1614.59 \text{ ft}^2$

El valor de $V_{bz} = 709.38 \text{ cfm}$ (pie cúbico por minuto)

Esto quiere decir que debemos de insertar una ventilación mecánica de una potencia de como mínimo 710 cfm, al considerer un Sistema de ventilación mecánica se generará un consumo energético por ende un costo de energía.

710 cfm es equivalente a 1206.3 m³/h

Para este caso podría emplearse el uso de un ventilador helicoidal tipo murales, modelo HXM- 350 como se aprecia en la figura 46, que cuenta con una capacidad de 1680 m³/h el detalle lo podemos ver en el anexo 5.



Figura 46. Resultados de CO₂ en escenarios condicionantes.

Fuente: Especificación técnica de ventilador (Anexo 5)

Considerando 4 horas diarias de uso de este equipo, el consumo de energía sería 52W (Anexos – Especificación técnica del ventilador) x4h= 208Wxh por un día.

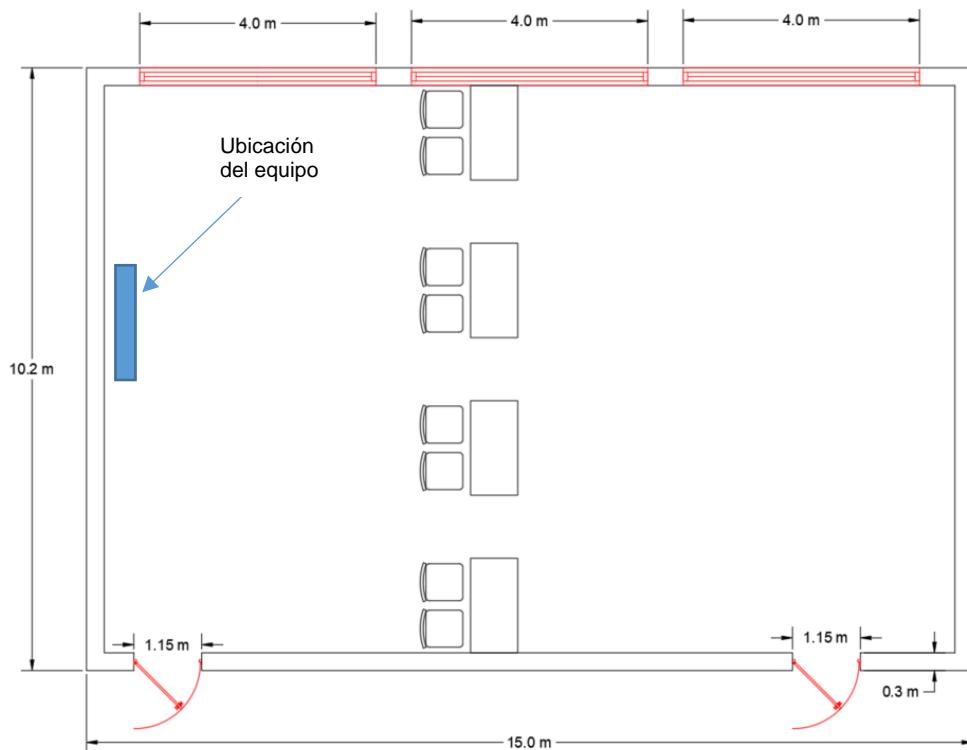


Figura 47. Propuesta de ventilación mecánica.

5.1.3 Ventilación Natural + Mecánica

En caso de unir la ventilación mecánica con la ventilación natural podría proponerse la reducción de la potencia de 710 cfm y reducir así el consumo energético que generaría este y remplazarlo por ventilación natural. En este caso ya no sería necesario los afiches informativos, obteniendo un sistema más autónomo y dependiente únicamente de la ventilación mecánica y natural del espacio de estudio.

5.2 Propuesta de mejora de la calidad del aire interior y confort del usuario

Debido a las deficiencias identificadas en el capítulo de evaluación de criterios de sostenibilidad, particularmente en lo relacionado con la calidad del aire interior, y la ausencia de una encuesta continua en el entorno de estudio que permita monitorear ambos aspectos de evaluación, se propone la implementación de las siguientes recomendaciones dentro de un marco conceptual:

Descripción	Antes (x) / Despues (✓)
Implementar la norma ISO 16814 – Ingeniería del ambiente interior, que proporciona directrices para el diseño y la evaluación de sistemas de climatización y ventilación en edificios, en los ambientes	✓
Implementar filtros de aire para capturar partículas suspendidos en el aire como polvo, polen y otros alérgenos.	✓
Implementar sistemas de calefacción por aire forzado con termostatos programables en las aulas.	✓
Desarrollar encuestas de satisfacción semestralmente para evaluar con confort de los usuarios.	✓

Tabla 33. Propuesta de mejora de la calidad del aire interior y confort del usuario.

CONCLUSIONES

Se propuso treinta y cinco (35) modelos de regresión lineal, de los cuales siete (07) tuvieron un mejor comportamiento de predicción en el cálculo de los valores de CO₂ medidos en campo, con los valores de CO₂ generados por el modelo, estos modelos permitieron estimar los niveles de CO₂ en los ambientes de estudio medidos teniendo en cuenta los criterios certificación sostenible.

Se diseñó un protocolo de medición del CO₂ con el objetivo de mejorar la calidad del aire en los entornos evaluados. Gracias a la recopilación de datos de este protocolo, se logró generar modelos de predicción que están directamente vinculados con la percepción del confort por parte de los usuarios, según revelaron las encuestas realizadas. Estos cuestionarios permitieron identificar deficiencias, como en el sistema de ventilación, donde solo el 55% de los encuestados afirmaron tener una buena ventilación, y el 43% aseguró que es fácil contagiarse de alguna enfermedad respiratoria.

Se crearon y compararon modelos de regresión, revelando que, en ambientes con aberturas abiertas, no se observaría riesgo de incumplimiento de los criterios de certificación sostenible. Sin embargo, en un escenario hipotético donde las aberturas estuvieran completamente cerradas, se superarían los valores mínimos establecidos por las normativas y certificaciones correspondientes

En caso de niveles de CO₂ superiores a los mínimos recomendados por certificaciones sostenibles, se propuso la intervención del espacio, concientizando mediante afiches informativos el aumento de las aberturas a un 25% y no el 20% que normalmente suele estar y para el caso de el uso de una ventilación mecánica, se propuso emplear equipos con una potencia mínima de 710 cfm. Sin embargo, también es factible la unión de estas mejoras de ventilación ya que ayudaría a reducir el consumo energético de la ventilación mecánica y obtener un sistema autónomo que no dependa de las personas que se encuentran en las aulas de estudio.

Con el objetivo de cumplir con ciertos criterios de certificación sostenible, específicamente relacionados con la calidad del aire interior y el confort del usuario, se propuso la implementación de nuevas estrategias de control. Estas estrategias se alinean con las normativas de ventilación, incluyendo la utilización de filtros de aire para prevenir la presencia de partículas peligrosas suspendidas y reducir el riesgo de contagio en enfermedades respiratorias. En lo que respecta al confort, se sugiere la implementación de un sistema de calefacción, además de la realización de encuestas semestrales para evaluar la satisfacción del usuario.

Es posible encontrar una correlación confiable para cada ambiente de estudio, ya que las condiciones de entorno, variación de personas, % de aberturas son diferentes en cada caso, eso se demuestra con los valores de R² ajustados obtenidos para cada ambiente se presenta en promedio un valor de 0.88 y un error promedio de 38. Sin embargo, al unir los datos de los tres ambientes se puede observar una disminución del valor de R² ajustado y un aumento del error.

Las variables de temperatura y humedad no se insertaron al modelo debido a que fueron constantes en su gran mayoría, esto fue debido a que las mediciones se realizaron en el mes de enero, es importante mencionar que los rangos de temperatura y humedad relativa se encontraban en los límites permisibles según certificaciones sostenibles.

La metodología empleada no ayudó a estimar los puntajes solicitados por los lineamientos de certificación sostenible debido a que estos lineamientos abarcan diferentes criterios de análisis que no se han tocado en esta investigación. Sin embargo, si ayuda a la mejora a algunos lineamientos propuestos en las certificaciones mencionadas.

RECOMENDACIONES

Debido a que la investigación posee carácter “Exploratorio” por la reducida muestra evaluada, se recomienda incrementar la muestra de aulas universitarias de diferentes zonas de Lima, con el fin de poder validar las sugerencias de afirmaciones planteadas dentro de las conclusiones.

El análisis de esta investigación, no solamente se puede realizar a aulas universitarias, también pueden analizarse a otro tipo de estructuras, como edificios de oficina, restaurantes, gimnasios. Por ello, se recomienda que en futuras investigaciones se adapten o creen modelos de certificaciones para ello.

Como estudio inicial, se ha analizado únicamente aulas universitarias en la ciudad de Lima, por lo que se recomienda expandir el análisis alrededor del país, adaptando indicadores de la forma necesaria.

Con fines de reducir el alcance de la investigación, existen algunos parámetros que no han sido evaluados. Así, deberán ser evaluados en futuros trabajos (Por ejemplo, velocidad del aire, gases tóxicos aparte del CO₂)

Las mediciones obtenidas se dieron en épocas de verano, este generó ciertas condiciones en cuanto a los porcentajes de aberturas de las puertas y ventanas, se recomienda analizar nueva data en otra época del año y generar nuevos modelos para ver si guardan relación con los generados en esta investigación.

Respecto a las propuestas de mejoras en relación con la implementación de ventilación natural y mecánica, se ha implementado en un marco conceptual, se recomendaría implementar estas mejoras con un mejor detalle en el cálculo y planteamiento de solución, considerando quizás la posibilidad de insertar nuevas variables que pueden potenciar el modelo.

Se recomienda considerar el grado de carbonatación como variable relevante en investigaciones futuras de ingeniería civil, dado su impacto en la vida útil de las estructuras. Factores como la concentración de CO₂, la humedad y la temperatura influyen en este proceso. Comprender cómo la carbonatación afecta la durabilidad de las estructuras puede mejorar

prácticas de diseño y mantenimiento. Se sugiere explorar esta variable en estudios posteriores para enriquecer la comprensión de los factores que afectan la integridad estructural a largo plazo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- LaDext (2018, mayo). *INTELIGENCIA ARTIFICIAL.* Adatex.com <https://blog.adext.com/es/machine-learning-guia-completa>
- Somsen, G. A., van Rijn, C., Kooij, S., Bem, R. A., & Bonn, D. (2020). Small droplet aerosols in poorly ventilated spaces and SARS-CoV-2 transmission. *The Lancet Respiratory Medicine*, 8(7), 658-659. [https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(20\)30245-9](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(20)30245-9)
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2013). *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality - Informative appendix: Rationale for minimum physiological requirements for respiration air based on CO₂ concentration* (ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2013). ASHRAE.
- Carrasquilla, A., Chacón, A., Núñez, K., Gómez, O., Valverde, J., & Guerrero, M. (2016). Regresión lineal simple y múltiple: aplicación en la predicción de variables naturales relacionadas con el crecimiento microalgal. *Revista Tecnología en Marcha*, 29(3), 33-45. <https://doi.org/10.18845/tm.v29i8.2983>
- Europa Press. (2020, octubre). 84% del tiempo lectivo en condiciones de aulas no son adecuadas: temperatura, humedad, CO₂, según estudio. Europapress.es. <https://www.europapress.es/sociedad/educacion-00468/noticia-84-tiempo-lectivo-condiciones-aulas-no-son-adecuadas-temperatura-humedad-co2-estudio-20201015144148.html>
- Fan, G., Xie, J., & Liu, J. (2017). Indoor air quality in a naturally ventilated research student office in Chinese universities during heating period. *Procedia Engineering*, 205(2), 1272–1278. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.377>
- Ferreira, A. M. C., & Cardoso, S. M. (2013). Exploratory study of air quality in elementary schools, Coimbra, Portugal. *Revista de Saúde Pública*, 47(1), 1059-1068. <https://doi.org/10.1590/S0034-8910.2013047004810>
- Khan, D. S., Kolarik, J., & Weitzmann, P. (2021). Application of an occupant voting system for continuous occupant feedback on thermal and indoor air quality—Case studies in office spaces. *Energy and Buildings*, 251(4), 111-363. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111363>
- Langer, S., Bekö, G., Bloom, E., Widheden, A., & Ekberg, L. (2015). Indoor air quality in passive and conventional new houses in Sweden. *Building and Environment*, 93(6), 92-100. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.004>

- Muñoz P. (2017, julio). *Qué es la Certificación WELL y cómo tu edificio puede aportar salud y bienestar.* Evalore. <https://evalore.es/que-es-la-certificacion-well>
- Muñoz, J., & Amón, I. (2013). Técnicas para detección de outliers multivariantes. *Revista en Telecomunicaciones e Informática*, 3(2), 11-25. <http://hdl.handle.net/20.500.11912/6582>
- Park, J., Loftness, V., Aziz, A., & Wang, T. H. (2019). Critical factors and thresholds for user satisfaction on air quality in office environments. *Building and Environment*, 164(5), 106-310. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106310>
- Peña, D., Rodríguez, J., Salcedo, D., & Suarez Pereira, M. (2022). Estimation of damage caused by carbonation in reinforced concrete structures in Nirgua city. *Gaceta Técnica*, 23(2), 88-106. <https://doi.org/10.51372/gacetatecnica232.7>
- Perú Green Building Council. (2016, diciembre). *Certificaciones.* GBCPE.org. <https://gbcpe.org/site/certificaciones>
- Quispe Izquierdo, A. O. (2020). *Calidad de aire en interiores por dióxido de carbono y su relación con la ventilación de las oficinas de la Municipalidad Provincial de Tocache* [Tesis de pregrado, Universidad Peruana Unión]. Repositorio Institucional UPEU. <http://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/4235>.
- Regalado Espinoza, M. S. (2021). *Simulación de la calidad del aire interior en edificios de vivienda en Lima mediante modelos a escala reducida* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/22228>
- Rudnick, S., & Milton, D. (2003). Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration. *Indoor Air*, 2(3), 237-245. [10.1034/j.1600-0668.2003.00189.x](https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2003.00189.x)
- United States Greem Building Council. (2009). LEED AP Building Design and Construction Study Guide. (ISBN: 978-1-932444-26-1). USGC
- U.S. Green Building Council. (2018, enero). *LEED v4 for Building Operations and Maintenance.* USGC. <https://www.usgbc.org/resources/leed-v4-building-operations-and-maintenance-current-version>

- Zhai, Y., Zhang, Y., Zhang, H., Pasut, W., Arens, E. y Meng, Q. (2015). Human comfort and perceived air quality in warm and humid environments with ceiling fans. *Building and Environment*, 90(3), 178-185.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.003>
- Zhao, W., Kilpeläinen, S., Kosonen, R., Jokisalo, J., Lestinen, S., Wu, Y., & Mustakallio, P. (2021). Human response to thermal environment and perceived air quality in an office with individually controlled convective and radiant cooling systems. *Building and Environment*, 195, 107736.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107736>

ANEXOS

ANEXO 01: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL EQUIPO.....	110
ANEXO 02: CERTIFICADOS DE CALIBRACIÓN	111
ANEXO 03: MODELOS DE REGRESIÓN.....	112
ANEXO 04: ENCUESTA DEL CONFORT DE USUARIO Y JUICIO DE EXPERTOS	113
ANEXO 05: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL VENTILADOR	114

**ANEXO 01:
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL EQUIPO**

Medidor de Particulado PM2.5 CO₂ - Presión Atmosférica TEMP. y %HR PM-1064SD

Medidor de material particulado en el aire, permite medir en tiempo real variadas condiciones en ambientes interiores. Es utilizado en industria petroquímica, planta de fabricación de acero, planta de energía térmica, restaurante, plantas de quema, estacionamientos de automóviles, entre otras aplicaciones.

CARACTERÍSTICAS:

- PM2,5: 0 a 250 ug/m³
- Humedad: 5 a 95% HR.
- Temperatura: 0 a 50 °C
- CO₂: 0 a 4.000 ppm, máx. 6000 ppm.
- Barómetro: 10 a 1100 hPa, mmHg, inHg.
- PM2.5 tiempo promedio ponderado de lectura.
- Los datos se mantienen, grabado de (Max, Min).
- Ajuste de alarma con la salida de sonido beeper.
- Índice de salud (0 - 9) detección y alarma.
- Posee reloj y calendario integrado, registro de datos en tiempo real con tarjeta de memoria SD, el tiempo de muestreo se puede establecer de 2 a 3600 segundos. Simplemente inserte la tarjeta SD en el ordenador, todos los valores medidos con la información de tiempo (año, mes, datos, hora, minuto, segundo) se puede descargar directamente a Excel, el usuario puede hacer el análisis de datos por sí mismos.
- Pantalla LCD
- Alimentación por baterías UM3 / AA (1.5V) x 6 o adaptador de 9V DC.
- Interfaz a la computadora RS232 / USB.



ESPECIFICACIONES:



PM2.5	Range	0 to 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Resolution	1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Accuracy	$\pm(10\% \text{ reading} + 15\mu\text{g}/\text{m}^3)$



Humidity	Range	5 % to 95 % R.H.
	Resolution	0.1 % R.H.
	Accuracy	$\geq 70\% \text{ RH} :$ $\pm(3\% \text{ reading} + 1\% \text{ RH}).$ $< 70\% \text{ RH} :$ $\pm 3\% \text{ RH}.$



Temperature	Range	0 °C to 50 °C, 32 °F to 122 °F.				
	Resolution	0.1 degree				
	Accuracy	<table border="1"> <tr> <td>°C</td> <td>$\pm 0.8 \text{ °C}$</td> </tr> <tr> <td>°F</td> <td>$\pm 1.5 \text{ °F}$.</td> </tr> </table>	°C	$\pm 0.8 \text{ °C}$	°F	$\pm 1.5 \text{ °F}$.
°C	$\pm 0.8 \text{ °C}$					
°F	$\pm 1.5 \text{ °F}$.					

**ANEXO 02:
CERTIFICADOS DE CALIBRACIÓN**

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

Laboratorio de Análisis - Químico

N° DE CERTIFICADO

MT - 2486 - 2020

Página : 1 de 2

EXPEDIENTE : EXP - 2087AT1 - 2020

SOLICITANTE : UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA UNI

Dirección : Av. Tupac Amaru Nro. 210 Lima - Lima - Rímac

INSTRUMENTO DE MEDICIÓN : MONITOR Y REGISTRADOR DE CALIDAD DEL AIRE

Marca : LUTRÓN
Modelo : PM-1064SD
Nº de Serie : AJ.71521
Código de Identificación : No Indica
Procedencia : Taiwán
Ubicación : No Indica

FECHA Y LUGAR DE CALIBRACIÓN

Fecha de Calibración : 2020-10-30
Fecha de emisión : 2020-10-31
Lugar de calibración : Laboratorio de **METRINDUST S.A.C.**

MÉTODO DE CALIBRACIÓN

La calibración se realizó por comparación directa, según Procedimiento del fabricante utilizando gases patrones trazables N.I.S.T

METRINDUST S.A.C. Departamento de Metrología realiza calibraciones y certificaciones metrológicas según procedimientos de calibración validados o normalizados.

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales o internacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Con el fin de asegurar la calidad de sus mediciones se le recomienda al cliente recalibrar sus instrumentos y equipos a intervalos apropiados de acuerdo al uso, conservación y mantenimiento.

Los resultados no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Este certificado de calibración solo puede ser difundido completamente y sin modificaciones. Los extractos o modificaciones requieren la autorización del Departamento de Metrología de METRINDUST S.A.C.

REVISADO:



FIRMA DIGITAL

Dennis Gamarra Rodríguez

Gerente Técnico

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DE ESTE DOCUMENTO SIN AUTORIZACIÓN ESCRITA DE METRINDUST S.A.C.

Calle Los Jazmines Mz. G LT. 13 Coo. Talavera De La Reyna – El Agustino, Lima – Perú

Celular: 915972598 / 917607794 / 925033922 - Email: informes@metrindust.com.pe

www.metrindust.com.pe

Certificado : MT - 2486 - 2020
 Página : 2 de 2

CONDICIONES AMBIENTALES

Magnitud	Inicial	Final
Temperatura	23,0 °C	23,0 °C
Humedad Relativa	84 %hr	84 %hr

TRAZABILIDAD

Gas Patrón	Patrón de Trabajo	Nº de Lote
CO2	GAS.CAL.(CO2) 2,50 % ppm	1864998
Oxígeno	O2 20.80 % Vol	1047653
ELICROM	BAROTHERMOHIGROMETRO	CCP-0198-001-20
INACAL - DM	Termómetro digital con incertidumbres de 0,013 °C al 0,33 °C	LT - 084 - 2020

RESULTADOS DE MEDICIÓN

Sensor	Valor Nominal	Valor Medido	Desviación	Incertidumbre
CO2	5000 ppm	4900 ppm	100 ppm	2,00 ppm

Para el sensor de temperatura

INDICACIÓN DEL TERMÓMETRO (°C)	TEMPERATURA CONVENCIONALMENTE VERDADERA (°C)	CORRECCIÓN (°C)	INCERTIDUMBRE (°C)
21,7	21,60	-0,10	0,02

Temperatura Convencionalmente Verdadera = Indicación del termómetro + corrección

Para el sensor de humedad (%hr)

INDICACIÓN DEL HIGRÓMETRO (% hr)	HUMEDAD CONVENCIONALMENTE VERDADERA (% hr)	CORRECCIÓN (% hr)	INCERTIDUMBRE (% hr)
67,2	68,6	1,4	3,0

Humedad Convencionalmente Verdadera = Indicación del Higrómetro + corrección

OBSERVACIONES

Con fines de identificación de la calibración se coloco una etiqueta autoadhesiva (CALIBRADO).

INCERTIDUMBRE

La incertidumbre expandida de medida se ha obtenido multiplicando la incertidumbre típica de medición por el factor de cobertura k=2 que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95%.

**** FIN DEL DOCUMENTO ****
PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DE ESTE DOCUMENTO SIN AUTORIZACIÓN ESCRITA DE METRINDUST S.A.C.

ANALYSIS CERTIFICATION

METHOD OF PREPARATION : GRAVIMETRIC / PRESSURE TRANSFILLING

METHOD OF ANALYSIS : PARAMAGNETIC OXYGEN CELL

ACCURACY : ± 1% RELATIVE

MSA P/N	LOT NO. & QTY.	COMP. 1 O ₂	COMP. 2 N ₂	COMP. 3	COMP. 4	COMP. 5	COMP. 6	Exp Date
479857	1047653 (7)	20.80%	BALANCE					12/15/23

(This lot contains 0.1% He)

Gas mixtures manufactured with balances calibrated by an ISO 17025 accredited Company using NIST traceable weights and meets or exceeds the requirements of NIST Handbook 44.

Calibration test 72053, 72057, 72059, or 72062 dated, 3rd January 2018 applies.

WEIGHT SETS USED: Kit# 92231, Test# 2565058, Kit# 03610, Test# VA-18-107690 T3 Test# VA-17-10760B

No affecting environmental conditions during analysis.

REQUESTED BY : MSA PERU SAC

CUSTOMER PURCHASE ORDER NUMBER : 4502440609

PACKING LIST NUMBER : 11109284

CERTIFICATION DATE : December 15, 2018

ANALYSIS BY : Robert Watson
Quality Representative

"We certify that all the cylinders for the Lot numbers identified herein are manufactured and tested within the requirements of CFR 49 part 178.65 and that physical and chemical test reports are on file and copies will be furnished upon request."

