

Nota de Aceptación:

Proyecto de Diseño Aprobado, en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Pontificia Universidad Javeriana Cali para optar el título de Ingeniero Industrial.



HERNÁN CAMILO ROCHA NIÑO
Decano de la Facultad de Ingeniería y Ciencias



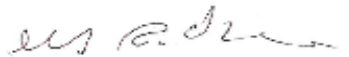
JORGE ENRIQUE ÁLVAREZ PATINO
Director Carrera Ingeniería Industrial



JOSÉ LUIS RAMÍREZ DUQUE
Director(a) Proyecto de Diseño



JORGE FRANCISCO ESTELA
URIBE
Jurado 1



CARLOS ALBERTO OLARTE
MENESES
Jurado 2

Santiago de Cali, 25 de febrero de 2021

Jorge Francisco Estela Uribe
 Carlos Alberto Olarte Meneses
 Jurados Proyecto de Diseño 2
 Carrera de Ingeniería Industrial
 Pontificia Universidad Javeriana – Seccional Cali

A continuación, se relacionan las correcciones solicitadas por los jurados en la entrega final de Proyecto de Diseño 2.

Título: Diseño de una metodología para Medir la Calidad del Aire y el confort térmico en Aulas de Clase de la Pontificia Universidad Javeriana Cali.		Código: 2020107	
CAMBIOS			
Ítem	Correcciones solicitadas	Modificaciones realizadas	# Página
1	Título: Diseño de un Sistema para Mejorar el Confort Térmico y la Calidad del Aire en Aulas de Clase de la Pontificia Universidad Javeriana Cali.	Título: Diseño de una metodología para Medir la Calidad del Aire y el confort térmico en Aulas de Clase de la Pontificia Universidad Javeriana Cali.	25
2	Objetivo general: Diseñar una metodología para mejorar la calidad del aire y confort térmico de las aulas de la Pontificia Universidad Javeriana Cali.	Objetivo general: Diseñar una metodología a través de herramientas de ingeniería para medir la calidad del aire y confort térmico con el fin de identificar riesgos y alternativas de mejora en las aulas de la Pontificia Universidad Javeriana Cali.	25
3	Se solicitó cambiar el enfoque de mejora a metodología de medición para ser acorde con el trabajo real realizado	Se realiza corrección general en todo el documento dando un enfoque orientado a metodología de medición	-
4	Se sugirió corrección ortográfica a lo largo del documento y aclaraciones en algunos puntos importantes	Se realizó las correcciones ortográficas y las aclaraciones pedidas por los jurados a lo largo del documento	-
5	Se solicitó adicionar una solución de mejora para confort térmico o la razón por la cual no fue posible realizar la misma	Se incluye la explicación de la no adición de la solución de mejora para confort térmico.	34
6	Se cambia el impacto social: Con la aplicación de la alternativa de mejora se espera mejorar la calidad de vida de las personas participes de las aulas de clase, ya que al tener una forma eficiente de control sobre las condiciones que afectan al ambiente interior, las clases se podrán desarrollar de la mejor manera posible y en condiciones amenas a las personas. Por otro parte en estos momentos por la situación endémica que se vive a nivel global es de vital importancia el estudio y aplicaciones enfocadas a mejorar las condiciones interiores de los lugares en que las personas suelen pasar la mayor parte de su tiempo, esto con el objetivo de brindarle seguridad.	Con el proyecto se espera definir una metodología de medición estandarizada con la que sea posible monitorear la calidad del aire y confort térmico de las aulas, para tomar decisiones informadas acerca de las medidas que permitan mejorar las condiciones ambientales al interior de estas. Con la situación global que se está atravesando se denota la importancia de un ambiente interior libre de contaminantes que puedan influir negativamente en la salud de los ocupantes.	37
7	Se solicita dar respuesta a los comentarios realizados a lo largo del documento, además se solicita cambiar el diagrama de causa-efecto	Se da respuesta a todos los comentarios a lo largo del documento y se modifica el diagrama de causa – efecto	20
8	Se solicita hacer una aclaración sobre sistema de ventilación o refrigeración en los salones	Teniendo en la cuenta el funcionamiento actual de los salones, y que la metodología de medición va enfocada a confort	-

Se requiere nombres completos con los dos apellidos de todos los estudiantes y jurados.

	térmico y calidad del aire, se decide cambiar a lo largo del documento por sistema de refrigeración donde sea adecuado.	
--	---	--

Observaciones:

Se llega a un acuerdo con los jurados sobre las correcciones dadas al título y objetivo general, argumentando el direccionamiento que se le da al proyecto el cual va enfocado a una metodología de medición y no al mejoramiento del sistema de ventilación con el que cuenta la universidad actualmente

Declaramos conocer y aceptar el reglamento y disposiciones de Proyecto de Diseño de la Carrera de Ingeniería Industrial de la Pontificia Universidad Javeriana – Seccional Cali. Además, declaramos que las modificaciones mencionadas en la tabla anterior sí están presentes en este documento.

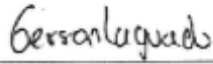
Cordialmente,



Joan Sebastián Barrera Zapata



Valeria Ruiz Romero



Gerson David Laguado Ortega

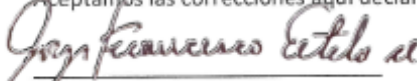


Jaime Andrés Barbosa Zambrano



José Luis Ramírez Duque

Aceptamos las correcciones aquí declaradas:



Jorge Francisco Estela Uribe



Carlos Alberto Olarte Meneses

Se requiere nombres completos con los dos apellidos de todos los estudiantes y jurados.



Diseño de una metodología para Medir el Confort Térmico y la Calidad del Aire en Aulas de Clase de la Pontificia Universidad Javeriana Cali

Joan Sebastián Barrera Zapata^{a,c}, Gerson David Laguado Ortega^{a,c}, Valeria Ruiz Romero^{a,c}, Jaime Andrés Barbosa Zambrano^{a,c}

José Luis Ramírez Duque^{b,c}

^aEstudiante de Ingeniería Industrial

^bProfesor, Director del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Civil e Industrial

^cPontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia

Resumen en español

El presente proyecto se desarrolla en la Pontificia Universidad Javeriana Cali, ubicada al sur de la ciudad. La universidad no cuenta con una metodología de medición de calidad de aire interior y confort térmico en sus aulas de clase que permita evaluar las condiciones ambientales al interior de estas; según una encuesta realizada, el 53% de los estudiantes y docentes desde su percepción, evidencian incomodidad respecto a la calidad del aire y confort térmico en las aulas del edificio el lago.

Este proyecto se planteó diseñar una metodología de medición de calidad del aire y confort térmico, con la finalidad de brindar una herramienta que permitió recolectar datos para su posterior análisis y así mismo dejar un precedente con el que se puedan registrar las condiciones ambientales de las aulas de clase del edificio el Lago. Inicialmente se diseñó y construyó, un dispositivo de medición mediante Arduinos para las variables objeto de estudio: monóxido de carbono, dióxido de carbono, material particulado, temperatura y humedad relativa. Luego se ejecutaron las mediciones en las aulas de clase seleccionadas del edificio el Lago. Después se hizo un análisis en cual se comparó los datos obtenidos con las normativas ASHRAE 55 y ASHRAE 62. Posteriormente se realizó una metodología de recolección de datos para generar un histórico y por ende trazabilidad de la información. Por último, se propuso dos alternativas de mejora que disminuyen la concentración de material particulado en el aula, como lo son el filtro AstroCel I High Efficiency Particulate Air (HEPA) y el precipitador electrostático (PES).

Se obtuvo como resultado que en promedio el monóxido de carbono tiene un valor de 4,18 ppm, el dióxido de carbono de 402,98 ppm, el material particulado de 28,77 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, la temperatura de 27,13 °C y la humedad relativa de 64,03%, donde se evidencia que las variables de material particulado, temperatura y humedad relativa se encuentran por fuera de los límites permisibles según la normativa. Además, según la validación financiera se comprobó que construir el dispositivo de medición era más factible que comprar uno en el mercado. Por último, para validar la metodología y estandarizar el proceso se realizó un manual de medición el cual fue validado por expertos como una herramienta pertinente, coherente y trazable.

Palabras claves: Arduino, Confort térmico, Calidad del aire, Edificación, Instrumentos de medición.

Abstract

This project is developed at the Pontifical Xavierian University Cali, located in the southern part of the city. The university does not have a methodology for measuring indoor air quality and thermal comfort that allows them to evaluate the environmental conditions inside the classrooms; According to a survey carried out, 53% out of the students and teachers, show discomfort regarding to the quality of the air and thermal comfort in the classrooms of “El Lago” edifice.

This project was proposed for design an air quality and thermal comfort measurement methodology, in order to provide a tool that will collect data for posterior analysis and also, set a precedent to record the indoor environment conditions on “El Lago” edifice classrooms. Initially, an Arduino measurement device was designed and programmed for the variables under review: carbon monoxide, carbon dioxide, particulate matter, temperature and relative humidity. The measurements were then carried out in some selected classrooms on “El Lago” edifice.

Afterwards, an analysis was carried out in which the data obtained was compared with the ASHRAE 55 and ASHRAE 62 regulations. Subsequently, a data collection methodology was carried out to generate a record and therefore traceability of the information. Finally, two improvement alternatives were proposed that would reduce the concentration of particulate material in the classroom, such as the AstroCel I High Efficiency Particulate Arresting (HEPA) filter and the dry electrostatic precipitator (DEP).

The results on the measurement were that on average, the carbon monoxide has a value of 4,18 ppm, carbon dioxide 402,98 ppm, particulate matter 28,77 $\mu\text{g} / \text{m}^3$, the temperature of 27,13 °C and relative humidity 64.03%, where it is clear that variables such as particulate matter, temperature and relative humidity are outside the permissible limits according to the regulations. Furthermore, the financial validation found that building the measuring device was more feasible than buying one on the market. Finally, to validate the methodology and standardize the process, a measurement manual was created which was validated by experts as a relevant, coherent and a traceable tool.