CALGAZ, a division of Airgas USA LLC
821 Chesapeake Drive, Cambridge, MD 21613-0149
Phone: (410) 228-6400 Fax: (410) 228-4251

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN No: CCP-0198-001-20



ELICROM



IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE						
NOMBRE:	METRINDUST S.A.C.					
DIRECCIÓN:	CALLOS JAZMINES MZA. G LOTE. 13 COO. TALAVERA DE LA REYNA (3ER PISO - POSTERIOR) LIMA - LIMA - EL AGUSTINO					
TELÉFONO:	935 236 207					
PERSONA(S) DE CONTACTO:	DENNIS GAMARRA RODRÍGUEZ					
IDENTIFICACIÓN DEL ÍTEM DE CALIBRACIÓN						
ÍTEM:	BAROTERMOHIGROMETRO	UNIDAD DE MEDIDA (TEMPERATURA):	°C			
MARCA:	LT LUTRON	RESOLUCIÓN (TEMPERATURA):	0,1			
MODELO:	PHB-318	INTERVALO DE MEDIDA (TEMPERATURA):	(0 a 50)°C			
SERIE:	AI.32999	UNIDAD DE MEDIDA (HUMEDAD):	%HR			
CÓDIGO :	BTH-01	RESOLUCIÓN (HUMEDAD):	0,1			
UBICACIÓN:	NO ESPECIFICA	INTERVALO DE MEDIDA (HUMEDAD):	(10 a 95)%HR			
EQUIPAMIENTO UTILIZADO						
CÓDIGO	NOMBRE	MARCA	MODELO	SERIE	FECHA CAL.	VENCE CAL..
ELP.PC.024	TERMOHIGROMETRO PATRÓN	VAISALA	MI70 / HMP76B	P1720040 / P2130016	2018-05-24	2020-09-24
ELP.PT.040	CAMARA CLIMATICA	KAMBIČ	KK-105 CHLT	18085878	2019-09-02	2020-09-02
ELP.PT.059	BAROMETRO	CONTROL COMPANY	6530	181821642	2018-12-18	2020-12-18
ELP.PT.036	TERMOHIGROMETRO	CENTER	342	180303334	2019-08-27	2020-08-27
DECLARACIÓN DE TRAZABILIDAD METROLÓGICA						
Los resultados de calibración contenidos en este certificado son trazables al Sistema Internacional de Unidades (SI) por medio de una cadena ininterrumpida de calibraciones a través del NIST (National Institute of Standards and Technology - Estados Unidos) o de otros Institutos Nacionales de Metrología (INMs).						
CALIBRACIÓN						
MÉTODO:	COMPARACIÓN DIRECTA CON TERMOHIGROMETRO PATRÓN Y CÁMARA DE ESTABILIDAD					
DOCUMENTO DE REFERENCIA:	CEM TH-007:2008 (EDICIÓN DIGITAL 1)					
PROCEDIMIENTO:	PEC.ELP.04					
LUGAR DE CALIBRACIÓN:	LABORATORIO 1 (ELICROM)					
TEMPERATURA AMBIENTAL MEDIA:	20,9 °C	±0,0 °C				
HUMEDAD RELATIVA MEDIA:	56,3 %HR	±0,4 %HR				
PRESIÓN ATMOSFÉRICA MEDIA:	1007 hPa	±0 hPa				
RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN EN TEMPERATURA						
Nominal	Lectura ítem	Lectura Patrón	Error de Medición	Incertidumbre	Factor de Cobertura (k)	
°C	°C	°C	°C	°C		
15	15,0	15,05	-0,05	0,90	2,00	
25	25,1	25,04	0,06	0,67	2,00	
40	40,1	40,08	0,02	0,67	2,00	
RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN EN HUMEDAD RELATIVA						
Nominal	Lectura ítem	Lectura Patrón	Error de Medición	Incertidumbre	Factor de Cobertura (k)	
%HR	%HR	%HR	%HR	%HR		
30	31,1	29,95	1,15	2,2	2,00	
60	60,8	59,94	0,86	2,2	2,00	
90	89,1	89,98	-0,88	2,7	2,00	
OBSERVACIONES						
La incertidumbre reportada en el presente certificado es la incertidumbre expandida de medición (intervalo de confianza), la cual se evaluó con base en el documento JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections) "Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement", multiplicando la incertidumbre típica combinada por el factor de cobertura <i>k</i> , que para una distribución t (de Student) corresponde a un nivel de confianza de aproximadamente el 95,45%. Este certificado no podrá reproducirse excepto en su totalidad sin la aprobación escrita del laboratorio Elicrom-Calibración. Los resultados contenidos en este certificado son válidos únicamente para el ítem aquí descrito, en el momento y bajo las condiciones en que se realizó la calibración.						
NOTA: La lectura del patrón y el error de medición (mejor estimación del valor verdadero) se muestran con la misma cantidad de decimales que la resolución del patrón empleado.						
CALIBRACIÓN REALIZADA POR:	Fidel Pinaud					
FECHA DE RECEPCIÓN DEL ÍTEM:	2020-06-15					
FECHA DE CALIBRACIÓN:	2020-06-16					
						FECHA DE EMISIÓN: 2020-06-16



Autentificación de certificado

Autorizado y firmado electronicamente por:

Gerente general - Autorización PE270319SP



Sustento legal de firma electrónica



Certificado de Calibración

LT - 084 - 2020

Laboratorio de Termometría

Página 1 de 4

Expediente	1038539
Solicitante	METRINDUST S.A.C.
Dirección	Calle Los Jazmines Mz. G. Lt. 13 Coo. Talavera De La Reina
Instrumento de Medición	TERMOMETRO DE INDICACION DIGITAL
Intervalo de Indicación	-196 °C a 500 °C
Resolución	0,01 °C; 0,1 °C (*)
Marca	DELTA OHM
Modelo	HD 2127.1 (Para el indicador); TP472 I (Para los sensores)
Procedencia	ITALIA
Número de Serie	16028475 (Para el indicador); 16015435 (Para el sensor TH-04); 16017511 (Para el sensor TH-05)
Elemento Sensor	Una Termorresistencia de platino de 100 Ω
Fecha de Calibración	2020-03-10 al 2020-03-12

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI)

La Dirección de Metrología custodia, conserva y mantiene los patrones nacionales de las unidades de medida, calibra patrones secundarios, realiza mediciones y certificaciones metrológicas a solicitud de los interesados, promueve el desarrollo de la metrología en el país y contribuye a la difusión del Sistema Legal de Unidades de Medida del Perú. (SLUMP).

La Dirección de Metrología es miembro del Sistema Interamericano de Metrología (SIM) y participa activamente en las Intercomparaciones que éste realiza en la región.

Con el fin de asegurar la calidad de sus mediciones el usuario está obligado a recalibrar sus instrumentos a intervalos apropiados.

Este certificado de calibración sólo puede ser difundido completamente y sin modificaciones. Los extractos o modificaciones requieren la autorización de la Dirección de Metrología del INACAL.
Certificados sin firma digital y sello carecen de validez.

Responsable del área

Responsable del laboratorio



Firmado digitalmente por
QUISPE CUSIPUMA Billy
Berino FAU 20600283015 soft
Fecha: 2020-03-13 16:19:59



Firmado digitalmente por
CALZADO CANTENO Joan Manuel
FAU 20600283015 soft
Fecha: 2020-03-13 09:51:06

Dirección de Metrología

Dirección de Metrología



INACAL

Instituto Nacional
de Calidad

Metrología

Laboratorio de Termometría

Certificado de Calibración

LT – 084 – 2020

Página 2 de 4

Método de Calibración

Calibración por comparación siguiendo el procedimiento INDECOPI-SNM PC-017 "Procedimiento para la Calibración de Termómetros Digitales" (2da Edición Diciembre 2012)

Lugar de Calibración

Laboratorio de Termometría
Calle De la Prosa N° 150, San Borja - Lima

Condiciones Ambientales

Temperatura	22 °C ± 2 °C
Humedad Relativa	63 % ± 5 %

Patrones de referencia

Trazabilidad	Patrón utilizado	Certificado de calibración
Patrones de referencia de la Dirección de Metrología	Dos termómetros digitales de 0,001 °C de resolución con termoresistencias de platino con incertidumbres del orden desde 0,012 °C hasta 0,040 °C	LT-009-2020 Enero 2020
		LT-010-2020 Enero 2020
Patrones primarios del NRC-Canadá	2 Termoresistencias de Platino de 25 ohm con Incertidumbres del orden desde 0,2 mK hasta 0,8 mK	THY-2016-46 Mayo 2016
		THY-2016-47 Mayo 2016
Patrones primarios del NIST-Estados Unidos	Puente termométrico de resistencias con incertidumbre del orden de $0,073 \times 10^{-6}$	685/290240-17 Septiembre 2017

Observaciones

Con fines de identificación se ha colocado una etiqueta autoadhesiva de la Dirección de Metrología - INACAL.

(*) La resolución de la pantalla es de 0,01 °C entre -199,99 °C hasta 199,99 °C .Fuera de este alcance la resolución es de 0,1 °C ; para el indicador.

Las temperaturas convencionalmente verdaderas mostradas en los resultados de medición son las de la Escala Internacional de Temperatura de 1990 (International Temperature Scale ITS-90).



INACAL

Instituto Nacional
de Calidad

Metrología

Laboratorio de Termometría

Certificado de Calibración

LT – 084 – 2020

Página 3 de 4

Resultados de Medición

Para el sensor TH-04 (Canal A)

INDICACIÓN DEL TERMÓMETRO (°C)	TEMPERATURA CONVENCIONALMENTE VERDADERA (°C)	CORRECCIÓN (°C)	INCERTIDUMBRE (°C)
-30,08	-30,034	0,046	0,042
0,00	0,000	0,000	0,013
99,98	99,960	-0,020	0,048
199,92	199,984	0,064	0,050
299,1	299,56	0,46	0,33

Para el sensor TH-05 (Canal B)

INDICACIÓN DEL TERMÓMETRO (°C)	TEMPERATURA CONVENCIONALMENTE VERDADERA (°C)	CORRECCIÓN (°C)	INCERTIDUMBRE (°C)
-30,08	-30,034	0,046	0,042
-0,01	0,000	0,010	0,013
99,94	99,960	0,020	0,048
199,90	199,984	0,084	0,050
299,1	299,56	0,46	0,33

La temperatura convencionalmente verdadera (TCV) resulta de la relación:

TCV = Indicación del termómetro + corrección

Nota 1.- La profundidad de inmersión del sensor fue de 25 cm aproximadamente .

Nota 2.- Tiempo de estabilización no menor a 10 minutos .



INACAL

Instituto Nacional
de Calidad

Metrología

Laboratorio de Termometría

Certificado de Calibración

LT – 084 – 2020

Página 4 de 4

Incertidumbre

La incertidumbre reportada en el presente certificado es la incertidumbre expandida de medición que resulta de multiplicar la incertidumbre estándar combinada por el factor de cobertura $k=2$. La incertidumbre fue determinada según la "Guía para la Expresión de la Incertidumbre en la Medición", segunda edición, julio del 2001 (Traducción al castellano efectuada por Indecopi, con autorización de ISO, de la GUM, "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement", corrected and reprinted in 1995, equivalente a la publicación del BIPM JCGM:100 2008, GUM 1995 with minor corrections "Evaluation of Measurement Data - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement").

La incertidumbre expandida de medición fue calculada a partir de los componentes de incertidumbre de los factores de influencia en la calibración. La incertidumbre indicada no incluye una estimación de variaciones a largo plazo.

Recalibración

Los resultados son válidos en el momento de la calibración. Al solicitante le corresponde disponer en su momento la ejecución de una recalibración, la cual está en función del uso, conservación y mantenimiento del instrumento de medición o a reglamentaciones vigentes.

DIRECCION DE METROLOGIA

El Servicio Nacional de Metroología (actualmente la Dirección de Metroología del INACAL), fue creado mediante Ley N° 23560 el 6 enero de 1983 y fue encomendado al INDECOPI mediante Decreto Supremo DS-024-93 ITINCI.

El 11 de julio 2014 fue aprobada la Ley N° 30224 la cual crea el Sistema Nacional de Calidad, y tiene como objetivo promover y garantizar el cumplimiento de la Política Nacional de Calidad para el desarrollo y la competitividad de las actividades económicas y la protección del consumidor.

El Instituto Nacional de Calidad (INACAL) es un organismo público técnico especializado adscrito al Ministerio de Producción, es el cuerpo rector y autoridad técnica máxima en la normativa del Sistema Nacional de la Calidad y el responsable de la operación del sistema bajo las disposiciones de la ley, y tiene en el ámbito de sus competencias: Metrología, Normalización y Acreditación.

La Dirección de Metroología del INACAL cuenta con diversos Laboratorios Metrológicos debidamente acondicionados, instrumentos de medición de alta exactitud y personal calificado. Cuenta con un Sistema de Gestión de la Calidad que cumple con las siguientes Normas internacionales vigentes ISO/IEC 17025; ISO 17034; ISO 27001 e ISO 37001; con lo cual se constituye en una entidad capaz de brindar un servicio integral, confiable y eficaz de aseguramiento metrológico para la industria, la ciencia y el comercio brindando trazabilidad metrológicamente válida al Sistema Internacional de Unidades SI y al Sistema Legal de Unidades de Medida del Perú (SLUMP).

La Dirección de Metroología del INACAL cuenta con la cooperación técnica de organismos metrológicos internacionales de alto prestigio tales como: el Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) de Alemania; el Centro Nacional de Metrología (CENAM) de México; el National Institute of Standards and Technology (NIST) de USA; el Centro Español de Metrología (CEM) de España; el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) de Argentina; el Instituto Nacional de Metrología (INMETRO) de Brasil; entre otros.

SISTEMA INTERAMERICANO DE METROLOGIA- SIM

El Sistema Interamericano de Metrología (SIM) es una organización regional auspiciado por la Organización de Estados Americanos (OEA), cuya finalidad es promover y fomentar el desarrollo de la metrología en los países americanos. La Dirección de Metroología del INACAL es miembro del SIM a través de la subregión ANDIMET (Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela) y participa activamente en las Intercomparaciones realizadas por el SIM.

ANALYSIS CERTIFICATION

METHOD OF PREPARATION : GRAVIMETRIC / PRESSURE TRANSFILLING

METHOD OF ANALYSIS : GC(FID)

ACCURACY : ± 2% RELATIVE

MSA P/N	LOT NO. & QTY.	COMP. 1 CO ₂	COMP. 2 AIR	COMP. 3	COMP. 4	COMP. 5	COMP. 6	Exp Date
------------	-------------------	----------------------------	----------------	---------	---------	---------	---------	----------

479265	1864998(31)	2.50%	BALANCE					10/01/22
--------	-------------	-------	---------	--	--	--	--	----------

(This lot contains 0.1% He)

Gas mixtures manufactured with balances calibrated by an ISO 17025 accredited company using NIST traceable weights and meets or exceeds the requirements of NIST Handbook 44.

Calibration test CG/01/03/17/MC01, CG/01/03/17/MC02, CG/01/03/17/MC03, or CG/01/03/17/MC04 dated, 3rd January 2017 applies.

N.I.S.T. WEIGHT SET TEST NUMBERS: Kit# 92231, Test# 2403472, Kit# 03610, Test# VA-16-10240F, T3 Test# VA-16-10240B

No affecting environmental conditions during analysis.

REQUESTED BY : MSA PERU SAC

CUSTOMER PURCHASE ORDER NUMBER : 4502259575

PACKING LIST NUMBER : 8640626

CERTIFICATION DATE : December 29, 2017

ANALYSIS BY :

Jim English
Quality Representative

"We certify that all the cylinders for the Lot numbers identified herein are manufactured and tested within the requirements of CFR 49 part 178.65 and that physical and chemical test reports are on file and copies will be furnished upon request."

CALGAZ, a division of Airgas USA LLC
821 Chesapeake Drive, Cambridge, MD 21613-0149
Phone: (410)228-6400 Fax: (410)228-4251

ANEXO 03: MODELOS DE REGRESIÓN

Anexo 3.1: Modelos de regresión G2-122

Anexo 3.2: Modelos de regresión G2-130

Anexo 3.3: Modelos de regresión G2-142

Anexo 3.4: Modelos de regresión unión

Anexo 3.1: MODELOS DE REGRESIÓN G2-122

1.1 SALÓN G2-122



Figura 1. Fotografía de campo del salón G2-122

Fuente: Propia

1.1.1 Modelos de regresión inicial (G2-122)

Para la elaboración de estos modelos, se consideró la cantidad de CO₂ como un valor promedio de los datos obtenidos en los horarios y días establecidos, para que posteriormente sean correlacionados con la cantidad de personas que permanecían en el espacio y el porcentaje deertura de las puertas y ventanas que generaban una variación en cuanto a la cantidad de CO₂ establecida.

Como se podrá observar en la figura 2, se muestra una buena correlación entre la cantidad de CO₂ y el número de personas registradas en los diferentes horarios de medición.

REGISTRO				
Día	Horario	Ítem	CO ₂ promedio	# personas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	450	11
	2:00 - 4:00	2	490	16
	6:00 - 8:00	3	610	30
4/01/2023	10:00 - 12:00	4	630	32
	2:00 - 4:00	5	650	36
	6:00 - 8:00	6	510	22
6/01/2023	10:00 - 12:00	7	690	40
	4:00 - 6:00	8	590	32
9/01/2023	2:00 - 4:00	9	460	12
	4:00 - 6:00	10	550	32

Tabla 1. Registro de CO₂ promedio y #personas (Salón G2-122)

Fuente: Propia

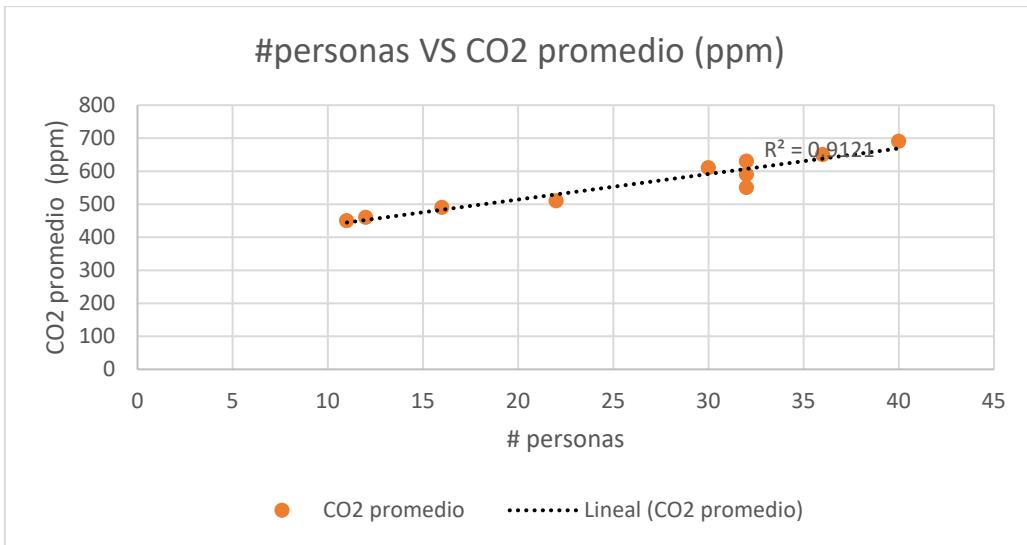


Figura 2. Correlación de # personas vs CO2 (Salón G2-122)

Fuente: Propia

Una vez verificada esta buena correlación entre la variable # de personas y el valor promedio de CO2 medido, se procede a generar cinco (05) modelos, teniendo en cuenta la consideración de los “**modelos de regresión inicial**”

1.1.1.1 Modelo I1 (G2-122)

Considerando el porcentaje de aberturas de puertas y ventanas, como 1: totalmente abierto y 0: totalmente cerrado.

REGISTRO					
Día	Horario	Ítem	CO2 promedio	# personas	%Aberturas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	450	11	1
	2:00 - 4:00	2	490	16	1
	6:00 - 8:00	3	610	30	0
4/01/2023	10:00 - 12:00	4	630	32	1
	2:00 - 4:00	5	650	36	1
	6:00 - 8:00	6	510	22	1
6/01/2023	10:00 - 12:00	7	690	40	0
	4:00 - 6:00	8	590	32	0
9/01/2023	2:00 - 4:00	9	460	12	1
	4:00 - 6:00	10	550	32	1

Tabla 2. Registro de data del Modelo I1 (G2-122)

Fuente: Propia

Luego de aplicar el modelo de regresión lineal múltiple para las variables # de personas y % de abertura (1: totalmente abierto y 0: totalmente cerrado), Se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.95770353
Coeficiente de determinación R^2	0.91719606
R^2 ajustado	0.89353779
Error típico	27.2578056
Observaciones	10

Tabla 3. Valores estadísticos del Modelo I1 (G2-122)

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 3, el modelo nos arroja un valor de R² ajustado de 0.89 y un error típico de 27.3.

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	57609	28804.54212	38.76852	0.00016337
Residuos	7	5200.9	742.9879644		
Total	9	62810			

Tabla 4. Análisis de varianza del Modelo I1 (G2-122)

Fuente: Propia

En la tabla 5, se logra calcular los valores de coeficientes para el modelo de regresión lineal múltiple (Modelo I1). Formándose la ecuación 1.

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico</i>		<i>Inferior</i>	<i>Superior</i>	<i>Inferior</i>	<i>Superior</i>
			<i>t</i>	<i>Probabilidad</i>	95%	95%	95.0%	95.0%
Intercepción	378.63	38.36	9.87	2.33E-05	287.94	469.33	287.94	469.33
Variable X 1	7.39	1.03	7.19	0.00018	4.96	9.83	4.96	9.83
Variable X 2	-14.39	21.95	-0.66	0.533081	-66.30	37.52	-66.30	37.52

Tabla 5. Coeficientes de regresión lineal para el Modelo I1 (G2-122)

Fuente: Propia

$$co_2 = 378.63 + 7.39x_1 - 14.39x_2$$

Ec. 1

Dónde:

X1 = # personas y X2 = % Aberturas

1.1.1.2 Modelo I2 (G2-122)

Considerando el % de aberturas como 1= 100% (totalmente abierto), 0.8= 80%, 0.25= 25% (parcialmente cerrado), de esta manera se tiene una mayor precisión en cuanto a esta variable.

REGISTRO					
Día	Horario	Ítem	CO2 promedio	# personas	%Aberturas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	450	11	0.8
	2:00 - 4:00	2	490	16	0.9
	6:00 - 8:00	3	610	30	0.35
4/01/2023	10:00 - 12:00	4	630	32	0.75
	2:00 - 4:00	5	650	36	0.85
	6:00 - 8:00	6	510	22	0.9
6/01/2023	10:00 - 12:00	7	690	40	0.3
	4:00 - 6:00	8	590	32	0.25
9/01/2023	2:00 - 4:00	9	460	12	0.85
	4:00 - 6:00	10	550	32	0.9

Tabla 6. Registro de data del Modelo I2 (G2-122)

Fuente: Propia

Luego de aplicar el modelo de regresión lineal múltiple para las variables # de personas y % de abertura 1= 100% (totalmente abierto), 0.25= 25% (parcialmente cerrado). Se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.95973903
Coeficiente de determinación R ²	0.921099
R ² ajustado	0.89855585
Error típico	26.6076572
Observaciones	10

Tabla 7. Valores estadísticos del Modelo I2 (G2-122)

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 7, el modelo nos arroja un valor de R² ajustado de 0.90 y un error típico de 26.60.

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	57854.228	28927.114	40.8593858	0.00013797
Residuos	7	4955.77195	707.967422		
Total	9	62810			

Tabla 8. Análisis de varianza del Modelo I2 (G2-122)

Fuente: Propia

En la tabla 9, se logra calcular los valores de coeficientes para el modelo de regresión lineal múltiple del Modelo I2. Formándose la ecuación 2.

Coeficientes	Error típico	Estadístico		Probabilidad	Inferior	Superior	Inferior	Superior
		t			95%	95%	95.0%	95.0%
Intercepción	395.15	46.74	8.45	0.00	284.63	505.66	284.63	505.66
Variable X 1	7.27	1.01	7.22	0.00	4.89	9.66	4.89	9.66
Variable X 2	-34.22	38.33	-0.89	0.40	-124.84	56.41	-124.84	56.41

Tabla 9. Coeficientes de regresión lineal para el Modelo I2 (G2-122)

Fuente: Propia

$$co_2 = 395.15 + 7.27x_1 - 34.22x_2 \quad \text{Ec. 2}$$

Dónde:

X1 = # personas y X2 = % Aberturas

1.1.1.3 Modelo I3 (G2-122)

Este modelo mantiene el porcentaje de aberturas igual que al modelo 2, pero adicionalmente a ello, modifica el número de personas por el logaritmo del número de personas.

Día	Horario	Ítem	CO2 promedio	log(#personas)	%Aberturas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	450	1.04139269	0.8
	2:00 - 4:00	2	490	1.20411998	0.9
	6:00 - 8:00	3	610	1.47712125	0.35
4/01/2023	10:00 - 12:00	4	630	1.50514998	0.75
	2:00 - 4:00	5	650	1.5563025	0.85
	6:00 - 8:00	6	510	1.34242268	0.9
6/01/2023	10:00 - 12:00	7	690	1.60205999	0.3

	4:00 - 6:00	8	590	1.50514998	0.25
9/01/2023	2:00 - 4:00	9	460	1.07918125	0.85
	4:00 - 6:00	10	550	1.50514998	0.9

Tabla 10. Registro de data del Modelo I3 (G2-122)

Fuente: Propia

Luego de aplicar el modelo de regresión lineal múltiple para las variables # de personas y % de abertura 1= 100% (totalmente abierto), 0.25= 25% (parcialmente cerrado). Se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.93901954
Coeficiente de determinación R ²	0.88175769
R ² ajustado	0.84797417
Error típico	32.5725553
Observaciones	10

Tabla 11. Valores estadísticos del Modelo I3 (G2-122)

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 11, el modelo nos arroja un valor de R² ajustado de 0.85 y un error típico de 32.6.

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	55383.200	27691.6002	26.1002335	0.00056847
Residuos	7	7426.7995	1060.97136		
Total	9	62810			

Tabla 12. Análisis de varianza del Modelo I3 (G2-122)

Fuente: Propia

En la tabla 13, se logra calcular los valores de coeficientes para el modelo de regresión lineal múltiple del Modelo I3. Formándose la ecuación 3.

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	116.90	103.91	1.13	0.30	-128.80	362.60	-128.80	362.60
Variable X 1	347.71	61.02	5.70	0.00	203.43	491.99	203.43	491.99
Variable X 2	-50.17	45.94	-1.09	0.31	-158.80	58.46	-158.80	58.46

Tabla 13. Coeficientes de regresión lineal para el Modelo I3 (G2-122)

Fuente: Propia

$$co_2 = 116.91 + 347.71\log(x_1) - 50.17x_2$$

Ec. 3

Dónde:

X1 = # personas y X2 = % Aberturas

1.1.1.4 Modelo I4 (G2-122)

Este modelo mantiene el porcentaje de aberturas igual que al modelo 2, pero adicionalmente a ello, modifica el número de personas por la raíz del número de personas.

Día	Horario	Ítem	CO2 promedio	raíz (#personas)	% Aberturas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	450	3.31662479	0.8
	2:00 - 4:00	2	490	4	0.9
	6:00 - 8:00	3	610	5.47722558	0.35
4/01/2023	10:00 - 12:00	4	630	5.65685425	0.75
	2:00 - 4:00	5	650	6	0.85
	6:00 - 8:00	6	510	4.69041576	0.9
6/01/2023	10:00 - 12:00	7	690	6.32455532	0.3
	4:00 - 6:00	8	590	5.65685425	0.25
9/01/2023	2:00 - 4:00	9	460	3.46410162	0.85
	4:00 - 6:00	10	550	5.65685425	0.9

Tabla 14. Registro de data del Modelo I4 (G2-122)

Fuente: Propia

Luego de aplicar el modelo de regresión lineal múltiple para las variables # de personas y % de abertura 1= 100% (totalmente abierto), 0.25= 25% (parcialmente cerrado). Se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.95095851
Coeficiente de determinación R^2	0.90432209
R^2 ajustado	0.87698555
Error típico	29.3002425
Observaciones	10

Tabla 15. Valores estadísticos del Modelo I4 (G2-122)

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 15, el modelo nos arroja un valor de R² ajustado de 0.88 y un error típico de 29.3.

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	56800.4705	28400.2353	33.0810669	0.00027092
Residuos	7	6009.52948	858.504212		
Total	9	62810			

Tabla 16. Análisis de varianza del Modelo I4 (G2-122)

Fuente: Propia

En la tabla 17, se logra calcular los valores de coeficientes para el modelo de regresión lineal múltiple del Modelo I4. Formándose la ecuación 4.

	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>	
<i>Coeficientes</i>								
Intercepción	251.92	72.00	3.50	0.01	81.67	422.17	81.67	422.17
Variable X 1	67.56	10.45	6.46	0.00	42.85	92.27	42.85	92.27
Variable X 2	-41.41	41.80	-0.99	0.35	-140.25	57.42	-140.25	57.42

Tabla 17. Coeficientes de regresión lineal para el Modelo I4 (G2-122)

Fuente: Propia

$$co_2 = 251.92 + 67.56\sqrt{x_1} - 41.41x_2 \quad \text{Ec. 4}$$

Dónde:

X1 = # personas y X2 = % Aberturas

1.1.1.5 Modelo I5 (G2-122)

Este modelo mantiene el porcentaje de aberturas igual que al modelo 2, pero adicionalmente a ello, modifica el número de personas por el número de personas elevado al cuadrado.