Keywords: Arduino, Thermal Comfort, Indoor Air Quality, Building, Measurement tools

Tabla de contenido

I.	PROJECT CHARTER.....	7
II.	DEFINIR	9
A.	Contexto y Justificación.....	9
B.	Grupos de interés.....	11
C.	Requerimientos	13
III.	MEDIR	15
A.	Plan de recolección de datos	15
B.	Medición del sistema actual	16
IV.	ANALIZAR	21
A.	Análisis de causas.....	21
B.	Revisión de literatura.....	24
C.	Exploración de ideas y selección de alternativa.....	26
D.	Objetivos.....	27
E.	Plan de trabajo.....	28
V.	MEJORAR.....	29
A.	Desarrollo del diseño de la solución	29
B.	Validación del diseño propuesto.....	37
VI.	CONTROLAR	39
A.	Medición de los impactos.....	39
B.	Estandarización de la solución – POE’S (plan de control)	40
C.	Conclusiones	40
D.	Recomendaciones.....	41
VII.	GLOSARIO	41
VIII.	REFERENCIAS	42
IX.	ANEXOS	44

Índice de Tablas

TABLA I. GRUPOS DE INTERES.....	12
TABLA II. REQUERIMIENTOS	14
TABLA III. INDICADORES DE DESEMPEÑO A MEDIR (DATOS REALES).....	16
TABLA IV. INFORMACIÓN GENERAL DEL EDIFICO EL LAGO	17
TABLA V. CONSECUENCIAS DE LA CONCECNTRACION DE CO2 EN EL AIRE [8]	18
TABLA VI. VARIABLES DE INTERÉS – RESUMEN.....	21
TABLA VII. ANÁLISIS 5 POR QUÉ’S.....	24
TABLA VIII. PORCENTAJES DE PRIORIDAD DE LOS CRITERIOS	27
TABLA IX. PUNTUACIÓN TOTAL DE LAS ALTERNATIVAS	27
TABLA X. PLAN DE TRABAJO.....	28
TABLA XI. CARACTERISTICAS DEL DISPOSITIVO DE MEDICIÓN	29
TABLA XII. COMPONENTES DEL DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE CALIDAD DEL AIRE Y CONFORT TERMICO	29
TABLA XIII. PROFESIONALES QUE PARTICIPARON EN LA EVALUACIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	37
TABLA XIV. EVALUACION DE LOS PROFESIONALES	38
TABLA XV. TABLA DE ANEXOS	44

Índice de Figuras

Fig. 1. Resultado encuesta a estudiantes y docentes.....	11
Fig. 2. Resultado encuesta a estudiantes y docentes.....	11
Fig. 3. Clasificación de grupos de interés.....	13
Fig. 4. Vista satelital del edificio El Lago	17
Fig. 5. Resumen promedio de temperatura en el edificio El Lago.....	18
Fig. 6. Resumen promedio de humedad relativa en el edificio El Lago.....	19
Fig. 8. Resumen promedio del dióxido de carbono en el edificio El Lago	20
Fig. 9. Resumen promedio del material particulado en el edificio El Lago	20
Fig. 10. Box Plots para las variables de Confort Térmico	22
Fig. 11. Box Plots para las variables de Calidad del Aire.....	22
Fig. 12. Diagrama de causa y efecto para la calidad del aire y el confort térmico, basado en documento de sanidad ambiental de la comunidad de Madrid y la norma ASHRAE 55	23
Fig. 13. Diseño del dispositivo de medición. de Calidad del aire y Confort térmico.	30
Fig. 14. Dispositivos de medición. de Calidad del aire y Confort térmico.....	31
Fig. 15. Ciclo PHVA de la metodología propuesta de medición. de Calidad del aire y Confort térmico.	31
Fig. 16. Plantilla de reconocimiento del entorno etapa planificar	32
Fig. 17. Plantilla para recolección de datos	33
Fig. 19. Formato de validación de datos recolectados por los dispositivos de medición.....	34
Fig. 20. Formato resumen para el informe gerencial.....	35
Fig. 21. Formato guía de plan de mejoramiento.....	35

Fig. 22. Foto del filtro seleccionado como alternativa de mejora.....	36
Fig. 23. Principio del precipitador electroestático.....	37
Fig. 24. Resultado de la simulación programa IAQx diseñado por la EPA.....	39
Fig. 25. Costos incurridos en la elaboración del dispositivo de medición.....	39
Fig. 26. Costos de algunos dispositivos disponibles en el mercado.....	40

I. PROJECT CHARTER

Descripción (<i>Business case</i>)	Planteamiento del problema (<i>Problem statement</i>)		
Al diseñar un sistema que permita establecer pautas mínimas y aceptables de confort térmico y calidad del aire para los ocupantes del edificio El Lago de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, se podrá contribuir a la mejora del desarrollo de las actividades tanto académicas como laborales en función del cumplimiento del compromiso que tiene la universidad con quienes laboran y estudian en sus instalaciones, el cual es generar y mantener un ambiente adecuado que posibilite el bienestar y el desarrollo humano individual y social de todas las personas que hacen parte de la comunidad educativa.	En el semestre académico 2020-1, según percepción de estudiantes y docentes encuestados, el 53,4% evidencian incomodidad con respecto a calidad del aire y confort térmico.		
Impacto de los actores (<i>Stakeholder's business needs</i>)	Restricciones	Especificaciones	Marco legal
Se espera obtener un impacto positivo en la percepción de bienestar de estudiantes y docentes dentro de las aulas de clase, a su vez, un beneficio económico al brindar una herramienta de bajo costo para medir niveles de calidad del aire y confort térmico, que permita implementar otras soluciones.	<p>Sensación térmica subjetiva para cada persona.</p> <p>Falta de equipos para medir variables de interés.</p> <p>Inexistencia de datos históricos que permitan tener un panorama claro de la situación dentro de las aulas del edificio El Lago</p> <p>Falta de instrumentos para medir el gasto energético del sistema de refrigeración existente.</p> <p>Factores externos de los que no se tiene control tales como el clima, la vegetación, los vehículos, cafeterías, escritorios, etc.</p>	<p>Configuración del aire acondicionado a condiciones de norma.</p> <p>Medición de contaminantes en el ambiente.</p> <p>Automatizar el sistema de refrigeración.</p> <p>Medir el gasto energético generado por los sistemas de refrigeración.</p> <p>Mecanismo que permita regular la calidad del aire.</p> <p>Instalar sistemas de refrigeración más novedosos.</p>	<p>Resolución 2254 de 2017</p> <p>RITE 2017</p> <p>Art 20 de ley 50 de 1990, código sustantivo del trabajo</p> <p>ASHRAE 55</p> <p>ASHRAE 62</p> <p>NTC 5183</p> <p>Resolución 41012 de 2015</p> <p>Resolución 1841 de 2008</p> <p>Resolución 610 de 2010</p> <p>Ley 1480 de 2014</p>

			Personal con poco conocimiento sobre las normas de calidad del aire en interiores.		
Indicadores de Desempeño (KPI's)					
Variable		Actualidad (Promedio)		Meta (Rango)	
Temperatura		27.13 °C		20 - 25 °C	
Humedad relativa		64.03 %		30 – 60 %	
Dióxido de carbono (CO ₂)		402.98 ppm		400 -1000 ppm	
Monóxido de carbono (CO)		4.18 ppm		< 8.8 ppm	
Material particulado (PM _{2.5})		28.77 µg/m ³		< 25 µg/m ³	
Objetivo general (Goal statement)					
Diseñar una metodología a través de herramientas de ingeniería para medir la calidad del aire y confort térmico con el fin de identificar riesgos y alternativas de mejora en las aulas de la Pontificia Universidad Javeriana Cali.					
Objetivos específicos (Project scope)					
<ol style="list-style-type: none"> 1. Desarrollar una metodología para medir los parámetros requeridos por la norma internacional ASHRAE 55 y la reglamentación colombiana RITE 2017. 2. Diseñar un dispositivo de medición de calidad del aire y confort térmico para las aulas de la Pontificia Universidad Javeriana Cali. 3. Crear una herramienta para identificar el nivel de riesgo en cuanto a la calidad del aire y confort térmico de las aulas de la universidad Javeriana Cali. 4. Validar técnica, financiera y ambientalmente la viabilidad de la solución propuesta. 					
Plan de Trabajo (Project Plan)				Equipo de trabajo (Team members)	
Actividad	Fecha Inicio	Fecha Fin	Área IISE	Nombre	Rol
Construir una herramienta de medición de variables de calidad del aire y confort térmico hecho con Arduino.	08/07/2020	12/10/2020	Ingeniería de operaciones y administración	Gerson David Laguado Ortega	Especialista de información
Crear software de recolección de parámetros relevantes, que permita su análisis de forma sencilla.	31/08/2020	16/10/2020	Ingeniería de la información	Valeria Ruiz Romero	Armonizador

Crear un manual de procedimientos que permita a un operario realizar un estudio correctamente cuando este sea requerido.	05/09/2020	23/10/2020	Ingeniería de la información	Joan Sebastián Barrera Zapata	Establecedor de normas
Desarrollar indicadores que permitan conocer el nivel de riesgo en el que se encuentran las personas al interior del aula de clase por motivos de calidad del aire y confort térmico.	17/09/2020	24/10/2020	Seguridad	Jaime Andrés Barbosa Zambrano	Observador / Comentarista
Crear documento de interpretación de indicadores.	21/09/2020	24/10/2020	Ingeniería de la información	Gerson David Laguado Ortega	Especialista de información
Simulación del funcionamiento de mejoras en caso de ser implementadas.	05/10/2020	11/11/2020	Ingeniería de calidad, confiabilidad y análisis económico ingenieril.	Joan Sebastián Barrera Zapata	Establecedor de normas

II. DEFINIR

A. Contexto y Justificación

El aire es una mezcla homogénea de gases que forma parte de la atmósfera, esencial e imprescindible para el desarrollo de la vida en el planeta tierra, ya que no solo provee oxígeno, nitrógeno y otros gases necesarios para la respiración y nutrición de plantas, animales y demás seres vivos presentes, sino también permite la existencia del fuego, el sonido, el viento, las nubes, las lluvias, entre otros. En la actualidad la preocupación por el incremento en la contaminación del aire se ha extendido a nivel global, debido a que, según cifras del 2016 de la Organización Mundial de la Salud, la contaminación atmosférica provoca cada año 4,2 millones de defunciones prematuras a nivel mundial [1], a causa del aumento de la polución por la construcción de grandes ciudades, el crecimiento y surgimiento de nuevas industrias que crean y fabrican día a día nuevos productos y la concentración de vehículos automotores que circulan en las ciudades.