Día	Horario	Ítem	CO2 promedio	(#personas) ²	%Ventanas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	450	121	0.8
	2:00 - 4:00	2	490	256	0.9
	6:00 - 8:00	3	610	900	0.35
4/01/2023	10:00 - 12:00	4	630	1024	0.75

	2:00 - 4:00	5	650	1296	0.85
	6:00 - 8:00	6	510	484	0.9
6/01/2023	10:00 - 12:00	7	690	1600	0.3
	4:00 - 6:00	8	590	1024	0.25
9/01/2023	2:00 - 4:00	9	460	144	0.85
	4:00 - 6:00	10	550	1024	0.9

Tabla 18. Registro de data del Modelo I5 (G2-122)

Fuente: Propia

Luego de aplicar el modelo de regresión lineal múltiple para las variables # de personas y % de abertura 1= 100% (totalmente abierto), 0.25= 25% (parcialmente cerrado). Se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación	
múltiple	0.96514917
Coeficiente de determinación	
R^2	0.93151293
R^2 ajustado	0.91194519
Error típico	24.7896095
Observaciones	10

Tabla 19. Valores estadísticos del Modelo I5 (G2-122)

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 19, el modelo nos arroja un valor de R² ajustado de 0.91 y un error típico de 24.8.

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	58508.3268	29254.1634	47.60453332	8.4068E-05
Residuos	7	4301.67317	614.524739		
Total	9	62810			

Tabla 20. Análisis de varianza del Modelo I5 (G2-122)

Fuente: Propia

En la tabla 21, se logra calcular los valores de coeficientes para el modelo de regresión lineal múltiple del Modelo I5. Formándose la ecuación 5.

Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior		Superior	Inferior	Superior
				95%	95.0%	95.0%	95.0%	95.0%
Intercepción	462.67	36.14	12.80	0.00	377.21	548.13	377.21	548.13
Variable X 1	0.15	0.02	7.82	0.00	0.10	0.20	0.10	0.20
Variable X 2	-26.41	36.15	-0.73	0.49	-111.89	59.07	-111.89	59.07

Tabla 21. Coeficientes de regresión lineal para el Modelo I5 (G2-122)

Fuente: Propia

$$CO_2 = 462.67 + 0.15x_1^2 - 26.41x_2 \quad \text{Ec. 5}$$

Dónde:

X1 = # personas y X2 = % Aberturas

1.1.1.6 Resumen de modelos iniciales (G2-122)

Nº	Modelo	R2 ajustado	Error
1	CO2= 378.63 + 7.39*X1 - 14.39*X2'	0.894	27.258
2	CO2= 395.15 + 7.27*X1 - 34.22*X2	0.899	26.608
3	CO2= 116.90 + 347.71*log(X1) - 50.17*X2	0.848	32.573
4	CO2= 251.92 + 67.56*√X1 - 41.41*X2	0.877	29.300
5	CO2= 462.67 + 0.15*(X1)^2 - 26.41*X2	0.912	24.790

Tabla 22. Formato de presentación de Data (Salón G2-122)

Fuente: Propia

De la tabla resumen se puede observar que el modelo nº5 presentado para el caso inicial, cuenta con un mejor R² ajustado de 0.912 y un error menor de 24.790 a diferencia de los demás casos. Así mismo, los coeficientes encontrados tienen un adecuado valor de incidencia en el modelo.

Las incidencias del número de personas al cuadrado multiplicado por un factor de 0.15 es considerable, de igual manera el factor de -26.41 para el caso de las aberturas.

Por ejemplo, considerando un valor de X1=40 y X2=0.3 la incidencia de la variable # de personas es de +210 y la de la variable % de aberturas -7 siendo valores creíbles considerando que las condiciones del escenario son casi cerradas, obteniéndose un valor de CO2 690, relativamente alto por la cantidad máx. de personas que se encuentran en el ambiente.

Aun así, se propone mejorar los valores de CO₂ establecidos que se obtuvieron de las mediciones, para ello se propuso trabajar con una tabla de rangos y frecuencias, para poder obtener un valor de CO₂ promedio más acorde a los datos obtenidos.

1.1.2 Modelos de regresión final (G2-122)

Para la elaboración de estos modelos, se obtuvo la cantidad de CO₂ mediante la creación de una tabla de frecuencias con los rangos de CO₂ obtenidos. Se empleó el valor de CO₂ más representativo, determinado según los porcentajes de frecuencia encontrados. Posteriormente, estos valores fueron correlacionados con la cantidad de personas presentes en el espacio y el porcentaje de apertura de puertas y ventanas, ya que esto generaba una variación en la cantidad de CO₂ establecida.

Como se podrá observar en la figura 3, se muestra una buena correlación entre la cantidad de CO₂.

REGISTRO				
Día	Horario	ítem	CO ₂ promedio	# personas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	450	11
	2:00 - 4:00	2	490	16
	6:00 - 8:00	3	700	30
4/01/2023	10:00 - 12:00	4	570	32
	2:00 - 4:00	5	650	36
	6:00 - 8:00	6	510	22
6/01/2023	10:00 - 12:00	7	760	40
	4:00 - 6:00	8	640	32
9/01/2023	2:00 - 4:00	9	460	12
	4:00 - 6:00	10	550	32

Tabla 23. Registro de CO₂ promedio y #personas (Salón G2-122)

Fuente: Propia

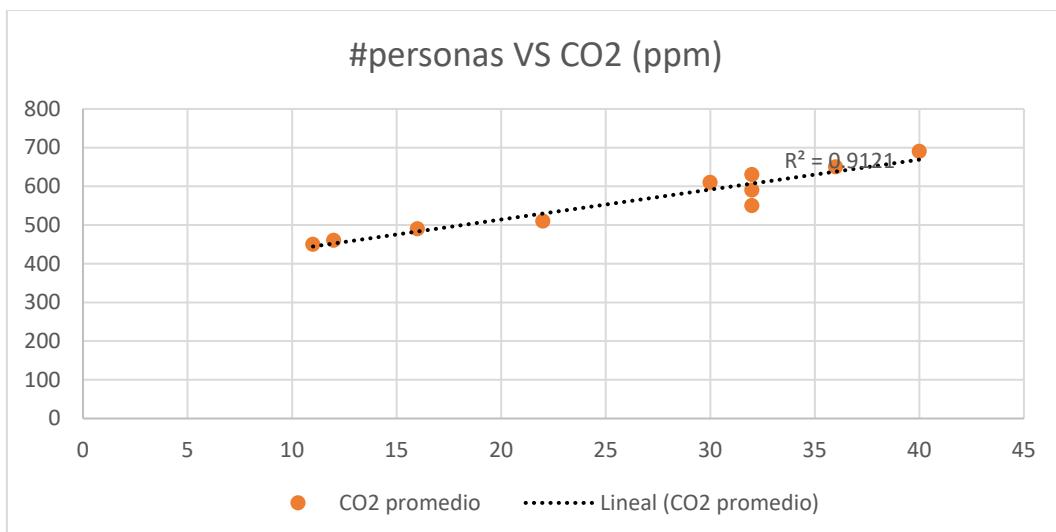


Figura 3. Correlación de # personas vs CO2 (Salón G2-122)

Fuente: Propia

Una vez verificada esta buena correlación entre la variable # de personas y el valor promedio de CO2 medido, se procede a generar cinco (05) modelos, teniendo en cuenta la consideración de los “**modelos de regresión final**”

1.1.2.1 Modelo F1 (G2-122)

Considerando el porcentaje de aberturas de puertas y ventanas, como 1: totalmente abierto y 0: totalmente cerrado.

REGISTRO					
Día	Horario	Ítem	CO2 promedio	# personas	% Aberturas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	450	11	1
	2:00 - 4:00	2	490	16	1
	6:00 - 8:00	3	700	30	0
4/01/2023	10:00 - 12:00	4	570	32	1
	2:00 - 4:00	5	650	36	1
	6:00 - 8:00	6	510	22	1
6/01/2023	10:00 - 12:00	7	760	40	0
	4:00 - 6:00	8	640	32	0
9/01/2023	2:00 - 4:00	9	460	12	1
	4:00 - 6:00	10	550	32	1

Tabla 24. Registro de data del Modelo F1 (G2-122)

Fuente: Propia

Luego de aplicar el modelo de regresión lineal múltiple para las variables # de personas y % de abertura (1: totalmente abierto) y (0: totalmente cerrado), Se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.967152538
Coeficiente de determinación R^2	0.935384031
R^2 ajustado	0.916922326
Error típico	30.46727014
Observaciones	10

Tabla 25. Valores estadísticos del Modelo F1 (G2-122)

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 25, el modelo nos arroja un valor de R² ajustado de 0.92 y un error típico de 30.5.

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	94062	47031.10908	50.66618	6.86E-05
Residuos	7	6497.8	928.2545497		
Total	9	100560			

Tabla 26. Análisis de varianza del Modelo F1 (G2-122)

Fuente: Propia

En la tabla 27, se logra calcular los valores de coeficientes para el modelo de regresión lineal múltiple (Modelo F1). Formándose la ecuación 6.

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	476.72	42.87	11.12	0.00	375.35	578.10	375.35	578.10
Variable X 1	6.57	1.15	5.71	0.00	3.85	9.29	3.85	9.29
Variable X 2	-102.05	24.54	-4.16	0.00	-160.07	-44.03	-160.07	-44.03

Tabla 27. Coeficientes de regresión lineal para el Modelo F1 (G2-122)

Fuente: Propia

$$co_2 = 476.72 + 6.57x_1 - 102.05x_2$$

Ec. 6

Dónde:

X1 = # personas y X2 = % Aberturas

1.1.2.2 Modelo F2 (G2-122)

Considerando el % de aberturas como 1= 100% (totalmente abierto),

0.8= 80%, 0.25= 25% (parcialmente cerrado), de esta manera se tiene una mayor precisión en cuanto a esta variable.

REGISTRO					
Día	Horario	Ítem	CO2 promedio	# personas	% Aberturas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	450	11	0.8
	2:00 - 4:00	2	490	16	0.9
	6:00 - 8:00	3	700	30	0.35
4/01/2023	10:00 - 12:00	4	570	32	0.75
	2:00 - 4:00	5	650	36	0.85
	6:00 - 8:00	6	510	22	0.9
6/01/2023	10:00 - 12:00	7	760	40	0.3
	4:00 - 6:00	8	640	32	0.25
9/01/2023	2:00 - 4:00	9	460	12	0.85
	4:00 - 6:00	10	550	32	0.9

Tabla 28. Registro de data del Modelo F2 (G2-122)

Fuente: Propia

Luego de aplicar el modelo de regresión lineal múltiple para las variables # de personas y % de abertura 1= 100% (totalmente abierto), 0.25= 25% (parcialmente cerrado). Se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.95693405
Coeficiente de determinación R^2	0.91572278
R^2 ajustado	0.89164357
Error típico	34.7951505
Observaciones	10

Tabla 29. Valores estadísticos del Modelo F2 (G2-122)

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 29, el modelo nos arroja un valor de R² ajustado de 0.89 y un error típico de 34.80.

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	92085.0825	46042.5413	38.0296079	0.00017377
Residuos	7	8474.91749	1210.7025		
Total	9	100560			

Tabla 30. Análisis de varianza del Modelo F2 (G2-122)

Fuente: Propia

En la tabla 31, se logra calcular los valores de coeficientes para el modelo de regresión lineal múltiple del Modelo F2. Formándose la ecuación 7.

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	518.90	61.12	8.49	0.00	374.38	663.42	374.38	663.42
Variable X1	6.70	1.32	5.09	0.00	3.58	9.81	3.58	9.81
Variable X2	-170.92	50.12	-3.41	0.01	-289.43	-52.40	-289.43	-52.40

Tabla 31. Coeficientes de regresión lineal para el Modelo F2 (G2-122)

Fuente: Propia

$$co_2 = 518.90 + 6.70x_1 - 170.92x_2 \quad \text{Ec. 7}$$

Dónde:

X1 = # personas y X2 = % Aberturas

1.1.2.3 Modelo F3 (G2-122)

Este modelo mantiene el porcentaje de aberturas igual que al modelo 2, pero adicionalmente a ello, modifica el número de personas por el logaritmo del número de personas.

REGISTRO					
Día	Horario	Ítem	CO2 promedio	log(#personas)	% Aberturas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	450	1.04139269	0.8
	2:00 - 4:00	2	490	1.20411998	0.9
	6:00 - 8:00	3	700	1.47712125	0.35
4/01/2023	10:00 - 12:00	4	570	1.50514998	0.75
	2:00 - 4:00	5	650	1.5563025	0.85
	6:00 - 8:00	6	510	1.34242268	0.9

6/01/2023	10:00 - 12:00	7	760	1.60205999	0.3
	4:00 - 6:00	8	640	1.50514998	0.25
9/01/2023	2:00 - 4:00	9	460	1.07918125	0.85
	4:00 - 6:00	10	550	1.50514998	0.9

Tabla 32. Registro de data del Modelo F3 (G2-122)

Fuente: Propia

Luego de aplicar el modelo de regresión lineal múltiple para las variables # de personas y % de abertura 1= 100% (totalmente abierto), 0.25= 25% (parcialmente cerrado). Se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.94652916
Coeficiente de determinación R^2	0.89591745
R^2 ajustado	0.86617957
Error típico	38.6680776
Observaciones	10

Tabla 33. Valores estadísticos del Modelo F3 (G2-122)

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 33, el modelo nos arroja un valor de R² ajustado de 0.87 y un error típico de 38.7.

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	90093.4584	45046.7292	30.1271534	0.00036377
Residuos	7	10466.5416	1495.22023		
Total	9	100560			

Tabla 34. Análisis de varianza del Modelo F3 (G2-122)

Fuente: Propia

En la tabla 34, se logra calcular los valores de coeficientes para el modelo de regresión lineal múltiple del Modelo F3. Formándose la ecuación 8.

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad d</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	261.71	123.35	2.12	0.07	-29.97	553.39	-29.97	553.39
Variable X 1	320.80	72.43	4.43	0.00	149.52	492.08	149.52	492.08
Variable X 2	-185.40	54.54	-3.40	0.01	-314.35	-56.44	-314.35	-56.44

Tabla 35. Coeficientes de regresión lineal para el Modelo F3 (G2-122)

Fuente: Propia

$$co_2 = 261.71 + 320.80\log(x_1) - 185.40x_2 \quad \text{Ec. 8}$$

Dónde:

X1 = # personas y X2 = % Aberturas

1.1.2.4 Modelo F4 (G2-122)

Este modelo mantiene el porcentaje de aberturas igual que al modelo 2, pero adicionalmente a ello, modifica el número de personas por la raíz del número de personas.

REGISTRO					
Día	Horario	Ítem	CO2 promedio	raíz (#personas)	% Aberturas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	450	3.31662479	0.8
	2:00 - 4:00	2	490	4	0.9
	6:00 - 8:00	3	700	5.47722558	0.35
4/01/2023	10:00 - 12:00	4	570	5.65685425	0.75
	2:00 - 4:00	5	650	6	0.85
	6:00 - 8:00	6	510	4.69041576	0.9
6/01/2023	10:00 - 12:00	7	760	6.32455532	0.3
	4:00 - 6:00	8	640	5.65685425	0.25
9/01/2023	2:00 - 4:00	9	460	3.46410162	0.85
	4:00 - 6:00	10	550	5.65685425	0.9

Tabla 36. Registro de data del Modelo F4 (G2-122)

Fuente: Propia

Luego de aplicar el modelo de regresión lineal múltiple para las variables # de personas y % de abertura 1= 100% (totalmente abierto), 0.25= 25% (parcialmente cerrado). Se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.95232126
Coeficiente de determinación R^2	0.90691579
R^2 ajustado	0.8803203
Error típico	36.5680355
Observaciones	10

Tabla 37. Valores estadísticos del Modelo F4 (G2-122)

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 37, el modelo nos arroja un valor de R² ajustado de 0.88 y un error típico de 36.6.

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	91199.4515	45599.7257	34.1003606	0.00024607
Residuos	7	9360.54854	1337.22122		
Total	9	100560			

Tabla 38. Análisis de varianza del Modelo F4 (G2-122)

Fuente: Propia

En la tabla 39, se logra calcular los valores de coeficientes para el modelo de regresión lineal múltiple del Modelo F4. Formándose la ecuación 9.

Coeficientes	Error típico	Estadístico		Probabilidad	Inferior	Superior	Inferior	Superior
		t	95%		95%	95.0%	95.0%	
Intercepción	386.94	89.86	4.31	0.00	174.46	599.42	174.46	599.42
Variable X 1	62.23	13.04	4.77	0.00	31.39	93.07	31.39	93.07
Variable X 2	-177.52	52.16	-3.40	0.01	-300.87	-54.17	-300.87	-54.17

Tabla 39. Coeficientes de regresión lineal para el Modelo F4 (G2-122)

Fuente: Propia

$$co_2 = 386.94 + 62.23\sqrt{x_1} - 177.52x_2 \quad \text{Ec. 9}$$

Dónde:

X1 = # personas y X2 = % Aberturas

1.1.2.5 Modelo F5 (G2-122)

Este modelo mantiene el porcentaje de aberturas igual que al modelo 2, pero adicionalmente a ello, modifica el número de personas por el número de personas elevado al cuadrado.

REGISTRO					
Día	Horario	Ítem	CO2 promedio	(#personas) ²	%Ventanas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	450	121	0.8
	2:00 - 4:00	2	490	256	0.9
	6:00 - 8:00	3	700	900	0.35
4/01/2023	10:00 - 12:00	4	570	1024	0.75
	2:00 - 4:00	5	650	1296	0.85
	6:00 - 8:00	6	510	484	0.9
6/01/2023	10:00 - 12:00	7	760	1600	0.3
	4:00 - 6:00	8	640	1024	0.25
9/01/2023	2:00 - 4:00	9	460	144	0.85
	4:00 - 6:00	10	550	1024	0.9

Tabla 40. Registro de data del Modelo F5 (G2-122)

Fuente: Propia

Luego de aplicar el modelo de regresión lineal múltiple para las variables # de personas y % de abertura 1= 100% (totalmente abierto), 0.25= 25% (parcialmente cerrado). Se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.96123345
Coeficiente de determinación R ²	0.92396974
R ² ajustado	0.90224681
Error típico	33.0488871
Observaciones	10

Tabla 41. Valores estadísticos del Modelo F5 (G2-122)

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 41, el modelo nos arroja un valor de R² ajustado de 0.90 y un error típico de 33.0.

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	92914.3974	46457.1987	42.53430498	0.00012119
Residuos	7	7645.60256	1092.22894		
Total	9	100560			

Tabla 42. Análisis de varianza del Modelo F5 (G2-122)

Fuente: Propia

En la tabla 43, se logra calcular los valores de coeficientes para el modelo de regresión lineal múltiple del Modelo F5. Formándose la ecuación 10.

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	580.21	48.18	12.04	0.00	466.28	694.14	466.28	694.14
Variable X 1	0.14	0.03	5.43	0.00	0.08	0.20	0.08	0.20
Variable X 2	-163.12	48.19	-3.38	0.01	-277.08	-49.16	277.08	-49.16

Tabla 43. Coeficientes de regresión lineal para el Modelo F5 (G2-122)

Fuente: Propia

$$co_2 = 580.21 + 0.14x_1^2 - 163.12x_2$$

Ec. 10

Dónde:

X1 = # personas y X2 = % Aberturas

1.1.2.6 Resumen de modelos finales (G2-122)

Nº	Modelo	R2 ajustado	Error
1	CO2= 476.72 + 6.57*X1 - 102.05*X2	0.917	30.467
2	CO2= 518.90 + 6.70*X1 - 170.92*X2	0.891	34795
3	CO2= 261.71 + 320.80*log(X1) - 185.40*X2	0.866	38.668
4	CO2= 386.94 + 62.23*√X1 - 177.52*X2	0.880	36.568
5	CO2= 580.21 + 0.14*(X1)^2 - 163.12*X2	0.902	33.048

Tabla 44. Formato de presentación de Data (Salón G2-122)

Fuente: Propia

De la tabla resumen se puede observar que el modelo nº5 presentado para el caso final, cuenta con un mejor R2 ajustado de 0.902 y un error menor de 33.048

a diferencia de los demás casos. Sin embargo, los coeficientes encontrados tienen un bajo valor de incidencia en el modelo.

Las incidencias del número de personas al cuadrado multiplicado por un factor de 0.14 es muy bajo.

Por el contrario, el modelo 4 tiene un mejor factor de incidencia para las variables de número personas y la variable de abertura.

Utilizando un dato de ejemplo, para un valor de X1= 40, X2=0.3 y CO2 real= 760. Reemplazando en el modelo se tendrían lo siguiente:

$$\text{CO2 teórico} = 386.94 + 62.23\sqrt{40} - 177.52 \cdot 0.3 = 727.20$$

Como se puede apreciar en el ejemplo anterior, el modelo óptimo para estos casos finales del salón G2-122 es el modelo 4.

Anexo 3.2: MODELOS DE REGRESIÓN G2-130

1.2 SALÓN G2-130



Figura 4. Fotografía de campo del salón G2-130

Fuente: Propia

1.2.1 Modelos de regresión inicial (G2-130)

Para la elaboración de estos modelos, se consideró la cantidad de CO₂ como un valor promedio de los datos obtenidos en los horarios y días establecidos, para que posteriormente sean correlacionados con la cantidad de personas que permanecían en el espacio y el porcentaje deertura de las puertas y ventanas que generaban una variación en cuanto a la cantidad de CO₂ establecida.

Como se podrá observar en la figura 5, se muestra una buena correlación entre la cantidad de CO₂ y el número de personas registradas en los diferentes horarios de medición.

REGISTRO				
Día	Horario	Ítem	CO ₂ promedio	# personas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	470	8
	1:00 - 4:00	2	540	18
4/01/2023	10:00 - 12:00	7	680	33
	4:00 - 6:00	8	640	24
6/01/2023	10:00 - 12:00	4	590	22
	4:00 - 6:00	5	760	38
	6:00 - 8:00	6	700	35
9/01/2023	2:00 - 4:00	7	800	42

Tabla 45. Registro de CO₂ promedio y #personas (Salón G2-130)

Fuente: Propia

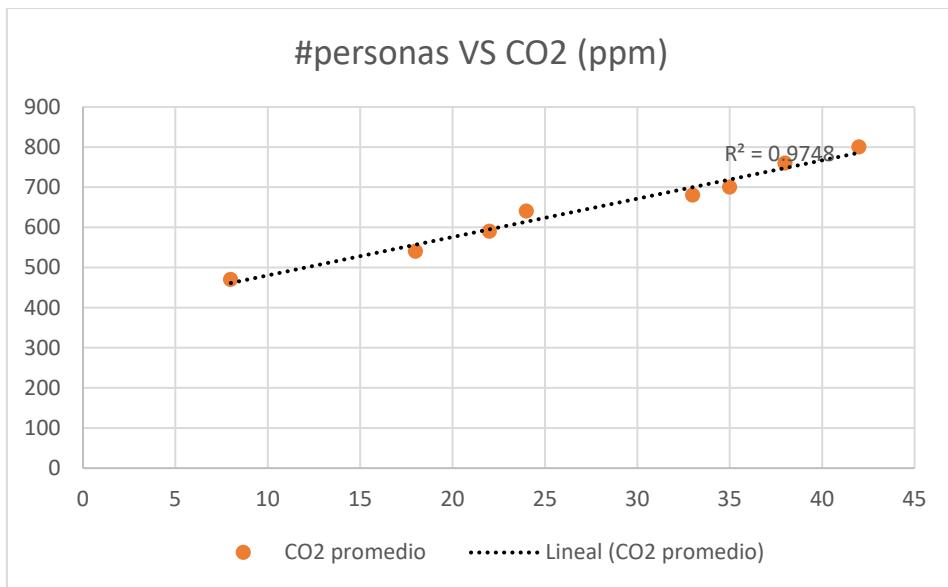


Figura 5. Correlación de # personas vs CO2 (Salón G2-130)

Fuente: Propia

Una vez verificada esta buena correlación entre la variable # de personas y el valor promedio de CO2 medido, se procede a generar cinco (05) modelos, teniendo en cuenta la consideración de los “**modelos de regresión inicial**”

1.2.1.1 Modelo I1 (G2-130)

Considerando el porcentaje de aberturas de puertas y ventanas, como 1: totalmente abierto y 0: totalmente cerrado.

REGISTRO					
Día	Horario	Ítem	CO2 promedio	# personas	% Aberturas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	470	8	1
	1:00 - 4:00	2	540	18	1
4/01/2023	10:00 - 12:00	7	680	33	1
	4:00 - 6:00	8	640	24	0
6/01/2023	10:00 - 12:00	4	590	22	1
	4:00 - 6:00	5	760	38	0
	6:00 - 8:00	6	700	35	0
9/01/2023	2:00 - 4:00	7	800	42	1

Tabla 46. Registro de data del Modelo I1 (G2-130)

Fuente: Propia

Luego de aplicar el modelo de regresión lineal múltiple para las variables # de personas y % de abertura (1: totalmente abierto y 0: totalmente cerrado), Se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.988624196
Coeficiente de determinación R^2	0.977377801
R^2 ajustado	0.968328921
Error típico	19.74285926
Observaciones	8

Tabla 47. Valores estadísticos del Modelo I1 (G2-130)

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 47, el modelo nos arroja un valor de R² ajustado de 0.96 y un error típico de 19.7.

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	84201.0975	42100.54877	108.0109	7.6973E-05
Residuos	5	1948.90246	389.7804918		
Total	7	86150			

Tabla 48. Análisis de varianza del Modelo I1 (G2-130)

Fuente: Propia

En la tabla 49, se logra calcular los valores de coeficientes para el modelo de regresión lineal múltiple (Modelo I1). Formándose la ecuación 11.