En Colombia, el Departamento Nacional de Planeación estimó que, durante el año 2015, los efectos de la contaminación de aire estuvieron asociados a 10 527 muertes y 67,8 millones de síntomas y enfermedades [2]. Según los últimos informes del estado de calidad del aire, elaborados por el IDEAM, el contaminante con mayor potencial de amenaza para la salud humana en el territorio nacional es el material particulado inferior a 2,5 micras (*PM2,5*), seguido por el ozono (O_3), el dióxido de nitrógeno (NO_2), el dióxido de azufre (SO_2), el monóxido de carbono (CO) y el plomo (PB) [2]; las personas están en constante exposición, ya que las fuentes de estos contaminantes hacen parte del diario vivir de la sociedad. Por otra parte, para la ciudad de Santiago de

Cali según los informes del Sistema de vigilancia Calidad del Aire Santiago de Cali (SVCASC) de 2 019, en términos generales la calidad del aire es buena y aceptable; sin embargo, se observa que el material particulado PM_{10} y $PM_{2,5}$ son los mayores contribuyentes al índice de *calidad del aire*, seguidos por el ozono (O_3), el dióxido de azufre (SO_2) y el dióxido de nitrógeno NO_2 [3].

Las características climatológicas determinan la utilidad y permanencia de los usuarios, tanto en espacios externos como internos. El confort térmico según la ASHRAE es aquella condición de la mente que expresa satisfacción con el ambiente, por lo tanto, la medición de calidad de ambiente interior es subjetiva y depende de diversos factores determinados en gran parte por el usuario. Sin embargo, las condiciones de habitabilidad en interiores son menos adversas que las exteriores ya que estas pueden ser controladas, asilando al ser humano de las variables climatológicas que afecten su entorno. En la ciudad de Cali el clima varía con relación al rango de altitud que abarca entre 916 y 1 438 msnm; en la zona más plana, se presenta un clima cálido con características semihúmedas hacia el sur y semiáridas hacia el norte, la precipitación promedio anual es de 1 500mm y la temperatura promedio anual es de 24°C aproximadamente.

Teniendo en cuenta lo anterior, las organizaciones han buscado promover el bienestar de sus trabajadores, brindándoles un espacio óptimo para desarrollar sus actividades, dado que el talento humano es el principal motor de la sociedad ya que es el responsable de la productividad como resultado de aptitudes, habilidades, conocimiento y experiencia adquiridas que estimulan la economía, a través del tiempo. No obstante, con la contaminación que se vive cada día, el ser humano no está exento de sufrir algún tipo de sintomatología o enfermedad adquirida en los lugares que frecuenta en su diario vivir.

El Síndrome del Edificio Enfermo (SEE) se define como el conjunto de síntomas diversos que no van acompañados de ninguna lesión orgánica o signo físico y se diagnostican a menudo, tales como: malestar físico, irritación o sequedad en los ojos, afectaciones en la nariz y garganta, tos, náuseas y problemas respiratorios, fatiga mental, alteraciones de memoria, somnolencia, apatía, mareos, estrés entre otros [4], presentes en los individuos que asisten a edificios afectados; el SEE se puede desarrollar gracias a contaminantes ambientales, olores, ausencia de iones negativos, iluminación inadecuada, ruido, vibraciones, falta de confort térmico, humedad relativa inadecuada o ventilación insuficiente [4].

Un ambiente de trabajo óptimo puede ser un instrumento que garantice e impulse la estabilidad del rumbo de una organización, ya que una persona pasa entre el 80% y 90% de su jornada laboral en espacios cerrados [4]. Debido a que el aire es un elemento presente en todo ambiente externo e interno, es de vital importancia evaluar su calidad en espacios interiores, dado que está determinada por factores del ambiente externo siendo la recirculación de aire acondicionado la mayor fuente de impacto, junto con fuentes humanas (dióxido de carbono, olores corporales, vapor de agua, humo de tabaco, partículas en suspensión, entre otros), materiales de construcción y materiales utilizados para el trabajo de oficina, mantenimiento y limpieza.

De acuerdo a lo anterior, se considera oportuno valorar los factores que se derivan del Síndrome del Edificio Enfermo y las incidencias que tiene en éste la calidad del aire interior y en el confort térmico en la ciudad de Santiago de Cali específicamente en las instalaciones de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, con el propósito de detectar aquellas anomalías que se producen en el ambiente interior de las aulas de clase de la universidad; evaluar cuál es su estado actual y cómo puede perjudicar a las personas pertenecientes a la comunidad Javeriana.

La realización de un estudio y el diseño de metodología de medición para la calidad del aire interior y confort térmico resulta pertinente para la ciudad y la universidad, ya que, a nivel seccional no existe método ni registro que permita conocer sobre la calidad del aire que respiran los caleños día a día en los espacios cerrados que frecuentan. Este sistema fortalecerá los conocimientos respecto al tema de interés y ayudará a generar ideas productivas que apoyen la creación y puesta en marcha, de actividades que disminuyan los efectos que pueden surgir por la situación ambiental presente en la ciudad.

Actualmente la Pontificia Universidad Javeriana Cali cuenta con una extensión total de 195 342 m² de la cual 116 720 m² son edificaciones. Por otra parte, la comunidad javeriana está conformada por aproximadamente 9 663 personas, entre estudiantes y docentes [5]. Con el objetivo de tener una idea sobre cómo es la situación actual en la universidad se realizó una encuesta para conocer la percepción de los estudiantes y docentes de la facultad de ingeniería y ciencias de la universidad, esta fue contestada por 104 personas. Según los resultados de la encuesta (Ver Anexo 1), los edificios en los cuales se presentan más inconformidades respecto al confort térmico, son el edificio El Lago con un 53,4% y el edificio Las Palmas con un 15,4% (Fig. 1.), además se puede presumir que los estudiantes y docentes presentan síntomas y enfermedades relacionadas al SEE durante el periodo académico, los cuales pueden ser producidos por la calidad del aire interior del aula de clases (Fig. 2.)

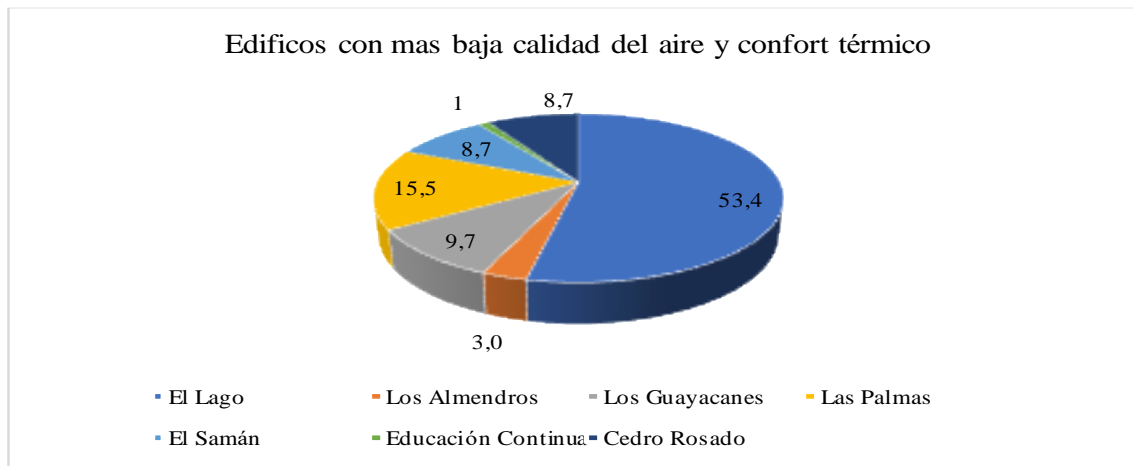


Fig. 1. Resultado encuesta a estudiantes y docentes (ver Anexo 1)

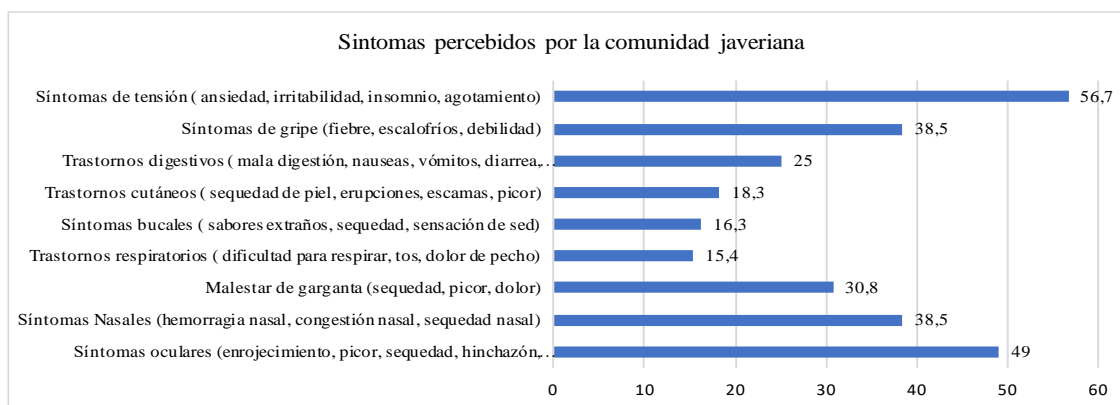


Fig. 2. Resultado encuesta a estudiantes y docentes (ver Anexo 1)

Se efectúan mediciones sobre la calidad del aire en variables como los niveles de material particulado (inferior a 2,5 micras), monóxido y dióxido de carbono, al igual que se miden parámetros como temperatura y humedad, con el fin de conocer el confort térmico en el edificio El Lago. Con ellos, los beneficios sociales y económicos que pueden generar para la universidad y la comunidad javeriana son diversos debido al potencial que posee. Entre los beneficios, se encuentra principalmente brindar una herramienta metodológica de bajo costo para medir los niveles de calidad de aire y las condiciones de confort térmico, que permita dar bases sólidas para implementación de diversas soluciones, en función del cumplimiento del compromiso que tiene la universidad con las personas que laboran y estudian en sus instalaciones, el cual es generar y mantener un ambiente adecuado que posibilite el bienestar y el desarrollo humano individual y social de todas las personas que hacen parte de la comunidad educativa, cumpliendo al mantenimiento y cuidado de la salud así como a la consolidación de la Universidad como promotora de salud.