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior</i>	<i>Superior</i>	<i>Inferior</i>	<i>Superior</i>
					95%	95%	95.0%	95.0%
Intercepción	396.95	25.19	15.76	0.00	332.20	461.69	332.20	461.69
Variable X 1	9.37	0.69	13.49	0.00	7.59	11.16	7.59	11.16
Variable X 2	-11.52	15.39	-0.75	0.49	-51.07	28.03	-51.07	28.03

Tabla 49. Coeficientes de regresión lineal para el Modelo I1 (G2-1)

Fuente: Propia

$$co_2 = 396.95 + 9.37x_1 - 11.52x_2$$

Ec. 11

Dónde:

X1 = # personas y X2 = % Aberturas

1.2.1.2 Modelo I2 (G2-130)

Considerando el % de aberturas como 1= 100% (totalmente abierto),

0.8= 80%, 0.25= 25% (parcialmente cerrado), de esta manera se tiene una mayor precisión en cuanto a esta variable.

REGISTRO					
Día	Horario	ítem	CO2 promedio	# personas	% Aberturas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	470	8	0.85
	1:00 - 4:00	2	540	18	0.9
4/01/2023	10:00 - 12:00	7	680	33	0.75
	4:00 - 6:00	8	640	24	0.25
6/01/2023	10:00 - 12:00	4	590	22	0.9
	4:00 - 6:00	5	760	38	0.3
	6:00 - 8:00	6	700	35	0.25
9/01/2023	2:00 - 4:00	7	800	42	0.75

Tabla 50. Registro de data del Modelo I2 (G2-130)

Fuente: Propia

Luego de aplicar el modelo de regresión lineal múltiple para las variables # de personas y % de abertura 1= 100% (totalmente abierto), 0.25= 25% (parcialmente cerrado). Se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.98885693
Coeficiente de determinación R^2	0.97783803
R^2 ajustado	0.96897324
Error típico	19.5410031
Observaciones	8

Tabla 51. Valores estadísticos del Modelo I2 (G2-130)

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 51, el modelo nos arroja un valor de R² ajustado de 0.97 y un error típico de 19.54.

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	84240.746	42120.373	110.305838	7.3117E-05
Residuos	5	1909.25402	381.850804		
Total	7	86150			

Tabla 52. Formato de presentación de Data (Salón G2-142)

Fuente: Propia

En la tabla 53, se logra calcular los valores de coeficientes para el modelo de regresión lineal múltiple del Modelo I2. Formándose la ecuación 12.

Coeficientes	Error típico	Estadístico		Probabilidad	Inferior	Superior	Inferior	Superior
		t			95%	95%	95.0%	95.0%
Intercepción	406.45	32.53	12.50	0.00	322.83	490.06	322.83	490.06
Variable X 1	9.28	0.72	12.81	0.00	7.42	11.14	7.42	11.14
Variable X 2	-22.95	27.92	-0.82	0.45	-94.71	48.81	-94.71	48.81

Tabla 53. Coeficientes de regresión lineal para el Modelo I2 (G2-1)

Fuente: Propia

$$co_2 = 406.45 + 9.28x_1 - 22.95x_2$$

Ec. 12

Dónde:

X1 = # personas y X2 = % Aberturas

1.2.1.3 Modelo I3 (G2-130)

Este modelo mantiene el porcentaje de aberturas igual que al modelo 2, pero adicionalmente a ello, modifica el número de personas por el logaritmo del número de personas.

REGISTRO					
Día	Horario	ítem	CO2 promedio	log(#personas)	% Aberturas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	470	0.90308999	0.85
	1:00 - 4:00	2	540	1.25527251	0.9
4/01/2023	10:00 - 12:00	7	680	1.51851394	0.75
	4:00 - 6:00	8	640	1.38021124	0.25
6/01/2023	10:00 - 12:00	4	590	1.34242268	0.9
	4:00 - 6:00	5	760	1.5797836	0.3
	6:00 - 8:00	6	700	1.54406804	0.25
9/01/2023	2:00 - 4:00	7	800	1.62324929	0.75

Tabla 54. Registro de data del Modelo I3 (G2-130)

Fuente: Propia

Luego de aplicar el modelo de regresión lineal múltiple para las variables # de personas y % de abertura 1= 100% (totalmente abierto), 0.25= 25% (parcialmente cerrado). Se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.94769589
Coeficiente de determinación R^2	0.89812749
R^2 ajustado	0.85737849
Error típico	41.8958623
Observaciones	8

Tabla 55. Formato de presentación de Data (Salón G2-142)

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 55, el modelo nos arroja un valor de R² ajustado de 0.86 y un error típico de 41.9.

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	77373.6836	38686.8418	22.0404781	0.0033124
Residuos	5	8776.31638	1755.26328		
Total	7	86150			

Tabla 56. Análisis de varianza del Modelo I3 (G2-130)

Fuente: Propia

En la tabla 57, se logra calcular los valores de coeficientes para el modelo de regresión lineal múltiple del Modelo I2. Formándose la ecuación 13.

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	66.15	128.75	0.51	0.63	-264.82	397.11	-264.82	397.11
Variable X 1	429.31	76.14	5.64	0.00	233.58	625.04	233.58	625.04
Variable X 2	-27.18	60.26	-0.45	0.67	-182.10	127.73	-182.10	127.73

Tabla 57. Coeficientes de regresión lineal para el Modelo I3 (G2-130)

Fuente: Propia

$$co_2 = 66.15 + 429.31 \log(x_1) - 27.18x_2 \quad \text{Ec. 13}$$

Dónde:

X1 = # personas y X2 = % Aberturas

1.2.1.4 Modelo I4 (G2-130)

Este modelo mantiene el porcentaje de aberturas igual que al modelo 2, pero adicionalmente a ello, modifica el número de personas por la raíz del número de personas.

REGISTRO					
Día	Horario	ítem	CO2 promedio	raíz (#personas)	% Aberturas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	470	2.82842712	0.85
	1:00 - 4:00	2	540	4.24264069	0.9
4/01/2023	10:00 - 12:00	7	680	5.74456265	0.75
	4:00 - 6:00	8	640	4.89897949	0.25
6/01/2023	10:00 - 12:00	4	590	4.69041576	0.9
	4:00 - 6:00	5	760	6.164414	0.3
	6:00 - 8:00	6	700	5.91607978	0.25
9/01/2023	2:00 - 4:00	7	800	6.4807407	0.75

Tabla 58. Registro de data del Modelo I4 (G2-130)

Fuente: Propia

Luego de aplicar el modelo de regresión lineal múltiple para las variables # de personas y % deertura 1= 100% (totalmente abierto), 0.25= 25% (parcialmente cerrado). Se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.97581019
Coeficiente de determinación R^2	0.95220553
R^2 ajustado	0.93308774
Error típico	28.6966675
Observaciones	8

Tabla 59. Valores estadísticos del Modelo I4 (G2-130)

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 59, el modelo nos arroja un valor de R² ajustado de 0.93 y un error típico de 28.7.

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	82032.5064	41016.2532	49.8073063	0.00049939
Residuos	5	4117.49362	823.498724		
Total	7	86150			

Tabla 60. Análisis de varianza del Modelo I4 (G2-130)

Fuente: Propia

	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior</i>	<i>Superior</i>	<i>Inferior</i>	<i>Superior</i>
<i>Coeficientes</i>				<i>95%</i>	<i>95%</i>	<i>95.0%</i>	<i>95.0%</i>
Intercepción	214.05	68.67	0.03	37.52	390.57	37.52	390.57
Variable X 1	87.12	10.17	0.00	60.98	113.25	60.98	113.25
Variable X 2	-20.44	41.29	0.64	-126.58	85.70	-126.58	85.70

Tabla 61. Coeficientes de regresión lineal para el Modelo I4 (G2-130)

Fuente: Propia

$$co_2 = 214.05 + 87.12\sqrt{x_1} - 20.44x_2 \quad \text{Ec. 14}$$

Dónde:

X1 = # personas y X2 = % Aberturas

1.2.1.5 Modelo I5 (G2-130)

Este modelo mantiene el porcentaje de aberturas igual que al modelo 2, pero adicionalmente a ello, modifica el número de personas por el número de personas elevado al cuadrado.

REGISTRO					
Día	Horario	ítem	CO2 promedio	(#personas)^2	% Aberturas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	470	64	0.85
	1:00 - 4:00	2	540	324	0.9
4/01/2023	10:00 - 12:00	7	680	1089	0.75
	4:00 - 6:00	8	640	576	0.25
6/01/2023	10:00 - 12:00	4	590	484	0.9
	4:00 - 6:00	5	760	1444	0.3
	6:00 - 8:00	6	700	1225	0.25
9/01/2023	2:00 - 4:00	7	800	1764	0.75

Tabla 62. Registro de data del Modelo I5 (G2-130)

Fuente: Propia

Luego de aplicar el modelo de regresión lineal múltiple para las variables # de personas y % de abertura 1= 100% (totalmente abierto), 0.25= 25% (parcialmente cerrado). Se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.98462623
Coeficiente de determinación R^2	0.96948882
R^2 ajustado	0.95728435
Error típico	22.9283156
Observaciones	8

Tabla 63. Formato de presentación de Data (Salón G2-142)

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 63, el modelo nos arroja un valor de R² ajustado de 0.96 y un error típico de 22.9.

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	83521.4617	41760.7309	79.43717479	0.00016261
Residuos	5	2628.53827	525.707655		
Total	7	86150			

Tabla 64. Análisis de varianza del Modelo I5 (G2-130)

Fuente: Propia

$$CO_2 = 524.48 + 0.17\sqrt{x_1} - 44.79x_2 \quad \text{Ec. 15}$$

Dónde:

X1 = # personas y X2 = % Aberturas

1.2.1.6 Resumen de modelos iniciales (G-130)

Nº	Modelo	R2 ajustado	Error
1	CO2= 396.95 + 9.37*X1 - 11.52*X2	0.968	19.742
2	CO2= 406.45 + 9.28*X1 - 22.95*X2	0.968	19.541
3	CO2= 66.15 + 429.31*log(X1) - 27.18*X2	0.857	41.895
4	CO2= 214.05 + 87.12*\sqrt{X1} - 20.44*X2	0.933	28.696
5	CO2= 524.48 + 0.17*(X1)^2 - 44.79*X2	0.957	22.928

Tabla 65. Formato de presentación de Data (Salón G2-130)

Fuente: Propia

De la tabla resumen se puede observar que el modelo n°1 presentado para el caso inicial, cuenta con un mejor R2 ajustado de 0.968 y un error menor de 19.742 a diferencia de los demás casos. Sin embargo, los coeficientes encontrados tienen un bajo valor de incidencia en el modelo.

Las incidencias del número de personas multiplicado por un factor de 9.37 es muy bajo, de igual manera el factor de -11.52 para el caso de las aberturas.

Por el contrario, el modelo 2 tiene un mejor factor de incidencia para las variables de número personas y la variable de abertura.

Utilizando un dato de ejemplo, para un valor de X1= 38, X2=0.3 y CO2 real= 760. Reemplazando en el modelo se tendrían lo siguiente:

$$\text{CO2 teórico} = 406.45 + 9.28 \cdot 38 - 22.95 \cdot 0.3 = 752.27$$

Aun así, se propone mejorar los valores de CO2 establecidos que se obtuvieron de las mediciones, para ello se propuso trabajar con una tabla de rangos y frecuencias, para poder obtener un valor de CO2 promedio más acorde a los datos obtenidos.

1.2.2 Modelos de regresión final (G2-130)

Para la elaboración de estos modelos, se obtuvo la cantidad de CO2 mediante la creación de una tabla de frecuencias con los rangos de CO2 obtenidos. Se empleó el valor de CO2 más representativo, determinado según los porcentajes de frecuencia encontrados. Posteriormente, estos valores fueron correlacionados con la cantidad de personas presentes en el espacio y el porcentaje de apertura de puertas y ventanas, ya que esto generaba una variación en la cantidad de CO2 establecida.

Como se podrá observar en la figura 6, se muestra una buena correlación entre la cantidad de CO2.

REGISTRO				
Día	Horario	ítem	CO2 promedio	# personas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	470	8
	1:00 - 4:00	2	540	18
4/01/2023	10:00 - 12:00	7	680	33
	4:00 - 6:00	8	720	24
6/01/2023	10:00 - 12:00	4	590	22
	4:00 - 6:00	5	760	38

	6:00 - 8:00	6	750	35
9/01/2023	2:00 - 4:00	7	600	42

Tabla 66. Registro de CO2 promedio y #personas (Salón G2-130)

Fuente: Propia

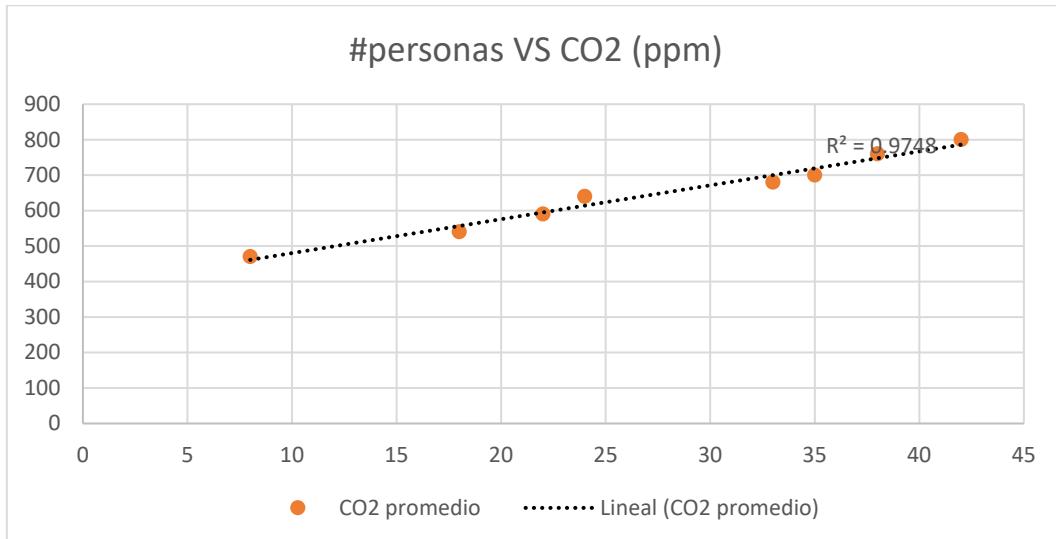


Figura 6. Correlación de # personas vs CO2 (Salón G2-130)

Fuente: Propia

Una vez verificada esta buena correlación entre la variable # de personas y el valor promedio de CO2 medido, se procede a generar cinco (05) modelos, teniendo en cuenta la consideración de los “**modelos de regresión final**”

1.2.2.1 Modelo F1 (G2-130)

Considerando el porcentaje de aberturas de puertas y ventanas, como 1: totalmente abierto y 0: totalmente cerrado.

REGISTRO					
Día	Horario	ítem	CO2 promedio	# personas	% Aberturas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	470	8	1
	1:00 - 4:00	2	540	18	1
4/01/2023	10:00 - 12:00	7	680	33	1
	4:00 - 6:00	8	720	24	0
6/01/2023	10:00 - 12:00	4	590	22	1
	4:00 - 6:00	5	760	38	0
	6:00 - 8:00	6	750	35	0
9/01/2023	2:00 - 4:00	7	600	42	1

Tabla 67. Registro de data del Modelo F1 (G2-130)

Fuente: Propia

Luego de aplicar el modelo de regresión lineal múltiple para las variables # de personas y % de abertura (1: totalmente abierto y 0: totalmente cerrado), Se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.937999379
Coeficiente de determinación R ²	0.879842835
R ² ajustado	0.831779969
Error típico	43.15246999
Observaciones	8

Tabla 68. Valores estadísticos del Modelo F1 (G2-130)

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 68, el modelo nos arroja un valor de R² ajustado de 0.83 y un error típico de 43.2.

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	68176.8217	34088.41084	18.30608	0.00500466
Residuos	5	9310.67833	1862.135666		
Total	7	77487.5			

Tabla 69. Análisis de varianza del Modelo F1 (G2-130)

Fuente: Propia

En la tabla 70, se logra calcular los valores de coeficientes para el modelo de regresión lineal múltiple (Modelo F1). Formándose la ecuación 16.

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	600.90	55.05	10.92	0.00	459.39	742.41	459.39	742.41
Variable X 1	4.41	1.52	2.90	0.03	0.50	8.31	0.50	8.31
Variable X 2	-133.27	33.63	-3.96	0.01	-219.72	-46.82	-219.72	-46.82

Tabla 70. Coeficientes de regresión lineal para el Modelo F1 (G2-130)

Fuente: Propia

$$co_2 = 600.90 + 4.41x_1 - 133.27x_2$$

Ec. 16

Dónde:

X1 = # personas y X2 = % Aberturas

1.2.2.2 Modelo F2 (G2-130)

Considerando el % de aberturas como 1= 100%, 0.8= 80%, 0.25= 25% de esta manera se tiene una mayor precisión en cuanto a esta variable.

REGISTRO					
Día	Horario	ítem	CO2 promedio	# personas	% Aberturas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	470	8	0.85
	1:00 - 4:00	2	540	18	0.9
4/01/2023	10:00 - 12:00	7	680	33	0.75
	4:00 - 6:00	8	720	24	0.25
6/01/2023	10:00 - 12:00	4	590	22	0.9
	4:00 - 6:00	5	760	38	0.3
	6:00 - 8:00	6	750	35	0.25
9/01/2023	2:00 - 4:00	7	600	42	0.75

Tabla 71. Registro de data del Modelo F2 (G2-130)

Fuente: Propia

Luego de aplicar el modelo de regresión lineal múltiple para las variables # de personas y % de abertura 1= 100% (totalmente abierto), 0.25= 25%

(parcialmente cerrado). Se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.93479588
Coeficiente de determinación R^2	0.87384333
R^2 ajustado	0.82338067
Error típico	44.2166593
Observaciones	8

Tabla 72. Valores estadísticos del Modelo F2 (G2-130)

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 72, el modelo nos arroja un valor de R² ajustado de 0.82 y un error típico de 44.2.

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	67711.9352	33855.9676	17.31663	0.00565295
Residuos	5	9775.56478	1955.11296		
Total	7	77487.5			

Tabla 73. Análisis de varianza del Modelo F2 (G2-130)

Fuente: Propia

En la tabla 74, se logra calcular los valores de coeficientes para el modelo de regresión lineal múltiple del Modelo F2. Formándose la ecuación 17.

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	688.95	73.60	9.36	0.00	499.75	878.15	499.75	878.15
Variable X 1	3.63	1.64	2.21	0.08	-0.59	7.84	-0.59	7.84
Variable X 2	-242.35	63.17	-3.84	0.01	-404.73	-79.97	-404.73	-79.97

Tabla 74. Coeficientes de regresión lineal para el Modelo F2 (G2-130)

Fuente: Propia

$$co_2 = 688.95 + 3.63x_1 - 242.35x_2$$

Ec. 17

Dónde:

X1 = # personas y X2 = % Aberturas

1.2.2.3 Modelo F3 (G2-130)

Este modelo mantiene el porcentaje de aberturas igual que al modelo 2, pero adicionalmente a ello, modifica el número de personas por el logaritmo del número de personas.

REGISTRO					
Día	Horario	ítem	CO2 promedio	log(#personas)	% Aberturas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	470	0.90308999	0.85
	1:00 - 4:00	2	540	1.25527251	0.9
4/01/2023	10:00 - 12:00	7	680	1.51851394	0.75
	4:00 - 6:00	8	720	1.38021124	0.25
6/01/2023	10:00 - 12:00	4	590	1.34242268	0.9
	4:00 - 6:00	5	760	1.5797836	0.3
	6:00 - 8:00	6	750	1.54406804	0.25
9/01/2023	2:00 - 4:00	7	600	1.62324929	0.75

Tabla 75. Registro de data del Modelo F3 (G2-130)

Fuente: Propia

Luego de aplicar el modelo de regresión lineal múltiple para las variables # de personas y % de abertura 1= 100% (totalmente abierto), 0.25= 25% (parcialmente cerrado). Se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.95871838
Coeficiente de determinación R^2	0.91914093
R^2 ajustado	0.88679731
Error típico	35.3993414
Observaciones	8

Tabla 76. Valores estadísticos del Modelo F3 (G2-130)

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 76, el modelo nos arroja un valor de R² ajustado de 0.89 y un error típico de 35.4.

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	71221.9331	35610.9666	28.4179926	0.00185918
Residuos	5	6265.56687	1253.11337		
Total	7	77487.5			

Tabla 77. Análisis de varianza del Modelo F3 (G2-130)

Fuente: Propia

En la tabla 78, se logra calcular los valores de coeficientes para el modelo de regresión lineal múltiple del Modelo F3. Formándose la ecuación 18.

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	490.89	108.79	4.51	0.01	211.24	770.54	211.24	770.54
Variable X 1	207.87	64.34	3.23	0.02	42.49	373.25	42.49	373.25
Variable X 2	-229.12	50.92	-4.50	0.01	-360.02	-98.23	-360.02	-98.23

Tabla 78. Coeficientes de regresión lineal para el Modelo F3 (G2-130)

Fuente: Propia

$$co_2 = 490.89 + 207.87 \log(x_1) - 229.12x_2 \quad \text{Ec. 18}$$

Dónde:

X1 = # personas y X2 = % Aberturas

1.2.2.4 Modelo F4 (G2-130)

Este modelo mantiene el porcentaje de aberturas igual que al modelo 2, pero adicionalmente a ello, modifica el número de personas por la raíz del número de personas.

REGISTRO					
Día	Horario	ítem	CO2 promedio	raíz (#personas)	% Aberturas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	470	2.82842712	0.85
	1:00 - 4:00	2	540	4.24264069	0.9
4/01/2023	10:00 - 12:00	7	680	5.74456265	0.75
	4:00 - 6:00	8	720	4.89897949	0.25
6/01/2023	10:00 - 12:00	4	590	4.69041576	0.9
	4:00 - 6:00	5	760	6.164414	0.3
	6:00 - 8:00	6	750	5.91607978	0.25
9/01/2023	2:00 - 4:00	7	600	6.4807407	0.75

Tabla 79. Registro de data del Modelo F4 (G2-130)

Fuente: Propia

Luego de aplicar el modelo de regresión lineal múltiple para las variables # de personas y % deertura 1= 100% (totalmente abierto), 0.25= 25% (parcialmente cerrado). Se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.94794171
Coeficiente de determinación R^2	0.89859349
R^2 ajustado	0.85803089
Error típico	39.6427466
Observaciones	8

Tabla 80. Valores estadísticos del Modelo F4 (G2-130)

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 80, el modelo nos arroja un valor de R² ajustado de 0.86 y un error típico de 39.6.

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	69629.7632	34814.8816	22.1532501	0.00327465
Residuos	5	7857.73679	1571.54736		
Total	7	77487.5			

Tabla 81. Análisis de varianza del Modelo F4 (G2-130)

Fuente: Propia

En la tabla 82, se logra calcular los valores de coeficientes para el modelo de regresión lineal múltiple del Modelo F4. Formándose la ecuación 19.

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	588.99	94.86	6.21	0.00	345.13	832.84	345.13	832.84
Variable X 1	37.98	14.05	2.70	0.04	1.87	74.08	1.87	74.08
Variable X 2	-233.87	57.04	-4.10	0.01	-380.50	-87.25	-380.50	-87.25

Tabla 82. Coeficientes de regresión lineal para el Modelo F4 (G2-122)

Fuente: Propia

$$co_2 = 588.99 + 37.98\sqrt{x_1} - 233.87x_2$$

Ec. 19

Dónde:

X1 = # personas y X2 = % Aberturas

1.2.2.5 Modelo F5 (G2-130)

Este modelo mantiene el porcentaje de aberturas igual que al modelo 2, pero adicionalmente a ello, modifica el número de personas por el número de personas elevado al cuadrado.

REGISTRO					
Día	Horario	ítem	CO2 promedio	(#personas)^2	% Aberturas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	470	64	0.85
	1:00 - 4:00	2	540	324	0.9
4/01/2023	10:00 - 12:00	7	680	1089	0.75
	4:00 - 6:00	8	720	576	0.25
6/01/2023	10:00 - 12:00	4	590	484	0.9
	4:00 - 6:00	5	760	1444	0.3
	6:00 - 8:00	6	750	1225	0.25
9/01/2023	2:00 - 4:00	7	600	1764	0.75

Tabla 83. Registro de data del Modelo F5 (G2-130)

Fuente: Propia

Luego de aplicar el modelo de regresión lineal múltiple para las variables # de personas y % de abertura 1= 100% (totalmente abierto), 0.25= 25% (parcialmente cerrado). Se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.91083656
Coeficiente de determinación R ²	0.82962324
R ² ajustado	0.76147254
Error típico	51.3849572
Observaciones	8

Tabla 84. Valores estadísticos del Modelo I5 (G2-130)

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 84, el modelo nos arroja un valor de R² ajustado de 0.76 y un error típico de 51.4.

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	64285.4309	32142.7154	12.1733628	0.01198191
Residuos	5	13202.0691	2640.41383		
Total	7	77487.5			

Tabla 85. Análisis de varianza del Modelo F5 (G2-130)

Fuente: Propia

En la tabla 85, se logra calcular los valores de coeficientes para el modelo de regresión lineal múltiple del Modelo F5. Formándose la ecuación 20.

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	753.17	66.22	11.37	0.00	582.94	923.39	582.94	923.39
Variable X 1	0.05	0.04	1.53	0.19	-0.04	0.15	-0.04	0.15
Variable X 2	-261.64	71.54	-3.66	0.01	-445.54	-77.75	-445.54	-77.75

Tabla 86. Coeficientes de regresión lineal para el Modelo F5 (G2-130)

Fuente: Propia

$$co_2 = 753.17 + 0.05x_1^2 - 261.64x_2$$

Ec. 20

Dónde:

X1 = # personas y X2 = % Aberturas

1.2.2.6 Resumen de modelos finales (G2-130)

Nº	Modelo	R2 ajustado	Error
1	$CO2 = 600.90 + 4.41*X_1 - 133.27*X_2$	0.831	43.152
2	$CO2 = 688.95 + 3.63*X_1 - 242.35*X_2$	0.823	44.216
3	$CO2 = 490.89 + 207.87*\log(X_1) - 229.12*X_2$	0.886	35.399
4	$CO2 = 588.99 + 37.98*\sqrt{X_1} - 233.87*X_2$	0.858	39.642
5	$CO2 = 580.21 + 0.14*(X_1)^2 - 163.12*X_2$	0.761	51.384

Tabla 87. Formato de presentación de Data (Salón G2-130)

Fuente: Propia

De la tabla resumen se puede observar que el mejor modelo presentado para el caso inicial es el modelo nº3, ya que cuenta con un mejor R^2 ajustado de 0.886 y el error es el menor a diferencia de los demás casos. Además, los coeficientes encontrados tienen un alto valor de incidencia en el modelo.