En el semestre académico 2020-1 el 53,4% de los estudiantes y docentes encuestados (ver Anexo 1), según su percepción, evidencian problemas con respecto a la calidad del aire y confort térmico en el edificio. Debido a lo anterior, se puede presumir que existe un problema que afecta la salud de los estudiantes y docentes, lo que influye el desarrollo óptimo de las actividades que se realizan en las aulas de clase. Por lo tanto, se pretende dar un aporte significativo a la universidad a partir metodología de medición de la calidad del aire y confort térmico enfocado a la salud y bienestar de la comunidad Javeriana, con el objetivo de proporcionarles un entorno ameno para el desarrollo eficiente de sus diferentes actividades y funciones laborales, como también resaltar el buen nombre de la universidad, destacándose como institución educativa que forma profesionales para el mundo.

B. Grupos de interés

Las partes interesadas se definen en la Norma Técnica Colombiana ISO 9000 de 2015 como una persona u organización que puede afectar o verse afectada por una actividad o decisión [6]. Con base en la definición anterior, y con información consultada

por el grupo y proporcionada por la universidad, se definen los grupos de interés que se ven afectados o pueden afectar en el desarrollo del proyecto enfocado en una metodología de medición del confort térmico y la calidad del aire en las aulas de clase de la universidad, así como su respectivo efecto, los recursos que brindan y su influencia e impacto en el proceso. Lo anterior se muestra en la Tabla I.

*TABLA I.
GRUPOS DE INTERES*

Grupos de interés	Efecto	Recurso	Influencia	Impacto
Estudiantes	Directo	Trabajo	7	8
Docentes	Directo	Trabajo	6	7
Área de recursos físicos	Directo	Personal	8	10
Área financiera	Directo	Dinero	9	10
Ministerio de Ambiente	Indirecto	Reglamentación	2	3
Ministerio de Minas y Energía	Indirecto	Reglamentación	1	4
Ministerio de salud	Indirecto	Reglamentación	3	4
DAGMA	Directo	Reglamentación	4	4
DANE	Indirecto	Estadística	2	4
Asociación Colombiana de Acondicionamiento del Aire y de la Refrigeración (ACAIRE)	Directo	Reglamentación	3	2
Proveedores de aire acondicionado	Indirecto	Materia prima	4	6
Calidosos (Equipo de proyecto) Jaime Andrés Barbosa Zambrano Juan Sebastián Barrera Zapato Gerson Laguado Ortega Valeria Ruíz Romero	Directo	Trabajo	9	3

Las partes interesadas que se identifican en primer lugar son los que conforman a la comunidad javeriana, con un enfoque en los estudiantes y docentes, que son los que hacen uso de las aulas de clase, las cuales son sujetas a estudio en este proyecto; seguido, se identifican las directivas de la universidad Javeriana Cali, específicamente el área financiera y de recursos físicos, dado que ellos son los que tienen mayor impacto en las decisiones. También es importante tener en cuenta los entes reguladores, como el Ministerio de Ambiente, Ministerio de Minas y Energía, Ministerio de Salud, DAGMA, DANE y ACAIRE por su influencia en las actividades que realiza la institución educativa es necesario el estricto cumplimiento de las normas que las mismas emiten.

Por otra parte, los proveedores de aire acondicionado juegan un rol importante, dado que la calidad del aire y confort son garantizados gracias a estos, y se debe verificar que cumplan con las especificaciones requeridas. Finalmente, el equipo de trabajo con nombre “Calidosos”, encargados de recolectar la información y realizar todos los procedimientos necesarios para el desarrollo y culminación del proyecto.

Para clasificar a los actores del grupo de interés, se hace uso de la herramienta llamada: matriz de influencia-impacto; la cual organiza a las partes interesadas teniendo en cuenta dos factores determinantes en la toma de decisión de una organización: la influencia la cual determina la participación de las partes interesadas en la problemática encontrada y el impacto referente a la capacidad de efectuar cambios en la planificación o ejecución de la situación encontrada. Esta matriz muestra a qué grupo de actores se le debe dar mayor prioridad al momento de tomar una acción. En el plano cartesiano que se observa en la Fig. 2 se observan 12 coordenadas, las cuales representan a cada una de las partes interesadas mencionadas anteriormente y se ubican de acuerdo con una ponderación que va desde uno (1) hasta diez (10).

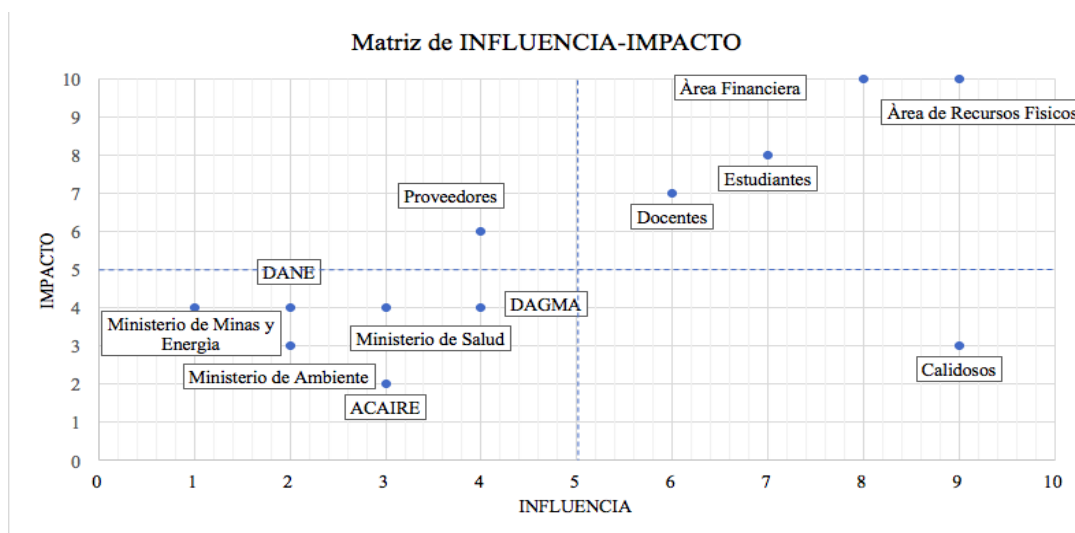


Fig. 3. Clasificación de grupos de interés

El plano cartesiano se divide en cuatro cuadrantes, la prioridad que se le da a cada uno de las partes interesadas depende de su posición en el mismo, los que se ubican en el cuadrante superior derecho tienen la máxima prioridad, dado que tienen alta influencia y alto impacto, por lo tanto se debe trabajar para ellos; los actores que se encuentran en el cuadrante inferior derecho tienen alta influencia pero un bajo impacto, razón por la cual se debe trabajar con ellos; por otra parte los que se encuentran en el cuadrante superior izquierdo son actores con alto impacto, por lo que se deben mantener informados y nunca se les debe ignorar; por último se encuentran los actores en el cuadrante inferior izquierdo, a los que se les debe mantener informado con mínimo esfuerzo dado que cuentan con bajo impacto e influencia.

Con lo mencionado anteriormente, las partes interesadas con mayor prioridad para tratar el problema de evaluación del confort térmico y la calidad del aire para medir las condiciones en las aulas de clase son las directivas, entre los cuales se encuentran el área financiera y de recursos físicos, ya que estos coordinan los recursos de la universidad y son clave en la toma de decisiones; por otra parte está la comunidad javeriana, teniendo en cuenta principalmente a los estudiantes y los profesores, dado que estos son los afectados directos de cualquier decisión que se tome con base en la solución planteada.

C. Requerimientos

Después de identificar claramente los grupos de interés de acuerdo con su prioridad, lo siguiente es recolectar los requisitos del cliente (VOC por sus siglas en inglés), para esto se realizan encuestas (Ver Anexo 1), con el fin de transformar las necesidades

en especificaciones, leyes, normas y estándares que puedan ser aplicadas para solucionar el problema. Las encuestas se realizaron a los grupos de interés con mayor prioridad y que a su vez sean accesibles. Lo anterior se encuentra registrado en la Tabla II.

TABLA II.
REQUERIMIENTOS

Grupos de interés	Requisitos del cliente (VOC)	Restricciones de diseño	Especificaciones de diseño (características, requisitos técnicos, CTQ's)	Leyes, normas y estándares	
				Legislación y requisitos aplicables	Importancia o efecto
Estudiantes	Sensación térmica neutra o ligeramente fría en las aulas que se desarrollan las clases	La sensación térmica es subjetiva para cada persona.	Configuración del aire acondicionado a condiciones aceptables.	Resolución 2254 de 2017	Informa sobre las condiciones ambientales mínimas que se deben cumplir para considerar un ambiente interior aceptable
Docentes	Sistema de evaluación de la calidad de aire dentro de las aulas de clase para disminuir enfermedades.	Falta de equipos necesarios en el campus universitario para medir variables de interés.	Medición de las partículas contaminantes en el ambiente.	RITE 2017	Indica el nivel máximo permitido de partículas contaminantes en el ambiente
Área de recursos físicos	Evitar la acción realizada por los operarios de encender y apagar el aire varias veces al día.	Recursos económicos para mejores sistemas de refrigeración.	Automatizar el sistema de aire acondicionado, es decir, en horas específicas que se encienda y apague automáticamente.	Art 20 de ley 50 de 1990, código sustantivo del trabajo.	Busca prevenir la fatiga en el operario y promueve el bienestar del trabajador para lograr su buen desempeño laboral.
Área financiera	Disminuir el costo energético.	Falta de instrumentos de medición, para conocer el gasto energético generado por el aire acondicionado.	Medir el gasto generado por los sistemas de refrigeración de la universidad, para controlarlos.	RITE 2017	Establece las pautas mínimas a nivel de eficiencia energética que deben cumplir las instalaciones térmicas en las edificaciones destinadas a atender la demanda de bienestar e higiene de las personas.
Ministerio de Ambiente	Cumplir con las políticas establecidas para calidad de aire en interiores.	Personal con conocimiento insuficiente de las políticas.	Regulación de partículas a niveles aceptables en el ambiente.	ASHRAE 55 ASHRAE 62 NTC 5183	Indica las condiciones óptimas para la calidad de aire en interior y confort térmico.
Ministerio de Minas y Energía	Cumplir con la legislación colombiana establecida sobre consumo energético.	Normas establecidas sobre el consumo energético de equipos.	Identificación de la eficiencia energética de los equipos de aire acondicionado.	Resolución 41012 de 2015	Regulación de equipos con el fin de asegurar uso racional de energía.

Grupos de interés	Requisitos del cliente (VOC)	Restricciones de diseño	Especificaciones de diseño (características, requisitos técnicos, CTQ's)	Leyes, normas y estándares	
				Legislación y requisitos aplicables	Importancia o efecto
Ministerio de Salud	Cumplir con la legislación colombiana en materia de salud pública en los espacios.	Factores externos sobre los que no se tiene control.	Identificación de contaminantes que pueden afectar la salud pública	Resolución 1841 de 2008	Regulación sobre salud en espacios cerrados, principalmente consumo de tabaco.
DANE	N/A	Información no verificada.	Dar una información más adecuada sobre la población universitaria en general	N/A	N/A
DAGMA	Mantener un control sobre la calidad ambiental.	N/A	Mecanismo que permita regular la calidad ambiental.	Resolución 610 de 2010	Indica nivel máximo permitido de partículas contaminantes y tiempo de exposición a estas.
ACAIRE	Realizar acompañamiento en cuestión de refrigeración	N/A	N/A	N/A	N/A
Proveedores de aire acondicionado	Mantener la relación comercial con la pontificia universidad javeriana Cali.	Falta de equipos de refrigeración.	Instalar sistemas de refrigeración más novedosos con los mismos proveedores.	Ley 1480 de 2011	Promover y garantizar a los consumidores la protección frente a riesgos para su salud y seguridad.
Calidosos (Equipo de proyecto)	N/A	Equipos para realizar mediciones respectivas. Suministro de datos históricos en tiempo oportuno.	Metodología para evaluar en tiempo adecuado y con los resultados esperados.	N/A	N/A

III. MEDIR

A. Plan de recolección de datos

Se planeó la recolección de datos de temperatura, humedad relativa, velocidad del aire y diferentes contaminantes del aire, tal como monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno y material particulado de 2,5 micras (PM 2,5) en el edificio en el que se manifestó más quejas en la encuesta (edificio El Lago). El objetivo es tomar datos en dos (2) salones de cada piso, de manera continua en la jornada estudiantil; se repetirá el procedimiento todos los días de la semana con el fin de tener una idea clara de qué sucede en la edificación. Para realizar esta medición se usará un medidor de estrés térmico, una bomba de muestreo y sensores de *Arduino* para optimizar la recolección de datos, debido a los escasez de los equipos. Para verificar el funcionamiento de los sensores (ver anexo 2), se realizaron unas pruebas en casa como se puede observar en el (Anexo 3).

Sin embargo, en este momento coyuntural por el que atraviesa el planeta a causa de la pandemia generada por el Covid-19, no es posible realizar la recolección de datos de la manera indicada anteriormente, por lo cual, la medición se realizó en un (1) salón por piso, dos (2) días de la semana, sin estudiantes y sin en el funcionamiento del aire acondicionado en el aula. Se utilizará únicamente un (1) sensor de *Arduino* por salón y se medirán algunas variables de las mencionadas anteriormente.

El plan de recolección de datos que se hará en la universidad se encuentra de manera detallada en el Anexo 4 y en la Tabla III se presenta un resumen del anexo mencionados anteriormente, se nombran las variables a medir, junto con la manera en que se tomarán los datos y su importancia para el proyecto.

*TABLA III.
INDICADORES DE DESEMPEÑO A MEDIR (DATOS REALES)*

Variable	Objetivo	Descripción	Indicador
Temperatura	Conocer si la temperatura promedio del salón cumple con la establecida por la norma.	Se usa sensores de Arduino en diferentes puntos del salón en diferentes horas del día	Temperatura promedio en el aula. (°C)
Humedad relativa	Conocer si la humedad relativa promedio en el aire del salón, cumple con la norma establecida.	Se usa sensores de Arduino en diferentes puntos del salón en diferentes horas del día	Humedad relativa promedio en el aula.(%)
CO ₂ en el aire	Conocer si la concentración promedio de dióxido de carbono presente en el salón de clase cumple en promedio con la norma establecida.	Se usa sensores de Arduino en diferentes puntos del salón en diferentes horas del día	Concentración promedio de dióxido de carbono en el aula.(ppm)
PM 2.5 en el aire	Conocer si la concentración promedio de material particulado contaminante presente en el salón de clase, cumple con la norma establecida.	Se usa sensores de Arduino en diferentes puntos del salón en diferentes horas del día	Concentración promedio de material particulado de 2.5 en el aula.(ppm)
CO en el aire	Conocer si la concentración promedio de monóxido de carbono presente en el salón de clase, cumple con la norma establecida.	Se usa sensores de Arduino en diferentes puntos del salón en diferentes horas del día.	Concentración promedio de monóxido de carbono.(ppm)

B. Medición del sistema actual

El edificio El Lago, está ubicado al occidente de la Pontifica universidad Javeriana Cali (Fig. 4.), cuenta con cuatro (4) pisos y un (1) sótano; actualmente tiene cuarenta y cinco (45) aulas de clase, todas con su respectivo sistema de refrigeración. También cuenta con diez (10) baños, la facultad de Ciencias de la Salud, oficinas para el trámite de prácticas de los estudiantes y un oratorio.

Se estudiaron los planos brindados por la universidad (Ver anexo 5) para conocer los espacios donde se van a realizar las mediciones y así los resultados tengan mejor precisión. Se obtuvo que el primer piso cuenta con un área total de 1 321,83 m², el segundo de 1 037,41 m², el tercero de 925,70 m² y el cuarto de 1 118,96 m². También se conoció el área total de las aulas de clase por piso y el área de cada aula a estudiar. La información completa se puede observar en la Tabla IV.



Fig. 4. Vista satelital del edificio El Lago [7]

TABLA IV.
INFORMACIÓN GENERAL DEL EDIFICIO EL LAGO

Piso	Área total, m ²	Área total aulas de clase, m ²	Aulas para analizar	Área por aula de clase, m ²	Sistema de refrigeración	Operación
1	1 321,83	600,73	1,2	69,15	Ventanas, puertas y refrigeración de techo.	Manual
2	1 037,41	631.01	2,2	72,56	Ventanas, puertas y refrigeración de techo.	Manual
3	925,70	610.61	3,6	77,18	Ventanas, puertas y refrigeración de techo.	Manual
4	1 118,96	697,08	4,5	77,88	Ventanas, puertas y refrigeración de techo.	Manual

Al ser un edificio que lleva varios años en funcionamiento, hay que tener en cuenta que, para el bienestar y mejora de la calidad tanto de salud como de rendimiento laboral y mental (el cual es uno de los beneficios que se espera alcanzar al concluir este proyecto al mejorar el confort y calidad del aire interior), se debe saber que por ejemplo al diseñar un programa de energía eficiente sólo teniendo en la cuenta la estructura o fachada de los edificios y los sistemas de purificación del aire, puede conllevar a un deterioro o incorrecto funcionamiento de los sistemas de ventilación natural, dando como resultado un bajo nivel en la calidad del aire (poca humedad relativa, favorable para el ahorro energético, pero desfavorable para la salud, o en sentido contrario, humedad relativa alta, generando mayor crecimiento de hongos y moho).

La ventilación gravitacional (natural) o por convección no necesariamente garantiza condiciones óptimas de microclima interior, por lo tanto, es necesario buscar un equilibrio adecuado entre el manejo de las diferentes variables involucradas, tales como temperatura, humedad relativa y material contaminante como CO₂, PM 2,5 y CO.

Estudios han mostrado [17] [18], que reducir o aumentar la temperatura en el aire interior afecta notablemente a la población que haga uso de estos espacios; por ejemplo, disminuir dos (2) grados (de veinte (20) a dieciocho (18)) la temperatura, puede causar una reducción del 12% en la demanda de calor, lo cual no es favorable para personas que trabajan o estudian en postura

sedente, por eso, es importante tener en cuenta todos los aspectos que influyan en la optimización de la calidad del aire. El dióxido de carbono también juega un papel importante, ya que tiene un alto impacto negativo en la salud y el bienestar de las personas, pero aun así la respiración de estas en espacios cerrados, como salones de clase y habitaciones es el mayor contribuyente de la contaminación por dióxido de carbono. La concentración más alta permitida en un ambiente de trabajo es de 5 000 PPM (Partes por millón), a niveles de 1000 ppm la pérdida de productividad es relativamente baja [8]. En la Tabla V se pueden observar las posibles consecuencias derivadas de la concentración de CO₂ en el aire.

*TABLA V.
CONSECUENCIAS DE LA CONCENTRACION DE CO2 EN EL AIRE [8]*

Rango	Consecuencias
450 – 1 000	Óptimo
2 000	Baja calidad de aire produce sueño
2 000 – 5 000	Posibles dolores de cabeza
> 5 000	Molestias y frecuencia cardiaca rápida
> 15 000	Problemas de respiración
> 30 000	Posibles mareos e indisposición
> 60 000	Desmayos

En la búsqueda de literatura, se observó que algunas investigaciones [19] muestran que la corrección en la temperatura, el porcentaje de humedad relativa en el aire y la concentración de CO₂ pueden generar ganancias en la productividad, también que la salud de empleados y estudiantes y la habilidad para mejorar el trabajo es más importante que los costos de transferencia de calor, climatización y costos de ventilación.