Las incidencias del logaritmo del número de personas multiplicado por un factor de 207.87 es alto, de igual manera el factor de -229.12 para el caso de las aberturas es considerable.

Utilizando un dato de ejemplo, para un valor de $X_1 = 35$, $X_2 = 0.25$ y $CO2 \text{ real} = 750$. Remplazando en el modelo se tendrían lo siguiente:

$$CO2 \text{ teórico} = 490.89 + 207.87*\log(35) - 229.12*0.25 = 750.54$$

Como se puede apreciar en el ejemplo anterior, el modelo óptimo para estos casos finales del salón G2-130 es el modelo 3.

Anexo 3.3: MODELOS DE REGRESIÓN G2-142

1.3 SALÓN G2-142



Figura 7. Plano de distribución de oficina N°2

Fuente: Propia

1.3.1 Modelos de regresión inicial (G2-142)

Para la elaboración de estos modelos, se consideró la cantidad de CO₂ como un valor promedio de los datos obtenidos en los horarios y días establecidos, para que posteriormente sean correlacionados con la cantidad de personas que permanecían en el espacio y el porcentaje de abertura de las puertas y ventanas que generaban una variación en cuanto a la cantidad de CO₂ establecida.

Como se podrá observar en la figura 8, se muestra una buena correlación entre la cantidad de CO₂ y el número de personas registradas en los diferentes horarios de medición.

REGISTRO				
Día	Horario	ítem	CO ₂ promedio	# personas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	510	24
	2:00 - 4:00	2	450	19
	6:00 - 8:00	3	500	23
4/01/2023	8:00 - 10:00	4	540	30
	12:00 - 2:00	5	650	38
	4:00 - 6:00	6	430	14
	7:00 - 9:00	7	580	34
6/01/2023	10:00 - 12:00	8	550	30
	2:00 - 4:00	9	560	35
	6:00 - 8:00	10	630	37
9/01/2023	10:00 - 12:00	11	600	43
	4:00 - 6:00	12	600	36
	6:00 - 8:00	13	530	28

Tabla 88. Registro de CO₂ promedio y #personas (Salón G2-142)

Fuente: Propia

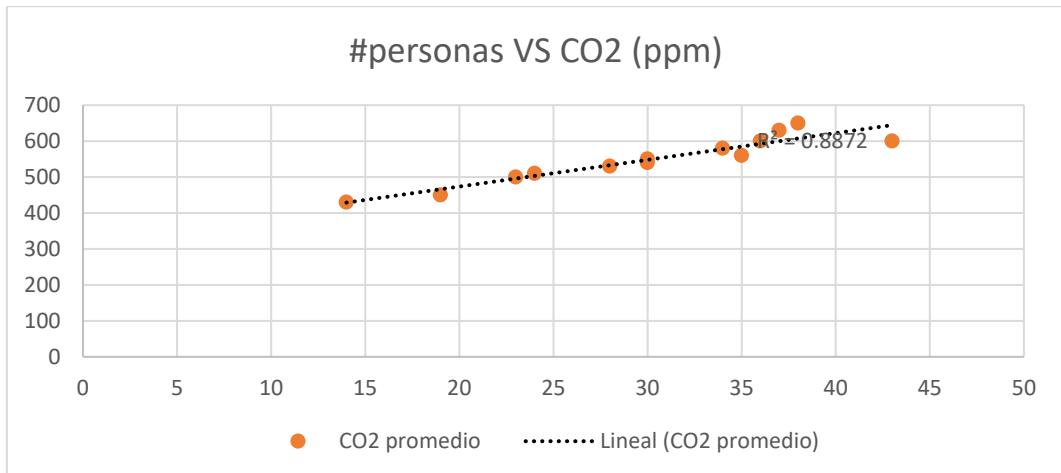


Figura 8. Correlación de # personas vs CO2 (Salón G2-142)

Fuente: Propia

Una vez verificada esta buena correlación entre la variable # de personas y el valor promedio de CO2 medido, se procede a generar cinco (05) modelos, teniendo en cuenta la consideración de los “**modelos de regresión inicial**”

1.3.1.1 Modelo I1 (G2-142)

Considerando el porcentaje de aberturas de puertas y ventanas, como 1: totalmente abierto y 0: totalmente cerrado.

REGISTRO					
Día	Horario	ítem	CO2 promedio	# personas	%Aberturas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	510	24	1
	2:00 - 4:00	2	450	19	1
	6:00 - 8:00	3	500	23	1
4/01/2023	8:00 - 10:00	4	540	30	0
	12:00 - 2:00	5	650	38	1
	4:00 - 6:00	6	430	14	1
	7:00 - 9:00	7	580	34	0
6/01/2023	10:00 - 12:00	8	550	30	1
	2:00 - 4:00	9	560	35	1
	6:00 - 8:00	10	630	37	0
9/01/2023	10:00 - 12:00	11	600	43	1
	4:00 - 6:00	12	600	36	0
	6:00 - 8:00	13	530	28	0

Tabla 89. Registro de data del Modelo I1 (G2-142)

Fuente: Propia

Luego de aplicar el modelo de regresión lineal múltiple para las variables # de personas y % de abertura 1: totalmente abierto y 0: totalmente cerrado), Se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.9450052
Coeficiente de determinación R^2	0.89303483
R^2 ajustado	0.87164179
Error típico	23.4408164
Observaciones	13

Tabla 90. Valores estadísticos del Modelo I1 (G2-142)

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 90, el modelo nos arroja un valor de R² ajustado de 0.87 y un error típico de 23.4.

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	45875	22937.25602	41.74418592	1.40027E-05
Residuos	10	5494.7	549.4718729		
Total	12	51369			

Tabla 91. Análisis de varianza del Modelo I1 (G2-142)

Fuente: Propia

En la tabla 92, se logra calcular los valores de coeficientes para el modelo de regresión lineal múltiple (Modelo I1). Formándose la ecuación 21.

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	336.74	30.03	11.21	0.00	269.83	403.66	269.83	403.66
Variable X 1	7.25	0.85	8.50	0.00	5.35	9.15	5.35	9.15
Variable X 2	-10.31	13.96	-0.74	0.48	-41.43	20.80	-41.43	20.80

Tabla 92. Coeficientes de regresión lineal para el Modelo I1 (G2-142)

Fuente: Propia

$$co_2 = 336.74 + 7.25x_1 - 10.31x_2$$

Ec. 21

Dónde:

X1 = # personas y X2 = % Aberturas

1.3.1.2 Modelo I2 (G2-142)

Considerando el % de aberturas como 1= 100%, 0.8= 80%, 0.25= 25% de esta manera se tiene una mayor precisión en cuanto a esta variable.

REGISTRO					
Día	Horario	ítem	CO2 promedio	# personas	%Aberturas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	510	24	0.85
	2:00 - 4:00	2	450	19	0.75
	6:00 - 8:00	3	500	23	0.9
4/01/2023	8:00 - 10:00	4	540	30	0.3
	12:00 -2:00	5	650	38	0.8
	4:00 - 6:00	6	430	14	0.9
	7:00 - 9:00	7	580	34	0.2
6/01/2023	10:00 - 12:00	8	550	30	0.75
	2:00 - 4:00	9	560	35	0.8
	6:00 - 8:00	10	630	37	0.25
9/01/2023	10:00 - 12:00	11	600	43	0.75
	4:00 - 6:00	12	600	36	0.15
	6:00 - 8:00	13	530	28	0.25

Tabla 93. Registro de data del Modelo I2 (G2-142)

Fuente: Propia

Luego de aplicar el modelo de regresión lineal múltiple para las variables # de personas y % de abertura 1= 100% (totalmente abierto), 0.25= 25% (parcialmente cerrado). Se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.943939146
Coeficiente de determinación R ²	0.891021112
R ² ajustado	0.869225334
Error típico	23.66043461
Observaciones	13

Tabla 94. Valores estadísticos del Modelo I2 (G2-142)

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 94, el modelo nos arroja un valor de R² ajustado de 0.87 y un error típico de 23.7.

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	45771.06911	22885.5346	40.88044602	1.53713E-05

Residuos	10	5598.16166	559.816166
Total	12	51369.23077	

Tabla 95. Análisis de varianza del Modelo I2 (G2-142)

Fuente: Propia

En la tabla 96, se logra calcular los valores de coeficientes para el modelo de regresión lineal múltiple del Modelo I2. Formándose la ecuación 22.

Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior	Superior	Inferior	Superior	
				95%	95%	95.0%	95.0%	
Intercepción	339.61	35.69	9.52	0.00	260.09	419.13	260.09	419.13
Variable X 1	7.23	0.89	8.10	0.00	5.24	9.22	5.24	9.22
Variable X 2	-14.57	24.61	-0.59	0.57	-69.40	40.26	-69.40	40.26

Tabla 96. Coeficientes de regresión lineal para el Modelo I2 (G2-142)

Fuente: Propia

$$co_2 = 339.61 + 7.23x_1 - 14.57x_2$$

Ec. 22

Dónde:

X1 = # personas y X2 = % Aberturas

1.3.1.3 Modelo I3 (G2-142)

Este modelo mantiene el porcentaje de aberturas igual que al modelo 2, pero adicionalmente a ello, modifica el número de personas por el logaritmo del número de personas.

REGISTRO					
Día	Horario	ítem	CO2 promedio	log(#personas)	% Aberturas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	510	1.380211242	0.85
	2:00 - 4:00	2	450	1.278753601	0.75
	6:00 - 8:00	3	500	1.361727836	0.9
4/01/2023	8:00 - 10:00	4	540	1.477121255	0.3
	12:00 - 2:00	5	650	1.579783597	0.8
	4:00 - 6:00	6	430	1.146128036	0.9
	7:00 - 9:00	7	580	1.531478917	0.2
6/01/2023	10:00 - 12:00	8	550	1.477121255	0.75
	2:00 - 4:00	9	560	1.544068044	0.8
	6:00 - 8:00	10	630	1.568201724	0.25
9/01/2023	10:00 - 12:00	11	600	1.633468456	0.75
	4:00 - 6:00	12	600	1.556302501	0.15
	6:00 - 8:00	13	530	1.447158031	0.25

Tabla 97. Registro de data del Modelo I3 (G2-142)

Fuente: Propia

Luego de aplicar el modelo de regresión lineal múltiple para las variables # de personas y % de abertura 1= 100% (totalmente abierto), 0.25= 25% (parcialmente cerrado). Se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.938985823
Coeficiente de determinación R ²	0.881694376
R ² ajustado	0.858033251
Error típico	24.65211737
Observaciones	13

Tabla 98. Valores estadísticos del Modelo I3 (G2-142)

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 98, el modelo nos arroja un valor de R² ajustado de 0.86 y un error típico de 24.7.

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	45291.96186	22645.98093	37.26341762	2.31754E-05
Residuos	10	6077.268908	607.7268908		
Total	12	51369.23077			

Tabla 99. Análisis de varianza del Modelo I3 (G2-142)

Fuente: Propia

En la tabla 100, se logra calcular los valores de coeficientes para el modelo de regresión lineal múltiple del Modelo I3. Formándose la ecuación 23.

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	-95.77	91.73	-1.04	0.32	-300.17	108.62	-300.17	108.62
Variable X 1	443.20	57.41	7.72	0.00	315.29	571.12	315.29	571.12
Variable X 2	-4.92	26.18	-0.19	0.85	-63.24	53.40	-63.24	53.40

Tabla 100. Coeficientes de regresión lineal para el Modelo I3 (G2-142)

Fuente: Propia

$$co_2 = -95.77 + 443.20 \log(x_1) - 4.92x_2 \quad \text{Ec. 23}$$

Dónde:

X1 = # personas y X2 = % Aberturas

1.3.1.4 Modelo I4 (G2-142)

Este modelo mantiene el porcentaje de aberturas igual que al modelo 2, pero adicionalmente a ello, modifica el número de personas por la raíz del número de personas.

REGISTRO					
Día	Horario	ítem	CO2 promedio	raíz (#personas)	% Aberturas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	510	4.898979486	0.85
	2:00 - 4:00	2	450	4.358898944	0.75
	6:00 - 8:00	3	500	4.795831523	0.9
4/01/2023	8:00 - 10:00	4	540	5.477225575	0.3
	12:00 - 2:00	5	650	6.164414003	0.8
	4:00 - 6:00	6	430	3.741657387	0.9
	7:00 - 9:00	7	580	5.830951895	0.2
6/01/2023	10:00 - 12:00	8	550	5.477225575	0.75
	2:00 - 4:00	9	560	5.916079783	0.8
	6:00 - 8:00	10	630	6.08276253	0.25
9/01/2023	10:00 - 12:00	11	600	6.557438524	0.75
	4:00 - 6:00	12	600	6	0.15
	6:00 - 8:00	13	530	5.291502622	0.25

Tabla 101. Registro de data del Modelo I4 (G2-142)

Fuente: Propia

Luego de aplicar el modelo de regresión lineal múltiple para las variables # de personas y % de abertura 1= 100% (totalmente abierto), 0.25= 25% (parcialmente cerrado). Se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.94483444
Coeficiente de determinación R ²	0.89271212
R ² ajustado	0.87125454
Error típico	23.4761496
Observaciones	13

Tabla 102. Valores estadísticos del Modelo I4 (G2-142)

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 102, el modelo nos arroja un valor de R² ajustado de 0.87 y un error típico de 23.5.

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	45857.93476	22928.9674	41.60358534	1.42152E-05
Residuos	10	5511.296008	551.129601		
Total	12	51369.23077			

Tabla 103. Análisis de varianza del Modelo I4 (G2-142)

Fuente: Propia

En la tabla 104, se logra calcular los valores de coeficientes para el modelo de regresión lineal múltiple del Modelo I4. Formándose la ecuación 24.

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	141.28	58.32	2.42	0.04	11.33	271.23	11.33	271.23
Variable X 1	75.94	9.29	8.17	0.00	55.23	96.65	55.23	96.65
Variable X 2	-8.80	24.69	-0.36	0.73	-63.82	46.22	-63.82	46.22

Tabla 104. Formato de presentación de Data (Salón G2-142)

Fuente: Propia

$$co_2 = 141.28 + 75.94\sqrt{x_1} - 8.80x_2$$

Ec. 24

Dónde:

X1 = # personas y X2 = % Aberturas

1.3.1.5 Modelo I5 (G2-142)

Este modelo mantiene el porcentaje de aberturas igual que al modelo 2, pero adicionalmente a ello, modifica el número de personas por el número de personas elevado al cuadrado.

REGISTRO					
Día	Horario	ítem	CO2 promedio	(#personas)^2	% Aberturas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	510	576	0.85
	2:00 - 4:00	2	450	361	0.75
	6:00 - 8:00	3	500	529	0.9
4/01/2023	8:00 - 10:00	4	540	900	0.3
	12:00 - 2:00	5	650	1444	0.8
	4:00 - 6:00	6	430	196	0.9
	7:00 - 9:00	7	580	1156	0.2
6/01/2023	10:00 - 12:00	8	550	900	0.75
	2:00 - 4:00	9	560	1225	0.8
	6:00 - 8:00	10	630	1369	0.25

9/01/2023	10:00 - 12:00	11	600	1849	0.75
	4:00 - 6:00	12	600	1296	0.15
	6:00 - 8:00	13	530	784	0.25

Tabla 105. Registro de data del Modelo I5 (G2-142)

Fuente: Propia

Luego de aplicar el modelo de regresión lineal múltiple para las variables # de personas y % de abertura 1= 100% (totalmente abierto), 0.25= 25% (parcialmente cerrado). Se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.92707616
Coeficiente de determinación R^2	0.8594702
R^2 ajustado	0.83136425
Error típico	26.8680246
Observaciones	13

Tabla 106. Valores estadísticos del Modelo I5 (G2-142)

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 106, el modelo nos arroja un valor de R^2 ajustado de 0.83 y un error típico de 26.9.

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	44150.32329	22075.1616	30.57964339	5.48078E-05
Residuos	10	7218.907481	721.890748		
Total	12	51369.23077			

Tabla 107. Análisis de varianza del Modelo I5 (G2-142)

Fuente: Propia

En la tabla 108, se logra calcular los valores de coeficientes para el modelo de regresión lineal múltiple del Modelo I5. Formándose la ecuación 25.

	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	449.49	27.68	16.24	0.00	387.82	511.15	387.82	511.15
Variable X 1	0.12	0.02	6.97	0.00	0.08	0.16	0.08	0.16
Variable X 2	-29.25	27.28	-1.07	0.31	-90.04	31.53	-90.04	31.53

Tabla 108. Formato de presentación de Data (Salón G2-142)

Fuente: Propia

$$co_2 = 449.49 + 0.12x_1^2 - 29.25x_2$$

Ec. 25

Dónde:

X1 = # personas y X2 = % Aberturas

1.3.1.6 Resumen de modelos iniciales (G2-142)

Nº	Modelo	R2 ajustado	Error
1	CO2= 336.74 + 7.25*X1 - 10.31*X2	0.871	23.440
2	CO2= 339.61 + 7.23*X1 - 14.57*X2	0.869	23.660
3	CO2= -95.77 + 443.20*log(X1) - 4092*X2	0.858	24.652
4	CO2= 141.28 + 75.94*√X1 - 8.80*X2	0.871	23.476
5	CO2= 449.49 + 0.12*(X1)^2 - 29.25*X2	0.831	26.868

Tabla 109. Formato de presentación de Data (Salón G2-142)

Fuente: Propia

De la tabla resumen se puede observar que el modelo nº1 presentado para el caso inicial, cuenta con un mejor R2 ajustado de 0.871 y un error menor de 23.440 a diferencia de los demás casos. Sin embargo, los coeficientes encontrados tienen un bajo valor de incidencia en el modelo.

Las incidencias del número de personas por un factor de 7.23 es muy bajo, de igual manera el factor de -10.31 para el caso de las aberturas.

Por el contrario, el modelo 2 tiene un mejor factor de incidencia para las variables de número personas y sobre todo la variable de abertura.

Utilizando un dato de ejemplo, para un valor de X1= 38, X2=0.8 y CO2 real= 650. Remplazando en el modelo se tendrían lo siguiente:

$$\text{CO2 teórico} = 339.61 + 7.23*38 - 14.57*0.8 = 602.66$$

Debido a esto, se proponer mejorar los valores de CO2 establecidos que se obtuvieron de las mediciones, para ello se propuso trabajar con una tabla de rangos y frecuencias, para poder obtener un valor de CO2 promedio más acorde a los datos obtenidos

1.3.2 Modelos de regresión final (G2-142)

Para la elaboración de estos modelos, se obtuvo la cantidad de CO2 mediante la creación de una tabla de frecuencias con los rangos de CO2 obtenidos. Se

empleó el valor de CO₂ más representativo, determinado según los porcentajes de frecuencia encontrados. Posteriormente, estos valores fueron correlacionados con la cantidad de personas presentes en el espacio y el porcentaje de apertura de puertas y ventanas, ya que esto generaba una variación en la cantidad de CO₂ establecida.

Como se podrá observar en la figura 9, se muestra una buena correlación entre la cantidad de CO₂.

REGISTRO				
Día	Horario	ítem	CO ₂ promedio	# personas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	510	24
	2:00 - 4:00	2	450	19
	6:00 - 8:00	3	500	23
4/01/2023	8:00 - 10:00	4	680	30
	12:00 - 2:00	5	620	38
	4:00 - 6:00	6	430	14
	7:00 - 9:00	7	700	34
6/01/2023	10:00 - 12:00	8	550	30
	2:00 - 4:00	9	560	35
	6:00 - 8:00	10	750	37
9/01/2023	10:00 - 12:00	11	600	43
	4:00 - 6:00	12	730	36
	6:00 - 8:00	13	550	28

Tabla 110. Registro de CO₂ promedio y #personas (Salón G2-142)

Fuente: Propia

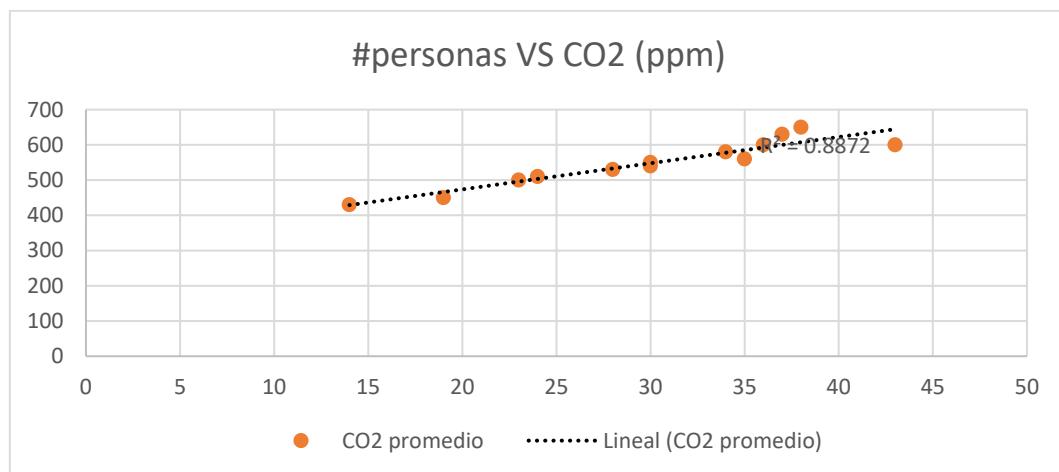


Figura 9. Correlación de # personas vs CO₂ (Salón G2-142)

Fuente: Propia

Una vez verificada esta buena correlación entre la variable # de personas y el valor promedio de CO₂ medido, se procede a generar cinco (05) modelos, teniendo en cuenta la consideración de los “**modelos de regresión final**”

1.3.2.1 Modelo F1 (G2-142)

Considerando el porcentaje de aberturas de puertas y ventanas, como 1: totalmente abierto y 0: totalmente cerrado.

REGISTRO					
Día	Horario	ítem	CO ₂ promedio	# personas	% Aberturas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	510	24	1
	2:00 - 4:00	2	450	19	1
	6:00 - 8:00	3	500	23	1
4/01/2023	8:00 - 10:00	4	680	30	0
	12:00 - 2:00	5	620	38	1
	4:00 - 6:00	6	430	14	1
	7:00 - 9:00	7	700	34	0
6/01/2023	10:00 - 12:00	8	550	30	1
	2:00 - 4:00	9	560	35	1
	6:00 - 8:00	10	750	37	0
9/01/2023	10:00 - 12:00	11	600	43	1
	4:00 - 6:00	12	730	36	0
	6:00 - 8:00	13	550	28	0

Tabla 111. Registro de data del Modelo F1 (G2-142)

Fuente: Propia

Luego de aplicar el modelo de regresión lineal múltiple para las variables # de personas y % de abertura (1: totalmente abierto y 0: totalmente cerrado), Se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.94342563
Coeficiente de determinación R ²	0.89005192
R ² ajustado	0.86806231
Error típico	37.8175984
Observaciones	13

Tabla 112. Valores estadísticos del Modelo F1 (G2-142)

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 112, el modelo nos arroja un valor de R² ajustado de 0.87 y un error típico de 37.8.

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	115775	57887.6078	40.47601161	1.60671E-05
Residuos	10	14302	1430.170748		
Total	12	130077			

Tabla 113. Análisis de varianza del Modelo F1 (G2-142)

Fuente: Propia

En la tabla 114, se logra calcular los valores de coeficientes para el modelo de regresión lineal múltiple (Modelo F1). Formándose la ecuación 26.

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	434.99	48.45	8.98	0.00	327.04	542.95	327.04	542.95
Variable X 1	7.49	1.38	5.44	0.00	4.42	10.55	4.42	10.55
Variable X 2	-118.95	22.53	-5.28	0.00	-169.14	-68.75	-169.14	-68.75

Tabla 114. Coeficientes de regresión lineal para el Modelo F1 (G2-142)

Fuente: Propia

$$co_2 = 434.99 + 7.49x_1 - 118.95x_2$$

Ec. 26

Dónde:

X1 = # personas y X2 = % Aberturas

1.3.2.2 Modelo F2 (G2-142)

Considerando el % de aberturas como 1= 100%, 0.8= 80%, 0.25= 25% de esta manera se tiene una mayor precisión en cuanto a esta variable.

REGISTRO					
Día	Horario	ítem	CO2 promedio	# personas	% Aberturas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	510	24	0.85
	2:00 - 4:00	2	450	19	0.75
	6:00 - 8:00	3	500	23	0.9
4/01/2023	8:00 - 10:00	4	680	30	0.3
	12:00 - 2:00	5	620	38	0.8
	4:00 - 6:00	6	430	14	0.9
	7:00 - 9:00	7	700	34	0.2
6/01/2023	10:00 - 12:00	8	550	30	0.75
	2:00 - 4:00	9	560	35	0.8
	6:00 - 8:00	10	750	37	0.25

9/01/2023	10:00 - 12:00	11	600	43	0.75
	4:00 - 6:00	12	730	36	0.15
	6:00 - 8:00	13	550	28	0.25

Tabla 115. Registro de data del Modelo F2 (G2-142)

Fuente: Propia

Luego de aplicar el modelo de regresión lineal múltiple para las variables # de personas y % de abertura (1= 100% (totalmente abierto), 0.25= 25% (parcialmente cerrado). Se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.933882291
Coeficiente de determinación R ²	0.872136134
R ² ajustado	0.846563361
Error típico	40.78251867
Observaciones	13

Tabla 116. Valores estadísticos del Modelo F2 (G2-142)

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 116, el modelo nos arroja un valor de R² ajustado de 0.85 y un error típico de 40.8.

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	113444.7848	56722.3924	34.10408897	3.41774E-05
Residuos	10	16632.13829	1663.21383		
Total	12	130076.9231			

Tabla 117. Análisis de varianza del Modelo F2 (G2-142)

Fuente: Propia

En la tabla 118, se logra calcular los valores de coeficientes para el modelo de regresión lineal múltiple del Modelo F2. Formándose la ecuación 27.

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	501.77	61.52	8.16	0.00	364.71	638.84	364.71	638.84
Variable X 1	6.77	1.54	4.40	0.00	3.34	10.20	3.34	10.20
Variable X 2	-201.52	42.42	-4.75	0.00	-296.03	-107.01	-296.03	-107.01

Tabla 118. Coeficientes de regresión lineal para el Modelo F2 (G2-142)

Fuente: Propia

$$co_2 = 501.77 + 6.77x_1 - 201.52x_2$$

Ec. 27

Dónde:

X1 = # personas y X2 = % Aberturas

1.3.2.3 Modelo F3 (G2-142)

Este modelo mantiene el porcentaje de aberturas igual que al modelo 2, pero adicionalmente a ello, modifica el número de personas por el logaritmo del número de personas.