Se tenía planeado realizar la medición con dispositivos profesionales de medición ya calibrados, pero debido a la situación de pandemia que se vive a nivel mundial, no fue posible solicitar a instituciones educativas y gubernamentales los dispositivos profesionales necesarios y debido alto costo no fue posible adquirirlos, por tanto, se elaboró un dispositivo con componentes Arduino que se utilizó como instrumento de medición.

Al realizar las mediciones de las variables de confort térmico en el edificio El Lago, se observó que, al no estar encendido el aire acondicionado y no haber presencia de ocupantes, la temperatura es muy alta para un lugar cerrado, además, se aproxima a la temperatura media de Santiago de Cali, la cual se registra en 26 °C [9]. Lo anterior, se puede ver de manera gráfica en la Fig. 5. Para temperatura y en la Fig. 6 para humedad relativa.

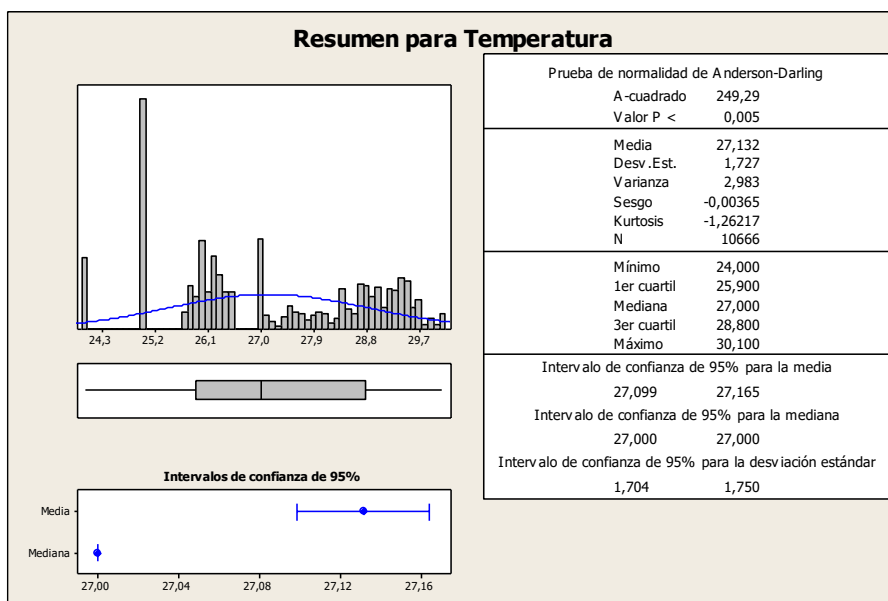


Fig. 5. Resumen promedio de temperatura en el edificio El Lago

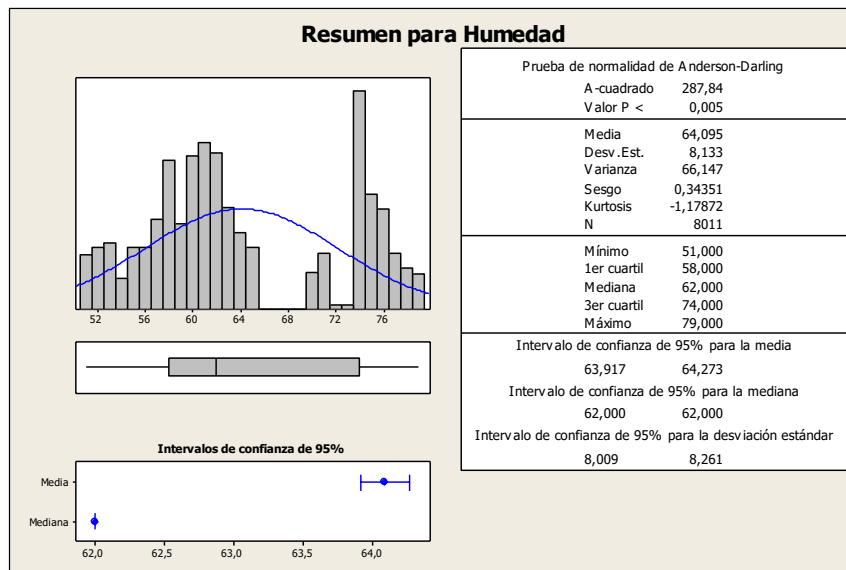


Fig. 6. Resumen promedio de humedad relativa en el edificio El Lago

En la Fig. 5 se puede apreciar que la desviación estándar es de 1,7°C, lo cual se debe al cambio de temperatura que se presenta durante distintas horas del día, dado que el dispositivo se dejó funcionando a lo largo de dos días aproximadamente. Se observa que los datos no se ajustan a una distribución normal y están altamente concentrados en la temperatura de 25,2°C, que es ligeramente por encima de lo establecido por la ASHRAE.

Para la variable de humedad relativa del aire (ver Fig. 6.), se aprecia que el promedio los salones del edificio El Lago está en 64%, este resultado se puede dar, debido a que, el aire acondicionado no está en funcionamiento y es el que ayuda a remover el agua en el aire para establecer condiciones óptimas, además el resultado se aproxima al promedio de humedad relativa que se presenta en el exterior del aula, es decir, en la ciudad de Cali [9].

Las mediciones realizadas en cuanto a las variables de calidad del aire arrojaron resultados aceptables según la norma, pero al igual que en el confort térmico hay una variable que sobrepasa el límite permisible, lo cual puede ser perjudicial para la salud de los ocupantes del aula. Aun así, se espera que los resultados estén ligados a las condiciones en las que las se tomaron las mediciones y que, en condiciones normales, los resultados mejoren. Lo anterior, se puede ver de manera gráfica en la Fig. 7 para el caso de monóxido de carbono (CO), en la Fig. 8. para dióxido de carbono (CO₂) y en la Fig. 9 para material particulado menor a 2,5 micras (PM 2,5).

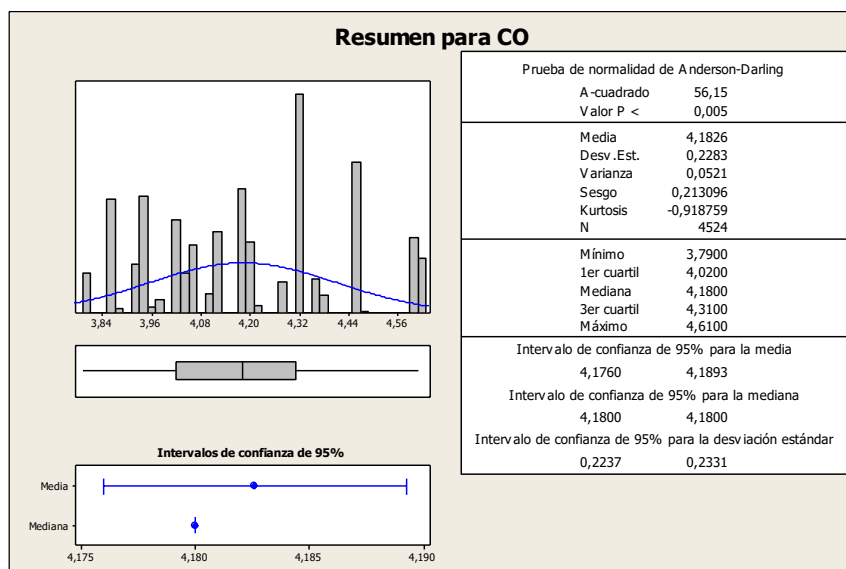


Fig. 7. Resumen promedio del monóxido de carbono en el edificio El Lago

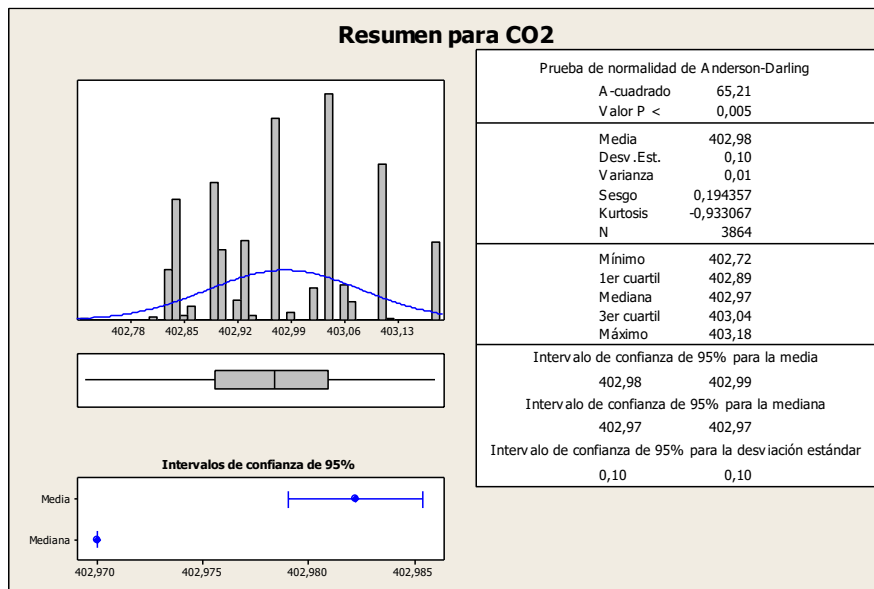


Fig. 8. Resumen promedio del dióxido de carbono en el edificio El Lago

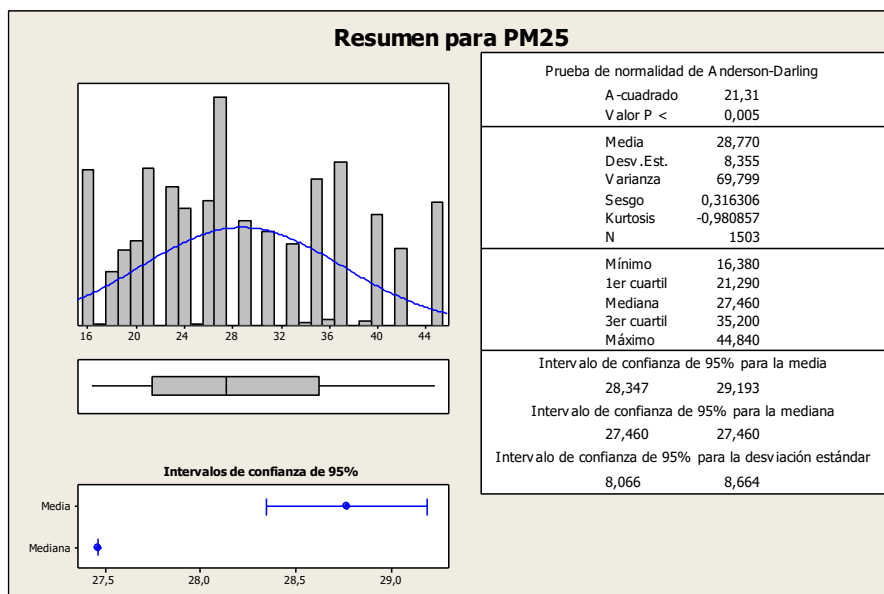


Fig. 9. Resumen promedio del material particulado en el edificio El Lago

El monóxido de carbono (CO) es considerado como un contaminante altamente nocivo, por lo cual, conocer la concentración en las aulas era importante para el estudio realizado. Como se puede apreciar en la Fig. 7 se obtuvo un promedio de 4,18 ppm el cual se encuentra en niveles aceptables en los que es posible trabajar, por lo tanto, el espacio es seguro para los estudiantes y docentes que hacen uso de este.

En la Fig. 8 se encuentra el resultado para la concentración de dióxido de carbono (CO₂), con un promedio de 402,98 ppm, el cual está muy cerca del mínimo establecido en la norma, pero se asume que la causa de este valor es debido a la ausencia de personas en el salón, además de ser el lago y la fauna cercana la única fuente de emisión de este contaminante constante. Se espera que al hacer uso de las instalaciones con condiciones normales el valor aumente significativamente pero no por fuera de los límites establecidos por la resolución 610 de 2010 y la INSHT.

Por otra parte, aunque el dióxido de carbono como contaminante en concentraciones por fuera del límite de confort térmico (un poco mayor a 1 000 ppm y menor a 2 000 ppm) no representa un riesgo para la salud como lo hace el monóxido de carbono, es importante tener en cuenta que afecta variables como la temperatura y produce efectos como los mencionados en la Tabla V

según las concentraciones, por lo cual para garantizar un confort térmico óptimo y además no afectar las actividades por efectos indeseados se debe tener en cuenta y ser controlada.

Con respecto al contaminante conocido como material particulado menor a 2,5 micras (PM 2,5), se puede apreciar en la Fig. 9 que el promedio es de 28,77 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el cual es mayor a lo permitido por la norma, es decir, no se podría trabajar bajo el panorama actual sin aire acondicionado; cabe resaltar que hay una alta variabilidad, esto se puede presumir que es debido a factores externos cercanos al edificio.

Con la información recolectada se realiza un resumen en la Tabla VI. Con las variables a medir en el proyecto, los resultados en la actualidad y la meta a la que se quiere llegar después de aplicar todas las mejoras la cual según las partes interesadas es que se cumpla con la respectiva norma que aplique según el caso.

TABLA VI.
VARIABLES DE INTERÉS – RESUMEN

Variable	Actualidad	Meta
Temperatura	Temperatura promedio: 27,13°C	Según la norma ASHRAE 55 debe estar entre 20°C y 25°C
Humedad relativa	Humedad: 64%	Según la norma ASHRAE 55 debe estar entre 30% y 60%
Dióxido de carbono (CO ₂)	Promedio: 402,98 ppm	Según la Guía Técnica de Lugares de trabajo del INSHT debe estar entre 400 ppm y 1 000 ppm
Monóxido de carbono (CO)	Promedio: 4,18 ppm	Según la resolución 610 del ministerio de ambiente y desarrollo sostenible debe ser menor a 8.8 ppm
Material particulado (PM _{2,5})	Promedio: 28,77 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Según la resolución 2254 del ministerio de ambiente y desarrollo sostenible debe ser menor a 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Como se puede apreciar, todos los datos recolectados de las variables de estudio son de mucha ayuda para realizar el análisis respectivo. De los resultados obtenidos se pudo observar que solo dos (2) variables se encuentran por dentro de los límites permisibles y una (1) de ellas está muy cerca al límite inferior, pero se presume que esto es debido a las condiciones en que las mediciones fueron tomadas.

IV. ANALIZAR

A. Análisis de causas

Con el fin de conocer la brecha entre el sistema actual y el sistema deseado, se realizó un análisis de variabilidad con Box Plots o diagramas de caja para cada variable, donde las líneas rojas punteadas representan los límites superior e inferior y la línea azul punteada el promedio de los datos, en algunos casos el límite superior o inferior están alejado del promedio de los datos recolectados, por lo cual no se incluyó en el Box Plot, esto se puede observar en las siguientes figuras.

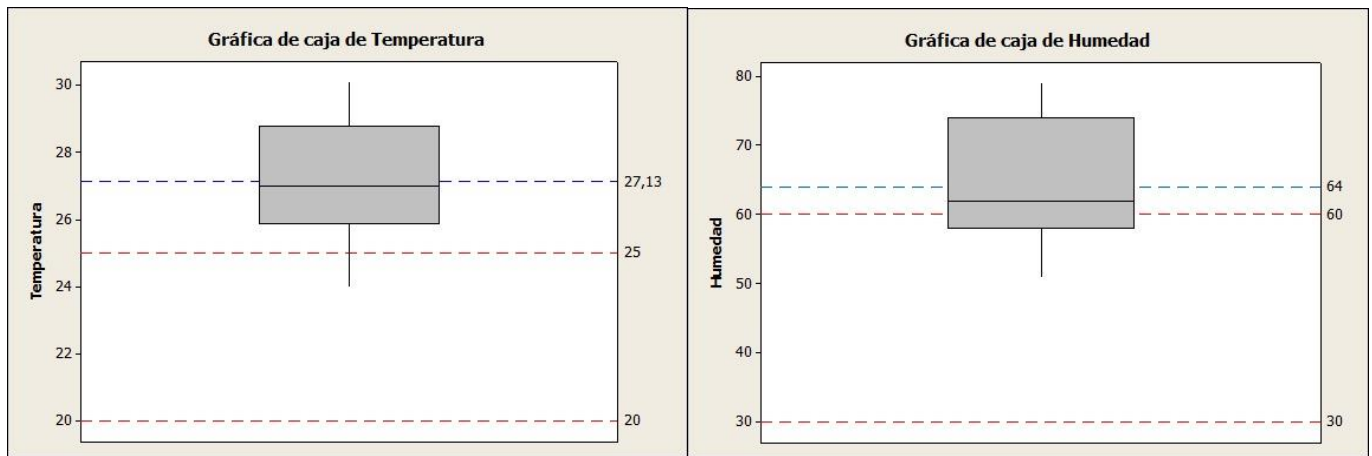


Fig. 10. Box Plots para las variables de Confort Térmico

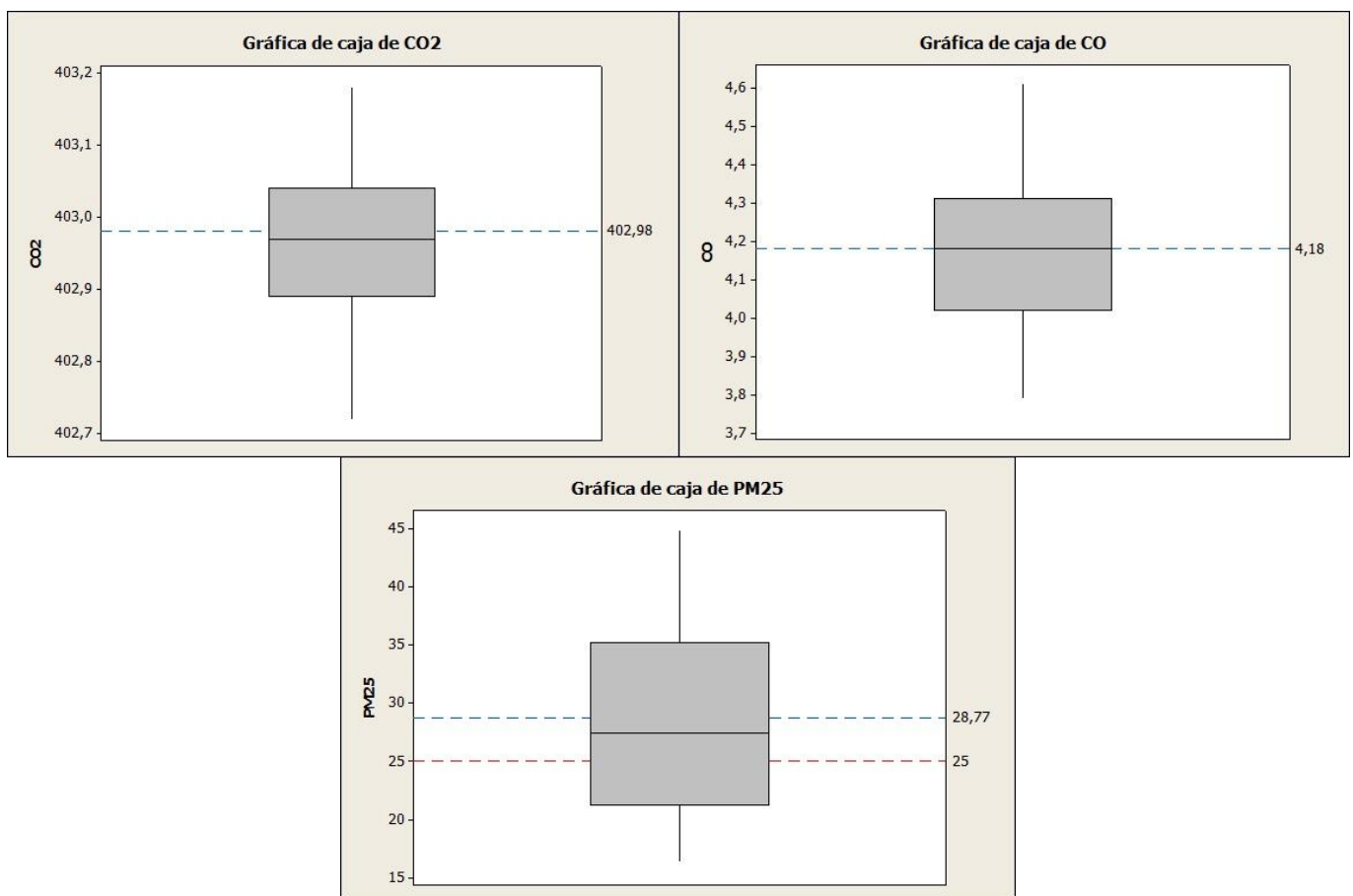


Fig. 11. Box Plots para las variables de Calidad del Aire

Después de realizar el análisis, se observó que los datos recolectados presentan variación en tres (3) de las cinco (5) variables a estudiar. En la Fig. 10 se pudo apreciar que tanto la variable de temperatura, como la de humedad relativa, dan como resultado un promedio superior al de los límites permisibles, por lo cual se asume que existe un problema y se deben estudiar las causas de esta variación en el sistema.