REGISTRO					
Día	Horario	ítem	CO2 promedio	log(#personas)	% Aberturas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	510	1.380211242	0.85
	2:00 - 4:00	2	450	1.278753601	0.75
	6:00 - 8:00	3	500	1.361727836	0.9
4/01/2023	8:00 - 10:00	4	680	1.477121255	0.3
	12:00 - 2:00	5	620	1.579783597	0.8
	4:00 - 6:00	6	430	1.146128036	0.9
	7:00 - 9:00	7	700	1.531478917	0.2
6/01/2023	10:00 - 12:00	8	550	1.477121255	0.75
	2:00 - 4:00	9	560	1.544068044	0.8
	6:00 - 8:00	10	750	1.568201724	0.25
9/01/2023	10:00 - 12:00	11	600	1.633468456	0.75
	4:00 - 6:00	12	730	1.556302501	0.15
	6:00 - 8:00	13	550	1.447158031	0.25

Tabla 119. Registro de data del Modelo F3 (G2-142)

Fuente: Propia

Luego de aplicar el modelo de regresión lineal múltiple para las variables # de personas y % de abertura 1= 100% (totalmente abierto), 0.25= 25% (parcialmente cerrado). Se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.929207574
Coeficiente de determinación R ²	0.863426716
R ² ajustado	0.836112059
Error típico	42.14858546
Observaciones	13

Tabla 120. Valores estadísticos del Modelo F3 (G2-142)

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 120, el modelo nos arroja un valor de R² ajustado de 0.84 y un error típico de 42.1.

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	112311.8905	56155.94526	31.61038127	4.75148E-05
Residuos	10	17765.03256	1776.503256		
Total	12	130076.9231			

Tabla 121. Análisis de varianza del Modelo F3 (G2-142)

Fuente: Propia

En la tabla 122, se logra calcular los valores de coeficientes para el modelo de regresión lineal múltiple del Modelo F3. Formándose la ecuación 28.

Coeficientes	Error típico	Estadístico		Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
		t						
Intercepción	101.18	156.84	0.65	0.53	-248.28	450.64	-248.28	450.64
Variable X 1	410.62	98.15	4.18	0.00	191.92	629.31	191.92	629.31
Variable X 2	-193.39	44.75	-4.32	0.00	-293.11	-93.67	-293.11	-93.67

Tabla 122. Formato de presentación de Data (Salón G2-142)

Fuente: Propia

$$co_2 = 101.18 + 410.62 \log(x_1) - 193.39x_2 \quad \text{Ec. 28}$$

Dónde:

X1 = # personas y X2 = % Aberturas

1.3.2.4 Modelo F4 (G2-142)

Este modelo mantiene el porcentaje de aberturas igual que al modelo 2, pero adicionalmente a ello, modifica el número de personas por la raíz del número de personas.

REGISTRO					
Día	Horario	ítem	CO2 promedio	raíz (#personas)	% Aberturas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	510	4.898979486	0.85
	2:00 - 4:00	2	450	4.358898944	0.75
	6:00 - 8:00	3	500	4.795831523	0.9
4/01/2023	8:00 - 10:00	4	680	5.477225575	0.3
	12:00 - 2:00	5	620	6.164414003	0.8

	4:00 - 6:00	6	430	3.741657387	0.9
	7:00 - 9:00	7	700	5.830951895	0.2
6/01/2023	10:00 - 12:00	8	550	5.477225575	0.75
	2:00 - 4:00	9	560	5.916079783	0.8
9/01/2023	6:00 - 8:00	10	750	6.08276253	0.25
	10:00 - 12:00	11	600	6.557438524	0.75
	4:00 - 6:00	12	730	6	0.15
	6:00 - 8:00	13	550	5.291502622	0.25

Tabla 123. Registro de data del Modelo F4 (G2-142)

Fuente: Propia

Luego de aplicar el modelo de regresión lineal múltiple para las variables # de personas y % de abertura 1= 100% (totalmente abierto), 0.25= 25% (parcialmente cerrado). Se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.93285174
Coeficiente de determinación R^2	0.87021237
R^2 ajustado	0.84425484
Error típico	41.088168
Observaciones	13

Tabla 124. Valores estadísticos del Modelo F4 (G2-142)

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 124, el modelo nos arroja un valor de R² ajustado de 0.84 y un error típico de 41.1.

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	113194.5476	56597.2738	33.52447273	3.6827E-05
Residuos	10	16882.37552	1688.23755		
Total	12	130076.9231			

Tabla 125. Análisis de varianza del Modelo F4 (G2-142)

Fuente: Propia

En la tabla 126, se logra calcular los valores de coeficientes para el modelo de regresión lineal múltiple del Modelo F4. Formándose la ecuación 29.

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	318.13	102.07	3.12	0.01	90.69	545.56	90.69	545.56
Variable X 1	70.79	16.27	4.35	0.00	34.55	107.04	34.55	107.04
Variable X 2	-196.51	43.22	-4.55	0.00	292.81	-100.21	-292.81	-100.21

Tabla 126. Coeficientes de regresión lineal para el Modelo F4 (G2-142)

Fuente: Propia

$$co_2 = 318.13 + 70.79\sqrt{x_1} - 196.51x_2 \quad \text{Ec. 29}$$

Dónde:

X1 = # personas y X2 = % Aberturas

1.3.2.5 Modelo F5 (G2-142)

Este modelo mantiene el porcentaje de aberturas igual que al modelo 2, pero adicionalmente a ello, modifica el número de personas por el número de personas elevado al cuadrado.

REGISTRO					
Día	Horario	ítem	CO2 promedio	(#personas)^2	% Aberturas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	510	576	0.85
	2:00 - 4:00	2	450	361	0.75
	6:00 - 8:00	3	500	529	0.9
4/01/2023	8:00 - 10:00	4	680	900	0.3
	12:00 - 2:00	5	620	1444	0.8
	4:00 - 6:00	6	430	196	0.9
	7:00 - 9:00	7	700	1156	0.2
6/01/2023	10:00 - 12:00	8	550	900	0.75
	2:00 - 4:00	9	560	1225	0.8
	6:00 - 8:00	10	750	1369	0.25
9/01/2023	10:00 - 12:00	11	600	1849	0.75
	4:00 - 6:00	12	730	1296	0.15
	6:00 - 8:00	13	550	784	0.25

Tabla 127. Registro de data del Modelo F5 (G2-142)

Fuente: Propia

Luego de aplicar el modelo de regresión lineal múltiple para las variables # de personas y % de abertura 1= 100% (totalmente abierto), 0.25= 25% (parcialmente cerrado). Se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.92972343
Coeficiente de determinación R^2	0.86438566
R^2 ajustado	0.83726279
Error típico	42.0003525
Observaciones	13

Tabla 128. Valores estadísticos del Modelo F5 (G2-142)

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 128, el modelo nos arroja un valor de R² ajustado de 0.84 y un error típico de 42.0.

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	112436.627	56218.3135	31.86925733	4.58699E-05
Residuos	10	17640.29607	1764.02961		
Total	12	130076.9231			

Tabla 129. Análisis de varianza del Modelo F5 (G2-142)

Fuente: Propia

En la tabla 130, se logra calcular los valores de coeficientes para el modelo de regresión lineal múltiple del Modelo F5. Formándose la ecuación 30.

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	603.77	43.26	13.96	0.00	507.38	700.17	507.38	700.17
Variable X 1	0.11	0.03	4.21	0.00	0.05	0.17	0.05	0.17
Variable X 2	-214.89	42.65	-5.04	0.00	-309.91	-119.86	-309.91	-119.86

Tabla 130. Coeficientes de regresión lineal para el Modelo F5 (G2-142)

Fuente: Propia

$$co_2 = 603.77 + 0.11x_1 - 214.89x_2$$

Ec. 30

Dónde:

X1 = # personas y X2 = % Aberturas

1.3.2.6 Resumen de modelos finales (G2-142)

Nº	Modelo	R2 ajustado	Error
1	CO2= 434.99 + 7.49*X ₁ - 118.95*X ₂	0.868	37.815
2	CO2= 501.77 + 6.77*X ₁ - 201.52*X ₂	0.846	40.782

3	$CO2 = 101.18 + 410.62 * \log(X_1) - 193.39 * X_2$	0.836	42.148
4	$CO2 = 318.13 + 70.79 * \sqrt{X_1} - 196.51 * X_2$	0.844	41.088
5	$CO2 = 603.77 + 0.11 * (X_1)^2 - 214.89 * X_2$	0.837	42.000

Tabla 131. Formato de presentación de Data (Salón G2-142)

Fuente: Propia

De la tabla resumen se puede observar que el mejor modelo presentado para el caso inicial, es el modelo n°1, ya que cuenta con un mejor R^2 ajustado de 0.868 y el error es el menor a diferencia de los demás casos. Sin embargo, los coeficientes encontrados tienen un valor de incidencia bajos.

Las incidencias del número de personas multiplicado por un factor de 7.49 es bajo, de igual manera el factor de -118.95 para el caso de las aberturas.

En cambio, el modelo n°4 presenta una importante incidencia en la variable del # de personas, que en este caso viene representado por la raíz del valor multiplicado por 70.79

Utilizando un dato de ejemplo, para un valor de $X_1 = 34$ y $X_2 = 0.2$

Remplazando en el modelo se tendrían lo siguiente:

$$CO2 = 318.13 + \sqrt{34} - 196.51 * 0.2 = 671.97$$

Anexo 3.4: MODELOS DE REGRESIÓN UNIÓN

1.3.3 Modelo U1

Considerando el porcentaje de aberturas de puertas y ventanas, como 1: totalmente abierto y 0: totalmente cerrado.

REGISTRO					
Día	Horario	Ítem	CO2 promedio	# personas	%Ventanas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	450	11	1
	2:00 - 4:00	2	490	16	1
4/01/2023	10:00 - 12:00	4	570	32	1
	2:00 - 4:00	5	650	36	1
	6:00 - 8:00	6	510	22	1
6/01/2023	10:00 - 12:00	7	760	40	0
	4:00 - 6:00	8	640	32	0
9/01/2023	2:00 - 4:00	9	460	12	1
	4:00 - 6:00	10	550	32	1
3/01/2023	10:00 - 12:00	11	470	8	1
	1:00 - 4:00	12	540	18	1
4/01/2023	10:00 - 12:00	13	680	33	1
6/01/2023	10:00 - 12:00	15	590	22	1
	4:00 - 6:00	16	760	38	0
3/01/2023	10:00 - 12:00	19	510	24	1
	2:00 - 4:00	20	450	19	1
	6:00 - 8:00	21	500	23	1
4/01/2023	12:00 -2:00	23	620	38	1
	4:00 - 6:00	24	430	14	1
	7:00 - 9:00	25	700	34	0
6/01/2023	10:00 - 12:00	26	550	30	1
	2:00 - 4:00	27	560	35	1
	6:00 - 8:00	28	750	37	0
9/01/2023	10:00 - 12:00	29	600	43	1
	6:00 - 8:00	31	550	28	0

Tabla 132. Registro de data del Modelo U1

Fuente: Propia

Luego de aplicar el modelo de regresión lineal múltiple para las variables # de personas y % de abertura (1: totalmente abierto y 0: totalmente cerrado), Se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.89719983
Coeficiente de determinación R^2	0.80496754
R^2 ajustado	0.78723732
Error típico	46.0854428
Observaciones	25

Tabla 133. Valores estadísticos del Modelo U1

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 133, el modelo nos arroja un valor de R^2 ajustado de 0.79 y un error típico de 46.1.

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	192850.903	96425.4516	45.4008676	1.55302E-08
Residuos	22	46725.0968	2123.86804		
Total	24	239576			

Tabla 134. Análisis de varianza del Modelo U1

Fuente: Propia

En la tabla 135, se logra calcular los valores de coeficientes para el modelo de regresión lineal múltiple (Modelo U1). Formándose la ecuación 31.

Coeficientes	Error típico	Estadístico		Probabilidad	Inferior	Superior	Inferior	Superior
		t			95%	95%	95.0%	95.0%
Intercepción	471.21	40.86	11.53	0.00	386.47	555.94	386.47	555.94
Variable X 1	6.38	1.04	6.12	0.00	4.22	8.54	4.22	8.54
Variable X 2	-92.49	24.05	-3.85	0.00	-142.37	-42.60	-142.37	-42.60

Tabla 135. Coeficientes de regresión lineal para el Modelo U1

Fuente: Propia

$$co_2 = 471.21 + 6.38x_1 - 92.49x_2$$

Ec. 31

Dónde:

X1 = # personas y X2 = % Aberturas

1.3.4 Modelo U2

Considerando el % de aberturas como 1= 100% (totalmente abierto), 0.8= 80%, 0.25= 25% (parcialmente cerrado), de esta manera se tiene una mayor precisión en cuanto a esta variable.

REGISTRO					
Día	Horario	ítem	CO2 promedio	# personas	%Ventanas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	450	11	0.8
	2:00 - 4:00	2	490	16	0.9
4/01/2023	10:00 - 12:00	4	570	32	0.75
	2:00 - 4:00	5	650	36	0.85

	6:00 - 8:00	6	510	22	0.9
6/01/2023	10:00 - 12:00	7	760	40	0.3
	4:00 - 6:00	8	640	32	0.25
	2:00 - 4:00	9	460	12	0.85
9/01/2023	4:00 - 6:00	10	550	32	0.9
	10:00 - 12:00	11	470	8	0.85
3/01/2023	1:00 - 4:00	12	540	18	0.9
	10:00 - 12:00	13	680	33	0.75
6/01/2023	10:00 - 12:00	15	590	22	0.9
	4:00 - 6:00	16	760	38	0.3
3/01/2023	10:00 - 12:00	19	510	24	0.85
	2:00 - 4:00	20	450	19	0.75
	6:00 - 8:00	21	500	23	0.9
4/01/2023	12:00 - 2:00	23	620	38	0.8
	4:00 - 6:00	24	430	14	0.9
	7:00 - 9:00	25	700	34	0.2
6/01/2023	10:00 - 12:00	26	550	30	0.75
	2:00 - 4:00	27	560	35	0.8
	6:00 - 8:00	28	750	37	0.25
9/01/2023	10:00 - 12:00	29	600	43	0.75
	6:00 - 8:00	31	550	28	0.25

Tabla 136. Registro de data del Modelo U2

Fuente: Propia

Luego de aplicar el modelo de regresión lineal múltiple para las variables # de personas y % de abertura (1= 100% (totalmente abierto), 0.25= 25% (parcialmente cerrado). Se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.88513221
Coeficiente de determinación R ²	0.78345904
R ² ajustado	0.76377349
Error típico	48.5601867
Observaciones	25

Tabla 137. Valores estadísticos del Modelo U2

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 137, el modelo nos arroja un valor de R² ajustado de 0.76 y un error típico de 48.6.

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	187697.9818	93848.9909	39.7987023	4.90841E-08
Residuos	22	51878.01819	2358.09174		
Total	24	239576			

Tabla 138. Análisis de varianza del Modelo U2

Fuente: Propia

En la tabla 139, se logra calcular los valores de coeficientes para el modelo de regresión lineal múltiple del Modelo U2. Formándose la ecuación 32.

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	508.97	54.67	9.31	0.00	395.58	622.35	395.58	622.35
Variable X 1	6.22	1.14	5.45	0.00	3.85	8.58	3.85	8.58
Variable X 2	-149.01	44.66	-3.34	0.00	-241.64	-56.38	-241.64	-56.38

Tabla 139. Coeficientes de regresión lineal para el Modelo U2

Fuente: Propia

$$co_2 = 508.97 + 6.22x_1 - 149.01x_2$$

Ec. 32

Dónde:

X1 = # personas y X2 = % Aberturas

1.3.5 Modelo U3

Este modelo mantiene el porcentaje de aberturas igual que al modelo 2, pero adicionalmente a ello, modifica el número de personas por el logaritmo del número de personas.

REGISTRO					
Día	Horario	ítem	CO2 promedio	# personas	%Ventanas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	450	1.041392685	0.8
	2:00 - 4:00	2	490	1.204119983	0.9
4/01/2023	10:00 - 12:00	4	570	1.505149978	0.75
	2:00 - 4:00	5	650	1.556302501	0.85
	6:00 - 8:00	6	510	1.342422681	0.9
6/01/2023	10:00 - 12:00	7	760	1.602059991	0.3
	4:00 - 6:00	8	640	1.505149978	0.25
9/01/2023	2:00 - 4:00	9	460	1.079181246	0.85
	4:00 - 6:00	10	550	1.505149978	0.9

3/01/2023	10:00 - 12:00	11	470	0.903089987	0.85
	1:00 - 4:00	12	540	1.255272505	0.9
4/01/2023	10:00 - 12:00	13	680	1.51851394	0.75
6/01/2023	10:00 - 12:00	15	590	1.342422681	0.9
	4:00 - 6:00	16	760	1.579783597	0.3
3/01/2023	10:00 - 12:00	19	510	1.380211242	0.85
	2:00 - 4:00	20	450	1.278753601	0.75
	6:00 - 8:00	21	500	1.361727836	0.9
4/01/2023	12:00 -2:00	23	620	1.579783597	0.8
	4:00 - 6:00	24	430	1.146128036	0.9
	7:00 - 9:00	25	700	1.531478917	0.2
6/01/2023	10:00 - 12:00	26	550	1.477121255	0.75
	2:00 - 4:00	27	560	1.544068044	0.8
	6:00 - 8:00	28	750	1.568201724	0.25
9/01/2023	10:00 - 12:00	29	600	1.633468456	0.75
	6:00 - 8:00	31	550	1.447158031	0.25

Tabla 140. Registro de data del Modelo U3

Fuente: Propia

Luego de aplicar el modelo de regresión lineal múltiple para las variables # de personas y % de abertura 1= 100% (totalmente abierto), 0.25= 25% (parcialmente cerrado). Se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.86473416
Coeficiente de determinación R ²	0.74776517
R ² ajustado	0.72483473
Error típico	52.4098407
Observaciones	25

Tabla 141. Valores estadísticos del Modelo U3

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 141, el modelo nos arroja un valor de R² ajustado de 0.72 y un error típico de 52.4.

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	179146.589	89573.2946	32.6101555	2.62939E-07
Residuos	22	60429.4108	2746.7914		
Total	24	239576			

Tabla 142. Análisis de varianza del Modelo U3

Fuente: Propia

En la tabla 143, se logra calcular los valores de coeficientes para el modelo de regresión lineal múltiple del Modelo U3. Formándose la ecuación 33.

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	282.38	106.22	2.66	0.01	62.09	502.67	62.09	502.67
Variable X 1	291.65	61.69	4.73	0.00	163.71	419.58	163.71	419.58
Variable X 2	-166.36	47.21	-3.52	0.00	-264.27	-68.45	-264.27	-68.45

Tabla 143. Coeficientes de regresión lineal para el Modelo U3

Fuente: Propia

$$co_2 = 282.38 + 291.65\log(x_1) - 166.36x_2 \quad \text{Ec. 33}$$

Dónde:

X1 = # personas y X2 = % Aberturas

1.3.6 Modelo U4

Este modelo mantiene el porcentaje de aberturas igual que al modelo 2, pero adicionalmente a ello, modifica el número de personas por la raíz del número de personas.

REGISTRO					
Día	Horario	ítem	CO2 promedio	# personas	%Ventanas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	450	3.31662479	0.8
	2:00 - 4:00	2	490	4	0.9
4/01/2023	10:00 - 12:00	4	570	5.656854249	0.75
	2:00 - 4:00	5	650	6	0.85
	6:00 - 8:00	6	510	4.69041576	0.9
6/01/2023	10:00 - 12:00	7	760	6.32455532	0.3
	4:00 - 6:00	8	640	5.656854249	0.25
9/01/2023	2:00 - 4:00	9	460	3.464101615	0.85
	4:00 - 6:00	10	550	5.656854249	0.9
3/01/2023	10:00 - 12:00	11	470	2.828427125	0.85
	1:00 - 4:00	12	540	4.242640687	0.9
4/01/2023	10:00 - 12:00	13	680	5.744562647	0.75
6/01/2023	10:00 - 12:00	15	590	4.69041576	0.9
	4:00 - 6:00	16	760	6.164414003	0.3
3/01/2023	10:00 - 12:00	19	510	4.898979486	0.85
	2:00 - 4:00	20	450	4.358898944	0.75
	6:00 - 8:00	21	500	4.795831523	0.9
4/01/2023	12:00 - 2:00	23	620	6.164414003	0.8
	4:00 - 6:00	24	430	3.741657387	0.9

	7:00 - 9:00	25	700	5.830951895	0.2
6/01/2023	10:00 - 12:00	26	550	5.477225575	0.75
	2:00 - 4:00	27	560	5.916079783	0.8
	6:00 - 8:00	28	750	6.08276253	0.25
9/01/2023	10:00 - 12:00	29	600	6.557438524	0.75
	6:00 - 8:00	31	550	5.291502622	0.25

Tabla 144. Formato de presentación de Data (Salón G2-142)

Fuente: Propia

Luego de aplicar el modelo de regresión lineal múltiple para las variables # de personas y % de abertura 1= 100% (totalmente abierto), 0.25= 25% (parcialmente cerrado). Se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.877491754
Coeficiente de determinación R ²	0.769991778
R ² ajustado	0.749081939
Error típico	50.04745471
Observaciones	25

Tabla 145. Valores estadísticos del Modelo U4

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 145, el modelo nos arroja un valor de R² ajustado de 0.75 y un error típico de 50.0.

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	184471.55	92235.775	36.82437724	9.53185E-08
Residuos	22	55104.4499	2504.74772		
Total	24	239576			

Tabla 146. Análisis de varianza del Modelo U4

Fuente: Propia

En la tabla 147, se logra calcular los valores de coeficientes para el modelo de regresión lineal múltiple del Modelo U4. Formándose la ecuación 34.

	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Coeficientes							
Intercepción	385.70	78.79	4.90	0.00	222.30	549.11	222.30

Variable X 1	58.05	11.25	5.16	0.00	34.72	81.37	34.72	81.37
Variable X 2	-155.56	45.67	-3.41	0.00	-250.29	-60.84	-250.29	-60.84

Tabla 147. Coeficientes de regresión lineal para el Modelo U4

Fuente: Propia

$$co_2 = 385.70 + 58.05\sqrt{x_1} - 155.56x_2$$

Ec. 34

Dónde:

X1 = # personas y X2 = % Aberturas

1.3.7 Modelo U5

Este modelo mantiene el porcentaje de aberturas igual que al modelo 2, pero adicionalmente a ello, modifica el número de personas por el número de personas elevado al cuadrado.

REGISTRO					
Día	Horario	ítem	CO2 promedio	# personas	%Ventanas
3/01/2023	10:00 - 12:00	1	450	121	0.8
	2:00 - 4:00	2	490	256	0.9
4/01/2023	10:00 - 12:00	4	570	1024	0.75
	2:00 - 4:00	5	650	1296	0.85
6/01/2023	6:00 - 8:00	6	510	484	0.9
	10:00 - 12:00	7	760	1600	0.3
9/01/2023	4:00 - 6:00	8	640	1024	0.25
	2:00 - 4:00	9	460	144	0.85
3/01/2023	4:00 - 6:00	10	550	1024	0.9
	10:00 - 12:00	11	470	64	0.85
4/01/2023	1:00 - 4:00	12	540	324	0.9
	10:00 - 12:00	13	680	1089	0.75
6/01/2023	10:00 - 12:00	15	590	484	0.9
	4:00 - 6:00	16	760	1444	0.3
3/01/2023	10:00 - 12:00	19	510	576	0.85
	2:00 - 4:00	20	450	361	0.75
	6:00 - 8:00	21	500	529	0.9
4/01/2023	12:00 - 2:00	23	620	1444	0.8
	4:00 - 6:00	24	430	196	0.9
	7:00 - 9:00	25	700	1156	0.2
6/01/2023	10:00 - 12:00	26	550	900	0.75
	2:00 - 4:00	27	560	1225	0.8
	6:00 - 8:00	28	750	1369	0.25
9/01/2023	10:00 - 12:00	29	600	1849	0.75
	6:00 - 8:00	31	550	784	0.25

Tabla 148. Formato de presentación de Data (Salón G2-142)

Fuente: Propia

Luego de aplicar el modelo de regresión lineal múltiple para las variables # de personas y % de abertura 1= 100% (totalmente abierto), 0.25= 25% (parcialmente cerrado). Se obtuvieron los siguientes datos estadísticos:

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.88677896
Coeficiente de determinación R^2	0.78637692
R^2 ajustado	0.76695664
Error típico	48.2319029
Observaciones	25

Tabla 149. Valores estadísticos del Modelo U5

Fuente: Propia

Como se puede observar en la tabla 149, el modelo nos arroja un valor de R² ajustado de 0.77 y un error típico de 48.2.

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	188397.038	94198.519	40.4925644
Residuos	22	51178.9621	2326.31646	
Total	24	239576		

Tabla 150. Análisis de varianza del Modelo U5

Fuente: Propia

En la tabla 151, se logra calcular los valores de coeficientes para el modelo de regresión lineal múltiple del Modelo U5. Formándose la ecuación 35.

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	576.25	44.17	13.05	0.00	484.65	667.85	484.65	667.85
Variable X 1	0.12	0.02	5.51	0.00	0.08	0.17	0.08	0.17
Variable X 2	-148.13	44.39	-3.34	0.00	-240.18	-56.08	-240.18	-56.08

Tabla 151. Coeficientes de regresión lineal para el Modelo U5

Fuente: Propia

$$co_2 = 576.25 + 0.12x_1^2 - 148.13x_2$$

Ec. 35

Dónde:

X1 = # personas y X2 = % Aberturas

1.3.8 Resumen de modelos (Unión)

Nº	Modelo	R2 ajustado	Error
1	$CO2 = 471.21 + 6.38*X_1 - 92.49*X_2$	0.787	46.085
2	$CO2 = 508.97 + 6.22*X_1 - 149.01*X_2$	0.763	48.560
3	$CO2 = 282.38 + 291.65*\log(X_1) - 166.36*X_2$	0.728	52.409
4	$CO2 = 385.70 + 58.05*\sqrt{X_1} - 155.56*X_2$	0.749	50.047
5	$CO2 = 603.77 + 0.11*(X_1)^2 - 214.89*X_2$	0.766	48.231

Tabla 152. Formato de presentación de Data (Unión)

Fuente: Propia

De la tabla resumen se puede observar que el mejor modelo presentado para el caso de los modelos unidos es el modelo nº1, ya que cuenta con un mejor R^2 ajustado de 0.787 y el error es el menor a diferencia de los demás casos. Además, los coeficientes e incidencias generados por las variables # de personas y % de aberturas tienen muy buena coincidencia con los valores reales de CO2.

A continuación, se muestran los mejores modelos encontrados en este capítulo de análisis de datos.

Ambiente	Tipo de Análisis	Nº	Modelo	R2 ajustado	Error
G2-122	R.Inicial	5	$CO2 = 462.67 + 0.15*(X_1)^2 - 26.41*X_2$	0.91	24.79
	R.Final	4	$CO2 = 386.94 + 62.23*\sqrt{X_1} - 177.52*X_2$	0.88	36.57
G2-130	R.Inicial	2	$CO2 = 406.45 + 9.28*X_1 - 22.95*X_2$	0.97	19.54
	R.Final	3	$CO2 = 490.89 + 207.87*\log(X_1) - 229.12*X_2$	0.87	23.66
G2-142	R.Inicial	2	$CO2 = 339.61 + 7.23*X_1 - 14.57*X_2$	0.84	41.09
	R.Final	4	$CO2 = 318.13 + 70.79*\sqrt{X_1} - 196.51*X_2$	0.79	46.09
UNIÓN	-	1	$CO2 = 471.21 + 6.38*X_1 - 92.49*X_2$	0.79	46.09

Nota: R. Inicial: Valores de CO2 promedios; R. Final: Valores de CO2 obtenidos por tablas de frecuencias en consideración a los valores más recurrentes.

Tabla 153. Formato de presentación de Data (Unión)

Fuente: Propia

2. REGISTROS FOTOGRÁFICOS

2.1 G2-122

Se puede apreciar las aberturas abiertas / cerradas, la Presencia de personas y la ubicación donde estas se concentran.



Figura 10. Distribución del salón G2-122

Fuente: Propia

2.2 G2-130

Se puede apreciar las aberturas abiertas / cerradas, la Presencia de personas y la ubicación donde estas se concentran.



Figura 11. Distribución del salón G2-130

Fuente: Propia

2.3 G2-142

Se puede apreciar las aberturas abiertas / cerradas, la Presencia de personas y la ubicación donde estas se concentran.



Figura 12. Distribución del salón G2-142

Fuente: Propia

**ANEXO 04:
ENCUESTA DEL CONFORT DE USUARIO Y JUICIO DE
EXPERTOS**

Figura 1

Diagrama de barras en base a respuestas de la pregunta 1.

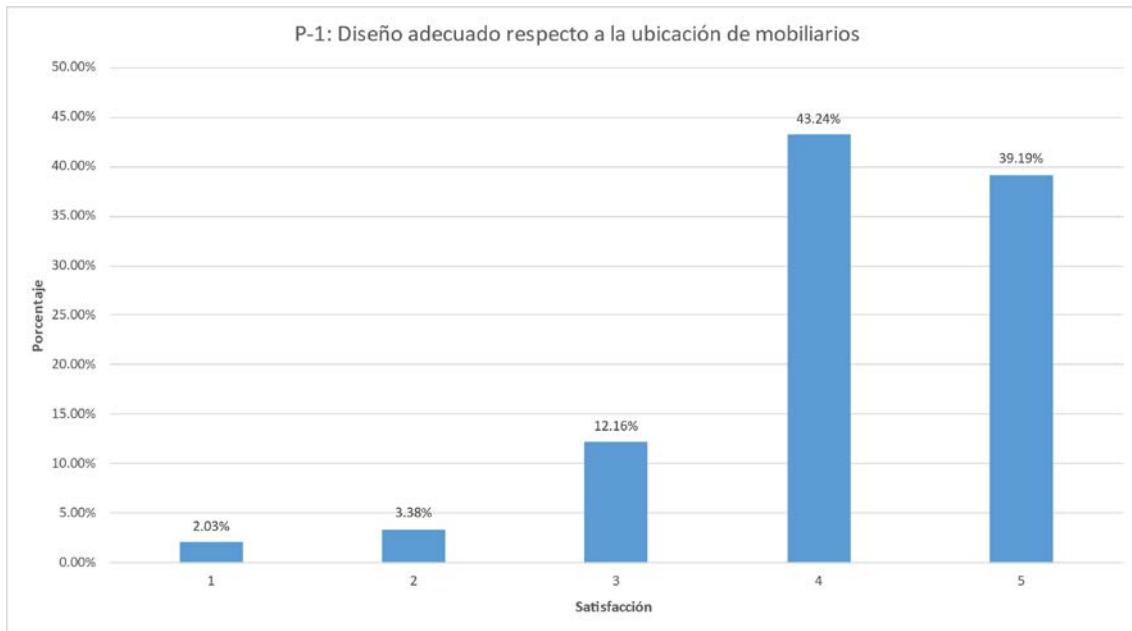


Figura 2

Diagrama de barras en base a respuestas de la pregunta 2.

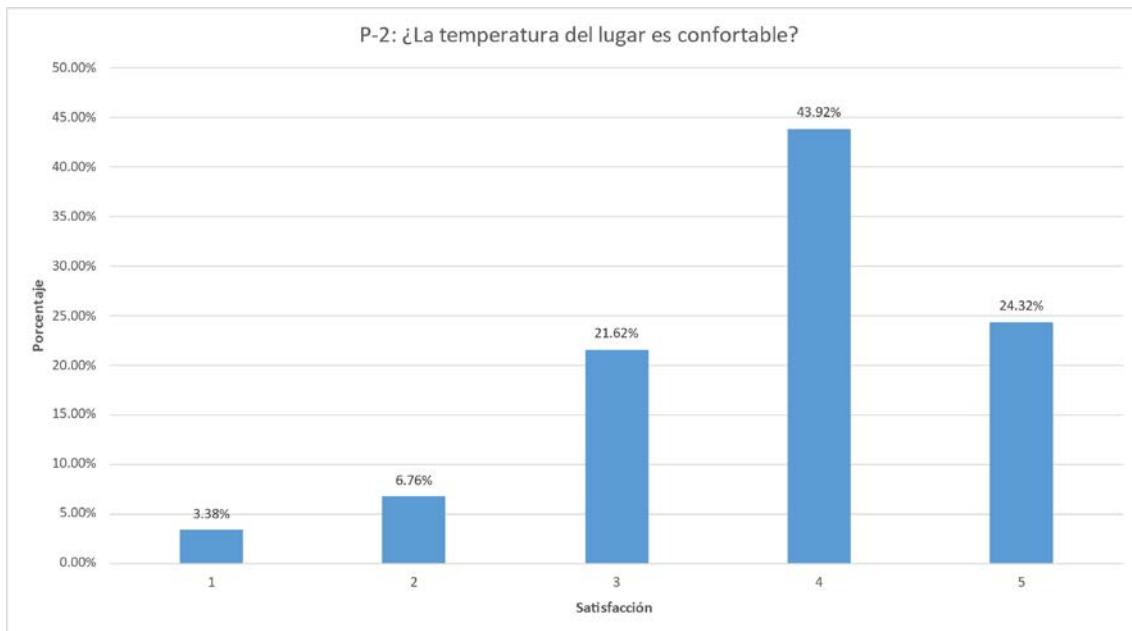


Figura 3

Diagrama de barras en base a respuestas de la pregunta 3.

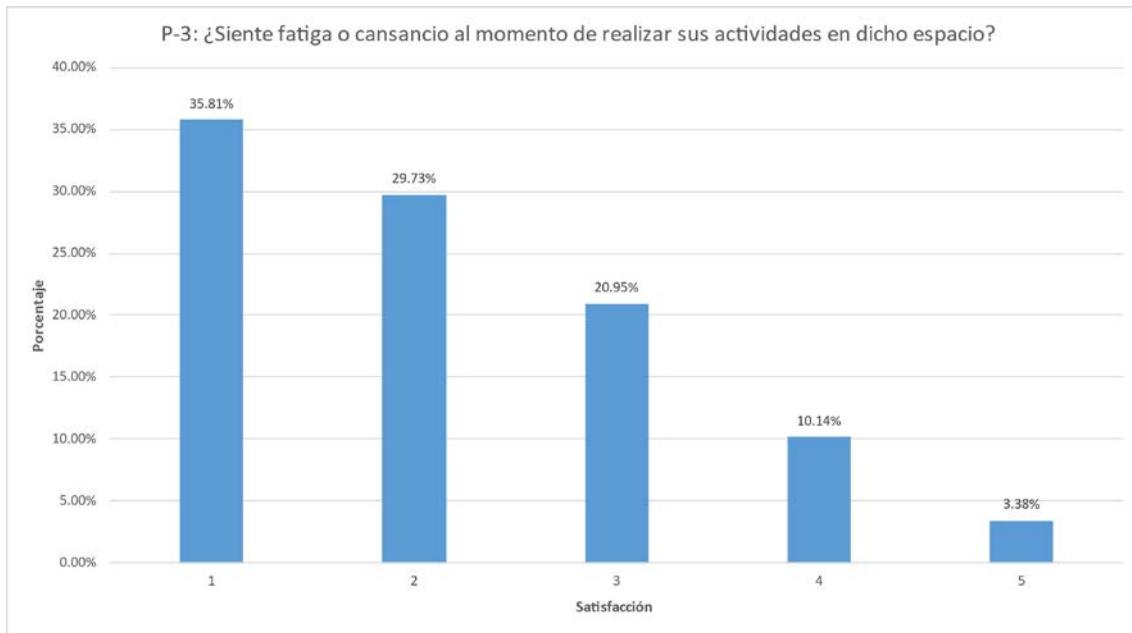


Figura 4

Diagrama de barras en base a respuestas de la pregunta 4.

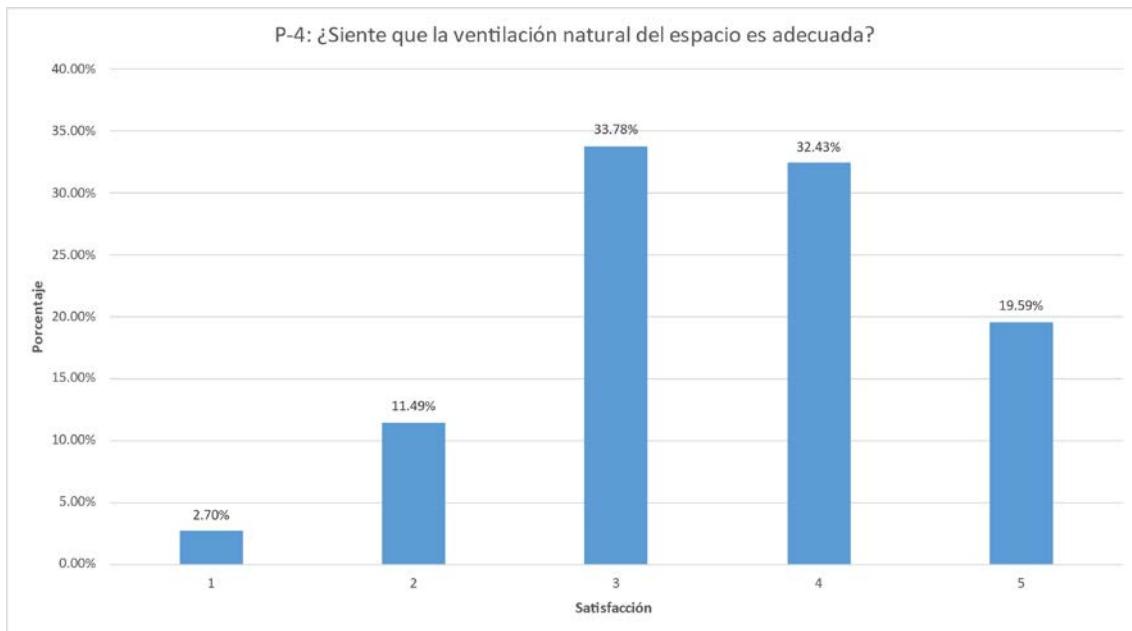


Figura 5

Diagrama de barras en base a respuestas de la pregunta 5.

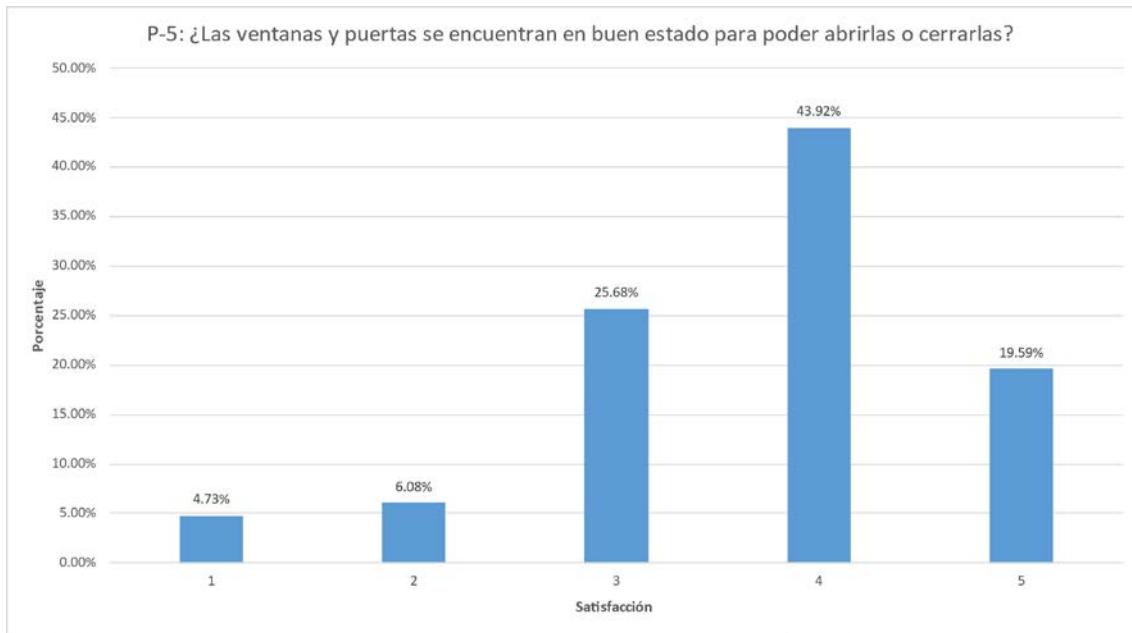


Figura 6

Diagrama de barras en base a respuestas de la pregunta 6.

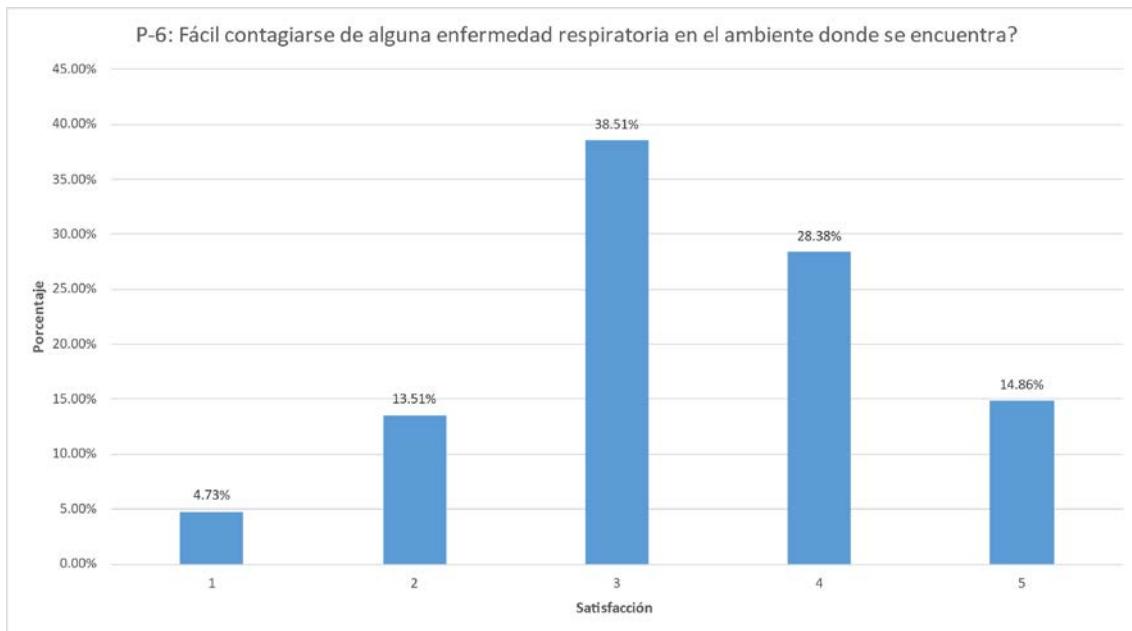


Figura 7

Diagrama de barras en base a respuestas de la pregunta 7.

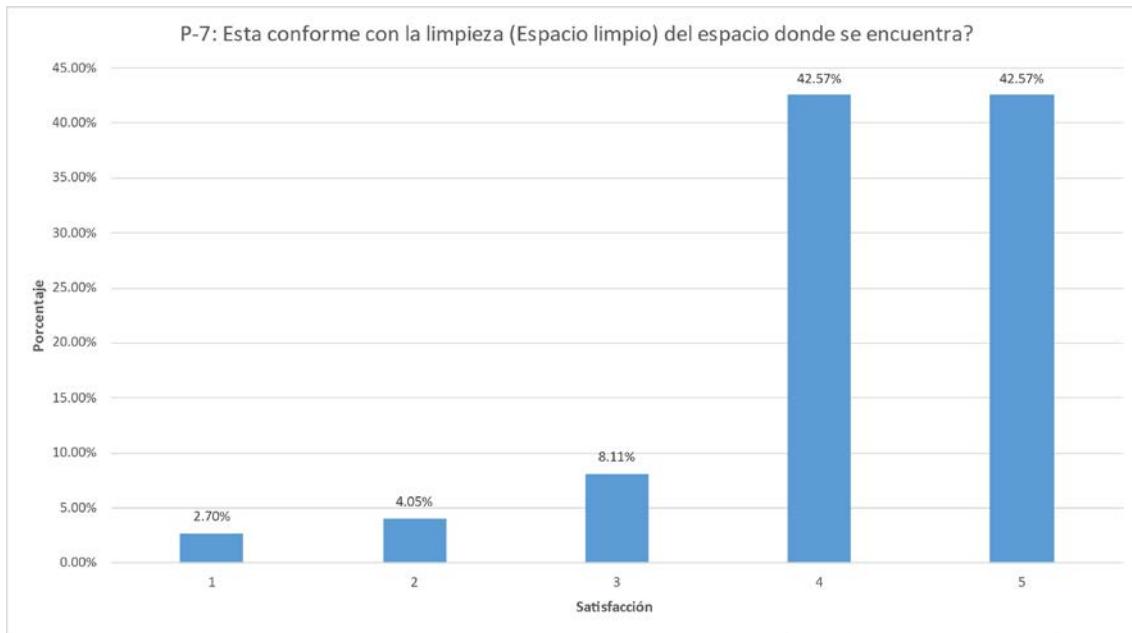


Figura 8

Diagrama de barras en base a respuestas de la pregunta 8.

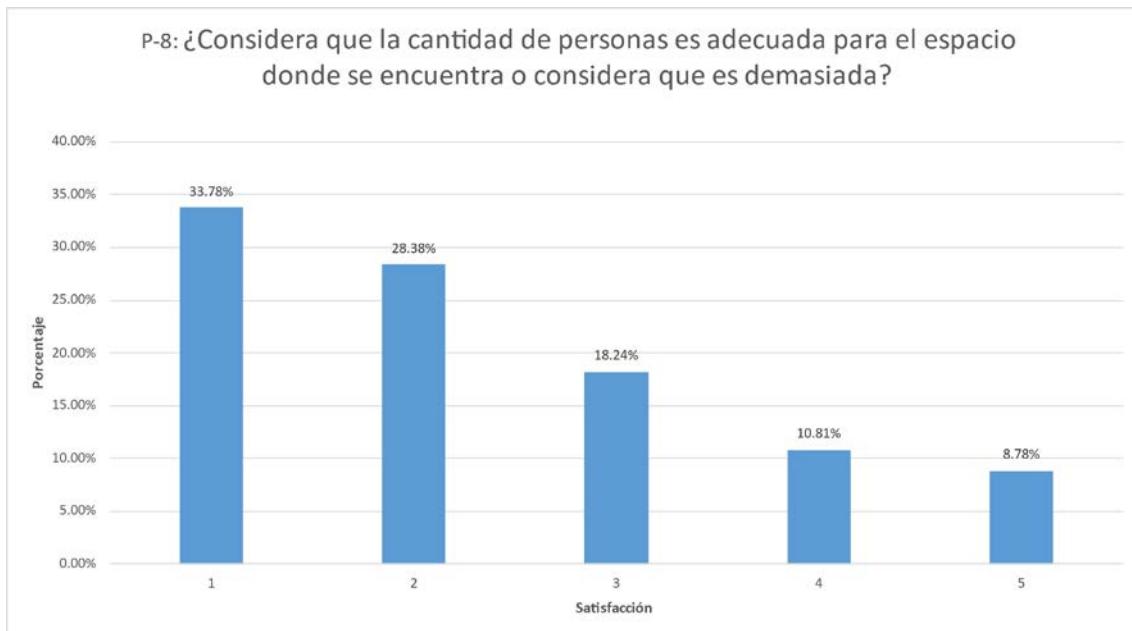


Figura 9

Diagrama de barras en base a respuestas de la pregunta 9.

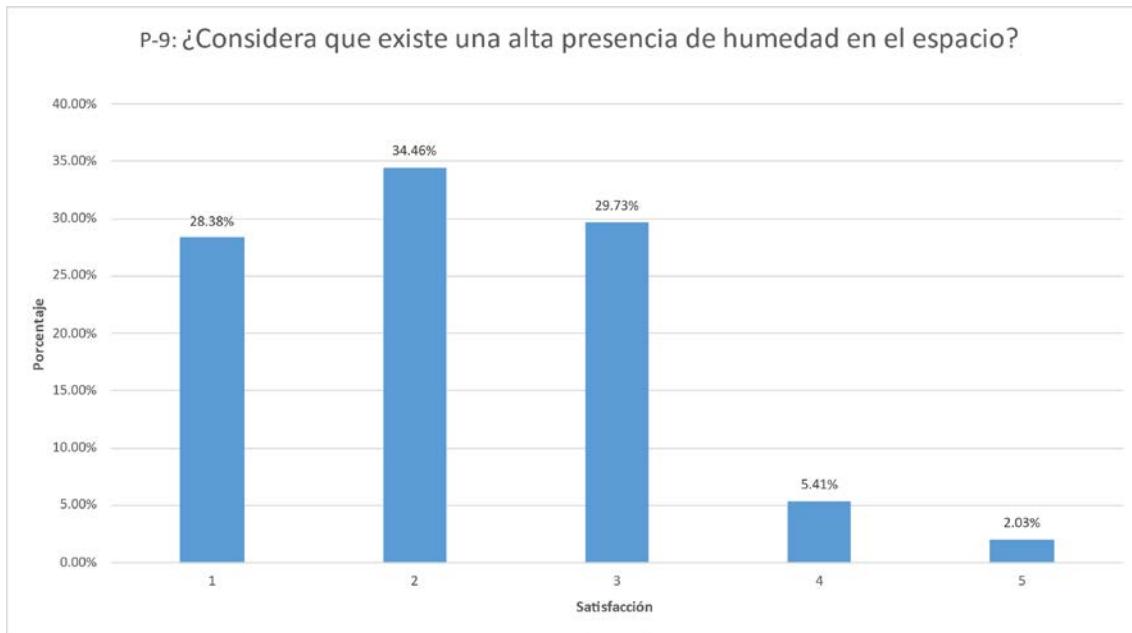


Figura 20

Diagrama de barras en base a respuestas de la pregunta 10.

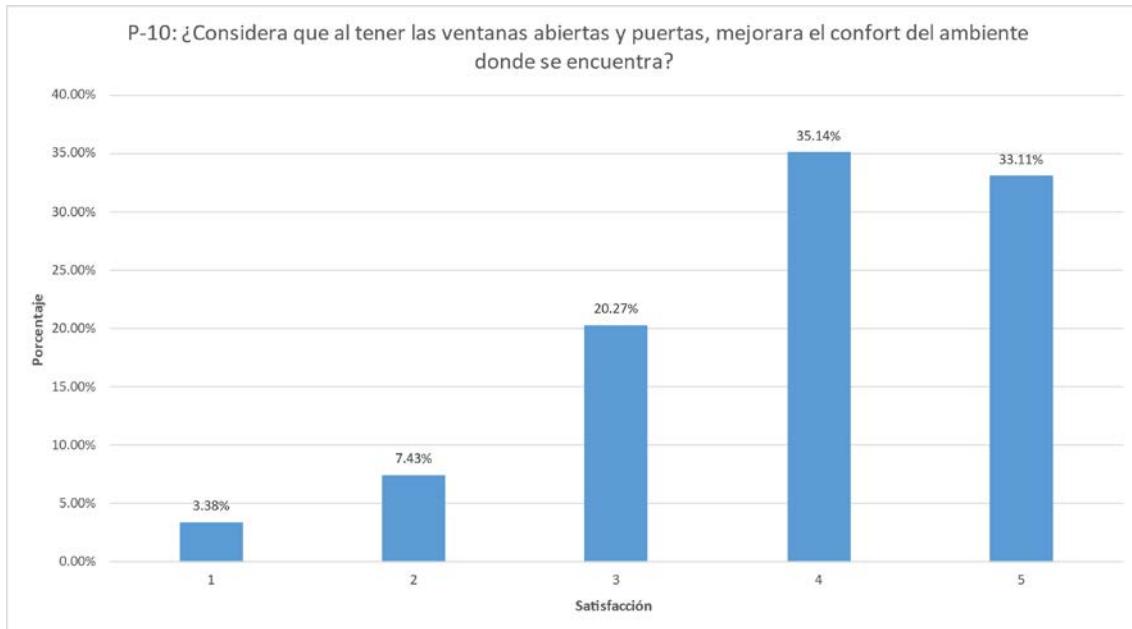


Figura 31

Diagrama de barras en base a respuestas de la pregunta 11.

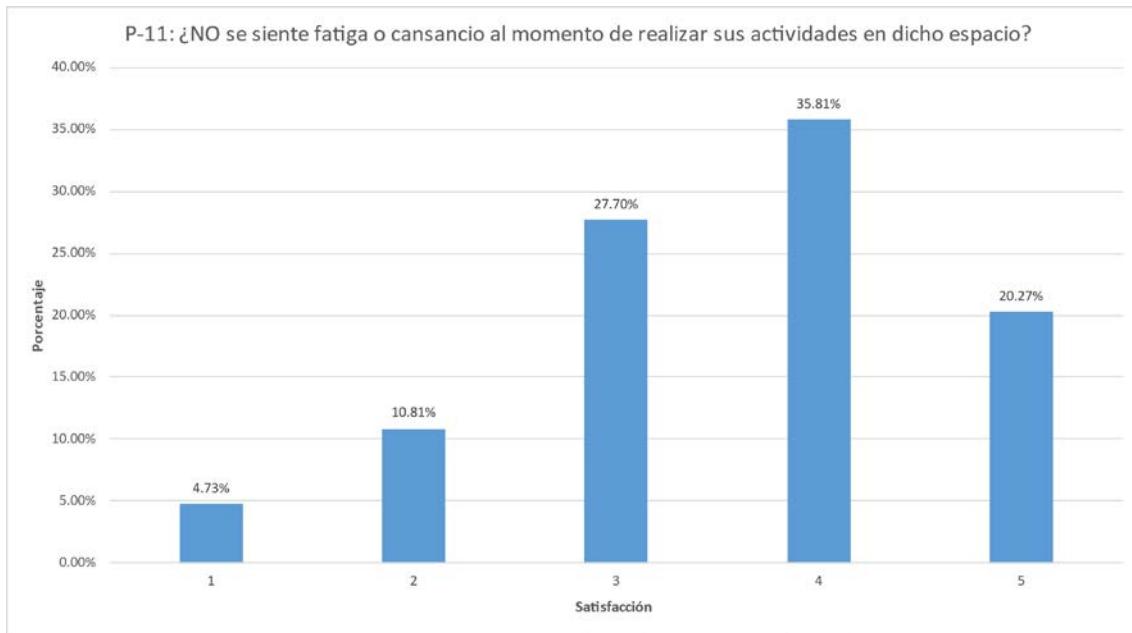


Figura 42

Diagrama de barras en base a respuestas de la pregunta 12.

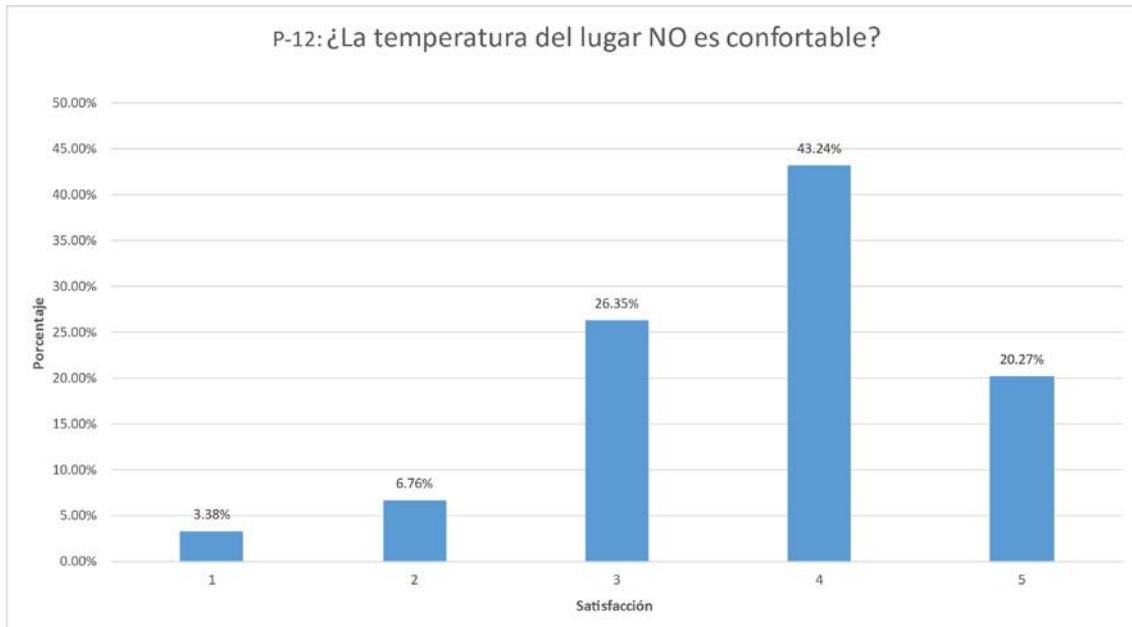


Figura 53

Diagrama de barras en base a respuestas de la pregunta 13.

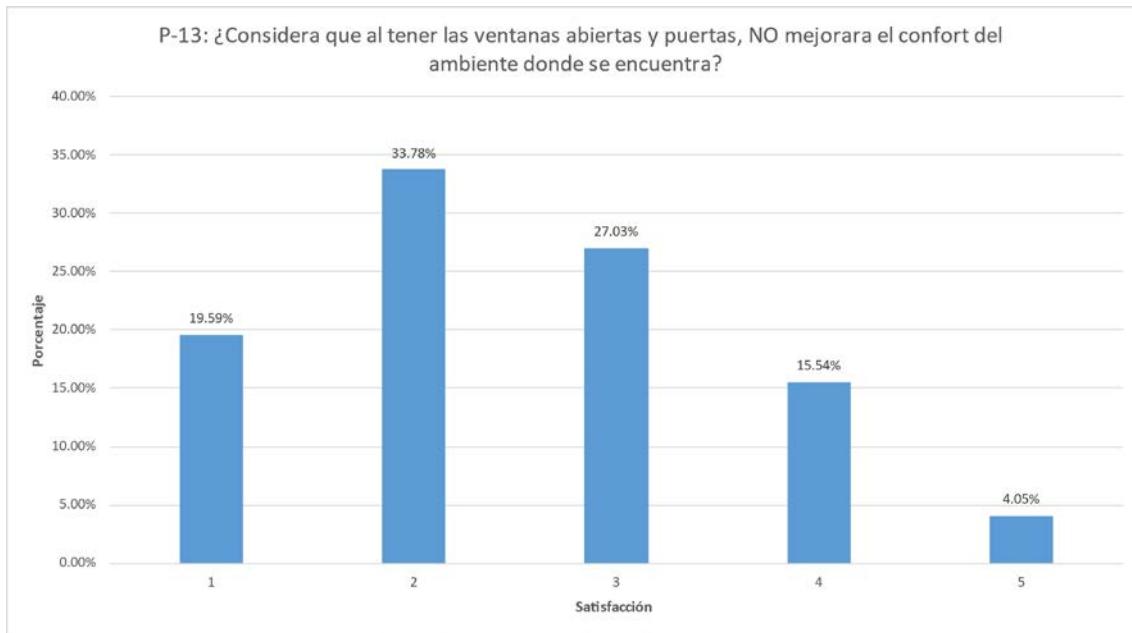
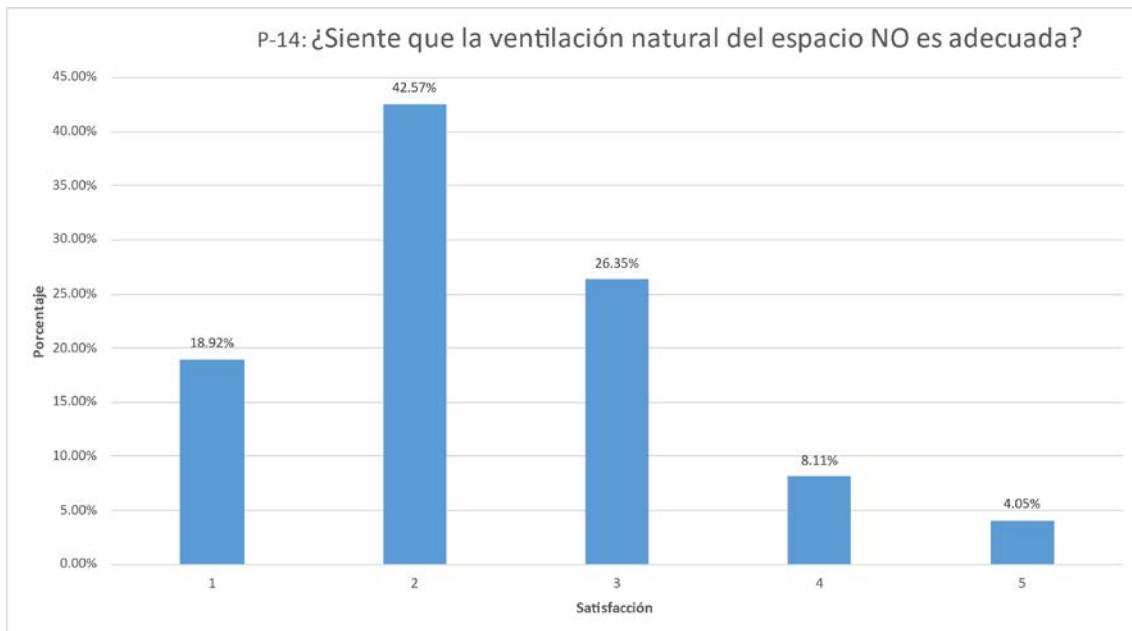


Figura 64

Diagrama de barras en base a respuestas de la pregunta 14.



JUICIO DE EXPERTOS - CERTIFICACIONES SOSTENIBLES

Nombre: MSC. ING. Edward Santa María Dávila

- 1. ¿Considera que “¿EL FLUJO DE AIRE POR MARCOS DE PUERTAS Y VENTANAS” influye en las condiciones de confort por temperatura, humedad y CO2 en el aire? ¿Por qué?**

Sí influye, sobre todo si existen condiciones muy diferentes en el exterior. Por ejemplo, si existe mayor, menor temperatura, o mayor humedad en el exterior. Si existe climatización interior (temperatura y humedad), puede generar un cambio. El cambio puede ser significativo a mayor diferencia entre interior y exterior. Sin embargo, no se ha considerado como una variable debido a que no hay mayor diferencia de temperatura entre ambientes exteriores e interiores.

- 2. ¿Considera que un “¿SALÓN CON CORTINAS Y SIN CORTINAS” influye en las condiciones de confort por temperatura, humedad y CO2 en el aire? ¿Por qué?**

Sí influyen. Las cortinas funcionarán como barreras débiles. Si no existen diferencias con el exterior, pueden ralentizar la conectividad entre el ambiente interior y el exterior. Que es el caso de esta investigación.

- 3. ¿Considera que la estación de “¿VERANO O INVIERNO” influye en las condiciones de confort por temperatura, humedad y CO2 en el aire? ¿Por qué?**

Sí, cuando existen grandes diferencias de temperaturas. Sin embargo, dependerá de la ubicación geográfica. En ciudades como Lima, las temperaturas de verano e invierno no son extremas.

Nombre: Ing. Marck Regalado Espinoza

- 1. ¿Considera que “¿EL FLUJO DE AIRE POR MARCOS DE PUERTAS Y VENTANAS” influye en las condiciones de confort por temperatura, humedad y CO2 en el aire? ¿Por qué?**

No. Si bien son pequeños flujos de energía que salen por estos pequeños orificios, valdría más la pena analizarlos en ambientes con temperaturas controladas donde estos causen pérdidas energéticas (ej. al tener aire acondicionado o calefacción), lo cual no es el caso del análisis. Además, el área del flujo del aire que generen resulta poco significativa comparada con el área de las aberturas (puertas y ventanas).

- 2. ¿Considera que un “¿SALÓN CON CORTINAS Y SIN CORTINAS” influye en las condiciones de confort por temperatura, humedad y CO2 en el aire? ¿Por qué?**

No. Se asume que, si en un ambiente se desean abrir las ventanas, al mismo tiempo se abren las cortinas, y viceversa. De esta manera, los flujos de aire se mantienen así haya o no cortinas. La diferencia sería en un ambiente con ventanas y cortinas cerradas, influiría en los niveles de iluminación natural que percibiría el ambiente, lo cual no es parte del alcance de este trabajo. Asimismo, al tener cortinas y no darle mantenimiento, influiría en los niveles de polvo en el aire, lo cual tampoco es parte del alcance de este trabajo.

- 3. ¿Considera que la estación de “¿VERANO O INVIERNO” influye en las condiciones de confort por temperatura, humedad y CO2 en el aire? ¿Por qué?**

No. Se recomienda que sea indistinto. Al tener condiciones climáticas tan variables en Lima, no considero importante tomar como variable la estación del año, solo los rangos de temperatura, humedad y CO2.

**ANEXO 05:
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL VENTILADOR**



Configuración modelo HXM-400



Cable de conexión incorporado

Motor protegido contra la corrosión con pintura poliéster.

Cable de conexión de 50 cm que facilita la instalación (excepto modelo HXM-400).



Modelo HXM-400

Caja de bornes con condensador incorporado.

Ventiladores helicoidales murales fabricados con marco de acero galvanizado y hélices de aluminio (modelos 200 a 350) o de chapa de acero (modelo 400). Marcos y hélices están protegidos con pintura poliéster anticorrosiva.

Motor

Modelos HXM-200 a HXM-350:
Motor monofásico 220/240V-50/60Hz, IP54, Clase B, regulable por variación de tensión, con protector térmico, rodamientos a bolas y cable de conexión de 50 cm.

Modelo HXM-400:
Motor monofásico 230V-50/60Hz, de rotor exterior, IP44, Clase F, con protector térmico de rearne automático, rodamientos a bolas y caja de bornes con condensador incorporado.
Sin cable de conexión incorporado.

Otros datos

Sentido del aire Motor-Hélice (flujo A).



VENTILADORES HELICOIDALES MURALES

Serie HXM



CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Es imprescindible comprobar que las características eléctricas (voltaje, intensidad, frecuencia, etc.) del motor que aparecen en la placa del mismo son compatibles con las de la instalación.

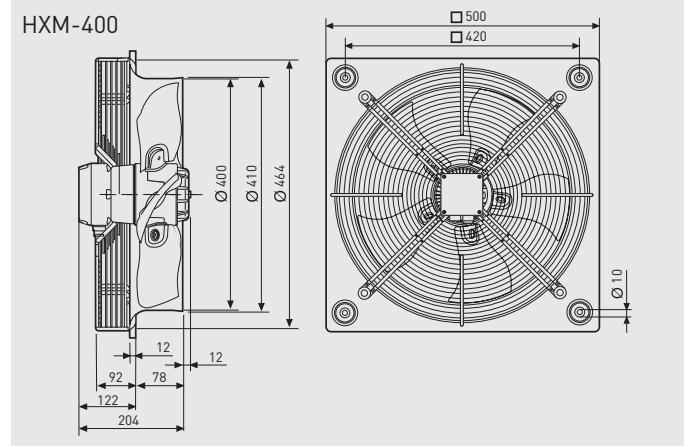
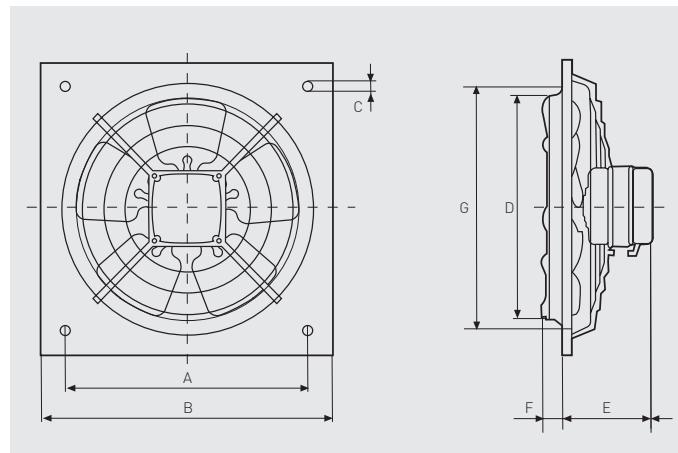
Modelo	Velocidad (r.p.m.)	Ø Boca (mm)	Potencia absorbida máxima (W)	Intensidad absorbida máxima (A)	Nivel de presión sonora* (dB(A))	Caudal máximo (m³/h)	Temperatura de trabajo (°C)	Peso (kg)	Regulador de tensión opcional	
									REB	RMB
HXM-200	1350	200	19	0,1	39	470	-15/+40	1,8	REB-1N	RMB-1,5
HXM-250	1380	250	30	0,1	48	810	-15/+40	2,4	REB-1N	RMB-1,5
HXM-300	1360	300	41	0,2	48	1.180	-15/+40	3,2	REB-1N	RMB-1,5
HXM-350	1340	350	52	0,2	51	1.680	-15/+40	4,3	REB-1N	RMB-1,5
HXM-400	1255	400	151	0,7	56	3.670	-40/+60	9,0	REB-1N	RMB-1,5

* Nivel de presión sonora medido en campo libre a 1,5 m.

CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS

Modelo	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000	LwA
HXM-200	27	42	48	49	47	45	37	30	54
HXM-250	30	46	55	60	54	51	45	35	62
HXM-300	32	44	53	59	55	53	46	34	62
HXM-350	37	55	60	61	58	56	50	39	66
HXM-400	43	61	63	63	64	63	58	50	70

DIMENSIONES (mm)



Modelo	A	B	C	D	E	F	G
HXM-200	222,5	266	9,5	205	88	19,5	211
HXM-250	275,5	333	9,5	255	99	31,5	261
HXM-300	336,5	400	10,5	305	99	35,5	311
HXM-350	390,5	465	10,5	361	106	34,5	371

CURVAS CARACTERÍSTICAS

- p_{sf} : Presión estática en Pa y mmcdpa
- q_v : Caudal en m^3/h y m^3/s
- p_g : Pérdida de carga de la defensa en Pa
- SFP: Factor específico de potencia en $\text{W}/\text{m}^3/\text{s}$
- P: Potencia absorbida en W
- Categoría de medición: A
- Categoría de eficiencia: estática.
- Eficiencia del ventilador sin mando de regulación de velocidad.
- Pruebas efectuadas con el ventilador sin defensa (HXM-400).
- Caudal de acuerdo a la Norma ISO 5801.
- Nivel de presión sonora en dB(A), medido en campo libre a una distancia de 1,5 m.

MC Categoría de medición

EC Categoría de eficiencia

VSD Mando de regulación de velocidad:
debe suministrarse con el ventilador

SR Relación específica

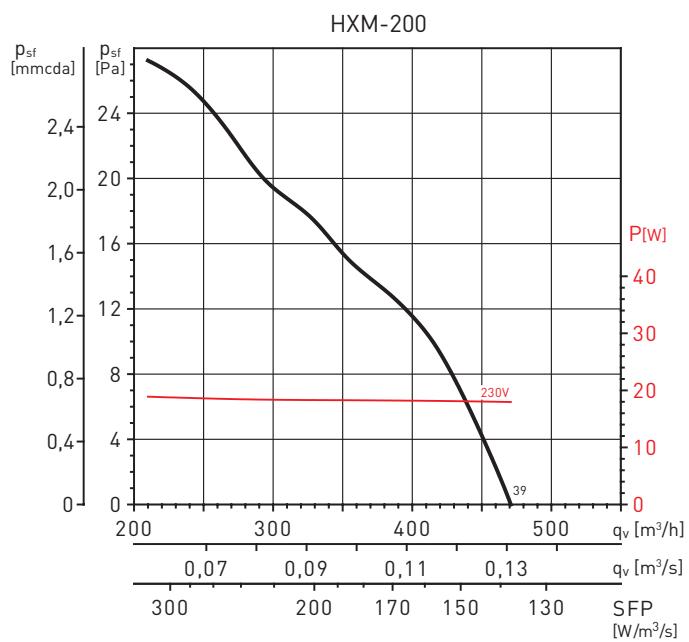
$\eta [\%]$ Eficiencia

N Grado de eficiencia

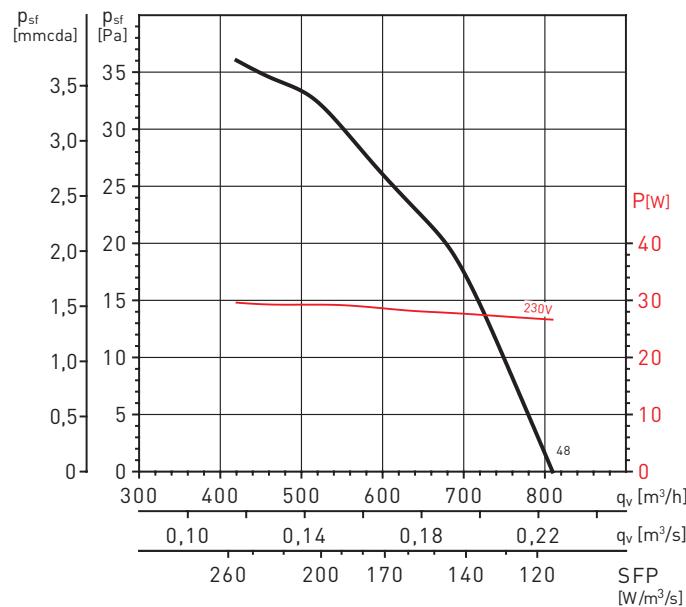
[m^3/h] Caudal

[Pa] Presión estática

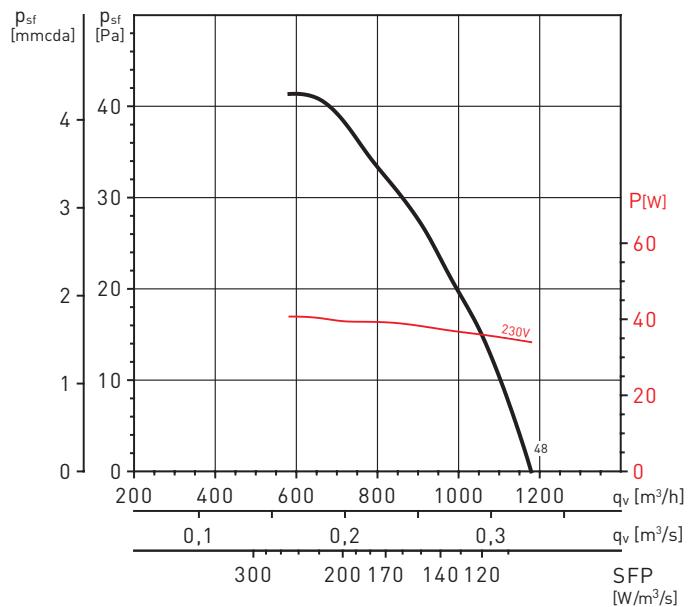
[RPM] Velocidad



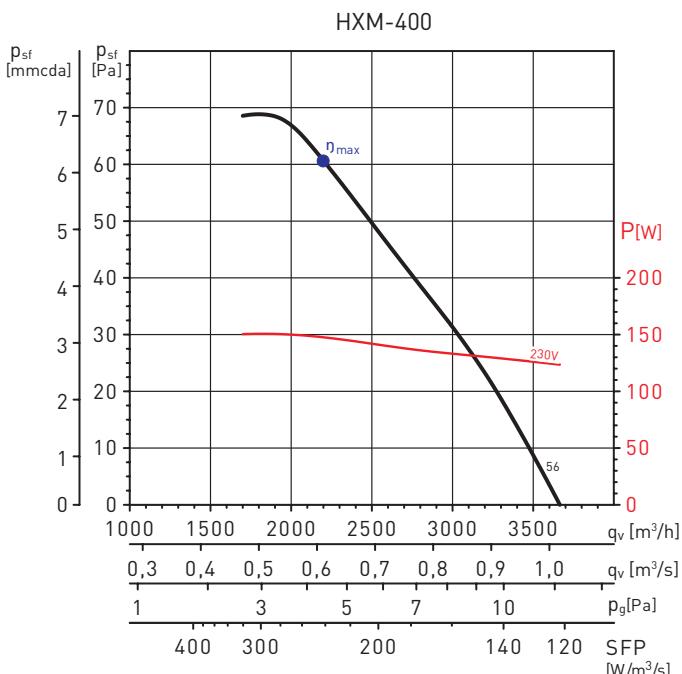
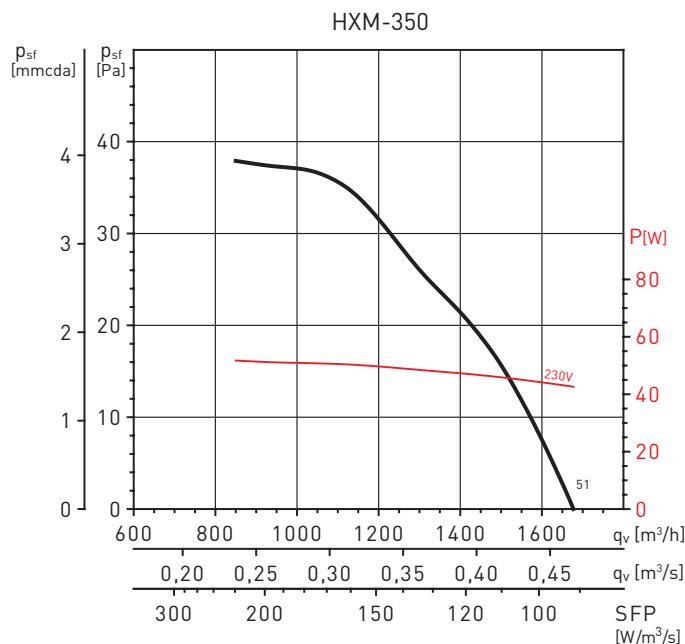
HXM-250



HXM-300



CURVAS CARACTERÍSTICAS



MC*	EC*	VSD*	SR*	$\eta[\%]*$	N*	[kW]	$q_v [m^3/h]$	[Pa]	[RPM]
B	Static	No	1,001	25,1	36,7	0,148	2198	61	1103

* Ver página anterior.

ACCESORIOS DE MONTAJE



PER-W
Persianas de sobrepresión de plástico.



PER-CR
Persianas de sobrepresión de aluminio.

Modelo	Persianas de sobrepresión	
	Plástico	Aluminio
HXM-200	PER - 200 W	PER - 250 CR
HXM-250	PER - 250 W	PER - 250 CR
HXM-300	PER - 355 W	PER - 355 CR
HXM-350	PER - 355 W	PER - 355 CR
HXM-400	PER - 400 W	PER - 400 CR

ACCESORIOS ELÉCTRICOS



REB
Reguladores electrónicos monofásicos.



RMB
Reguladores electromecánicos monofásicos.