En cuanto a la Fig. 11., para las variables de monóxido de carbono y dióxido de carbono, los datos se encuentran por dentro de los límites permisibles, pero para el caso de material particulado, también se observó que el promedio está por encima del límite superior, entonces con el objetivo de conocer las causas potenciales que ocasionan inestabilidad en las variables que hacen

referencia a la calidad del aire y el confort térmico, se realiza una lluvia de ideas, para después ilustrarlas en el diagrama causa y efecto.

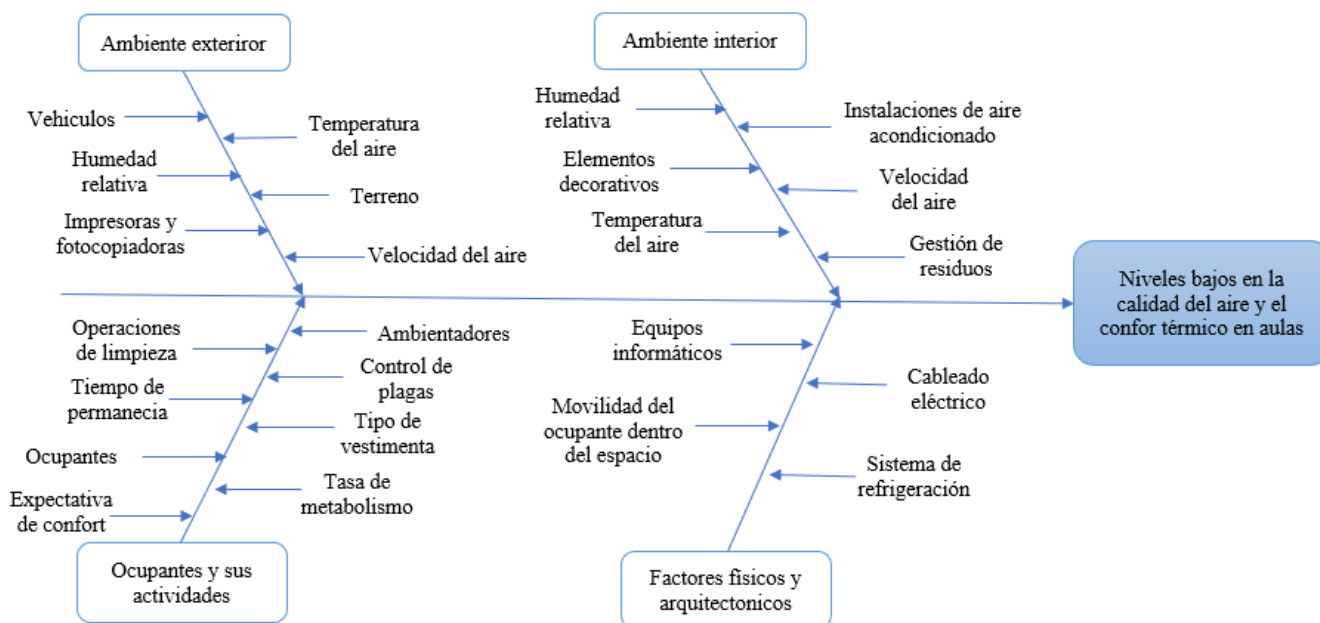


Fig. 12. Diagrama de causa y efecto para la calidad del aire y el confort térmico, basado en documento de sanidad ambiental de la comunidad de Madrid [10] y la norma ASHRAE 55 [11]

En la Fig. 12. se encuentra el diagrama de causa efecto para calidad del aire y el confort térmico, donde se pueden observar cuatro (4) ramas que influyen directamente según documento de sanidad ambiental de la comunidad de Madrid [10] y la norma ASHRAE 55 [11]. En la rama de ambiente exterior se encuentran todos los factores externos a las aulas de clase, en los cuales se pudo observar, que la zona donde se encuentra ubicada la universidad cuenta con altas concentraciones de vehículos automotores en la jornada estudiantil, además de obras que se realizan en el campo universitario y en el exterior de este, las cuales generan monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO²), radón, polvo y otros contaminantes nocivos para la salud [10]. Igualmente, se tienen en cuenta las instalaciones del edificio El Lago y su distribución, como, por ejemplo, el restaurante Café Sabor, las fotocopiadoras y las tuberías de agua en los baños y en los bebederos ubicados en diferentes espacios del edificio, ya que estos producen ozono, material particulado y compuestos orgánicos volátiles (COVs) [10]. Otro factor que se analizó fue el terreno de la universidad, que cuenta con diferentes recursos naturales, como fauna, flora, lagos y quebradas, los cuales pueden generar diferentes contaminantes que afectan la salud de los estudiantes y docentes. Por último, se analizaron los factores que según la ASHRAE 55, influyen en el confort térmico, como lo son temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del aire. En Santiago de Cali, la temperatura media anual es de 24 °C. Al medio día la temperatura máxima media oscila entre 30 y 31 °C, es decir, un clima cálido semihúmedo [12]. En el caso de la velocidad del aire, la media anual es de 1.27 m/s, el tiempo más ventoso del año va de octubre a febrero con una velocidad promedio de 1.44 m/s y el más calmado va de febrero a octubre, con un promedio de 1.1 m/s. Con respecto a la humedad relativa, en promedio es del 70%, pero en temporada de lluvia alcanza valores de 75 a 76% [13].

Las ramas de ambiente interior, ocupantes y sus actividades y factores físicos y arquitectónicos, son las que contienen las variables que afectan la calidad del aire dentro de las aulas de clase. En ambiente interior, se observó el mal funcionamiento de las instalaciones de acondicionamiento de aire, donde se presenta humedad en algunos salones proveniente del sistema de refrigeración, además de la generada por aguas lluvias, acueductos y alcantarillado. Los elementos decorativos, como tableros, sillas y mesas, también pueden generar variaciones debido a sus compuestos orgánicos volátiles (COVs), como los *formaldehidos*, que en constante exposición puede generar problemas respiratorios.

Teniendo en cuenta los valores presentados en el ambiente exterior de la ciudad de Cali, se observa que, en el interior de las aulas de clase, existen valores similares, los cuales no son óptimos para ambientes interiores. La universidad cuenta con un sistema de refrigeración, que ayuda a mejorar estos indicadores, pero teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la encuesta realizada a las partes interesadas (Ver anexo 1), donde se observa inconformidad por parte de la comunidad javeriana, se sospecha que hay un bajo nivel en cuanto a confort térmico.

También se tienen en cuenta los ocupantes y sus actividades, debido que son los directamente afectados por la calidad del aire, pero a su vez generan bajos niveles, ya que liberan por medio de la respiración dióxido de carbono (CO₂) [10]. Otro factor importante, son los productos que se utilizan para operaciones de limpieza, debido que, estos tienen concentraciones químicas, que, en espacios interiores, pueden generar incomodidad y molestia en las personas. En cuanto al confort térmico, se tienen en cuenta todos los factores que pueden generar incomodidad según los aspectos personales del ocupante, entre ellas, se analizó el tipo de vestimenta de los estudiantes de la universidad, donde se observó que tanto hombres como mujeres normalmente usan jean, tenis y camisetas para asistir a sus clases, las cuales son prendas cómodas y frescas para permanecer 2 o 3 horas en las aulas, debido que en el edificio El Lago no se ven clases que sobrepasen este intervalo de tiempo. Con respecto a la expectativa de confort, en la encuesta realizada a las partes interesadas, se pudo evidenciar que la mayor parte de la comunidad javeriana prefiere una sensación térmica ligeramente fría.

Por último, se tiene la rama de factores físicos, que es donde se encuentran causas que están más relacionados con el confort térmico, como lo son la temperatura, el ruido y la humedad relativa, las cuales son ocasionadas por el sistema de refrigeración, en el cual se observó un inadecuado funcionamiento en las aulas del edificio El Lago, debido que se maneja manualmente y no tiene un sistema de medición, que verifique si la temperatura se encuentra en el rango adecuado. En los aspectos arquitectónicos, se observó que el espacio de movilidad dentro de las aulas de clase es apto, para la cantidad de estudiantes y docentes que permanecen en ellas. También se analizó el cableado eléctrico y los equipos informáticos, como computadores y proyectores de video, que pueden generar campos electromagnéticos, los cuales hoy por hoy, en algunos grupos de ciudadanos existe una percepción negativa sobre los posibles efectos nocivos de la exposición a estos, pero esta percepción de riesgo en determinadas personas origina molestias como insomnio, dolor de cabeza o tensión nerviosa. [10]

Una vez identificadas las causas potenciales del problema de baja calidad del aire y confort térmico, se observó que la más influyente es el inadecuado funcionamiento del sistema de refrigeración, debido a que la encuesta aplicada se encontró incomodidad por parte de los ocupantes, ya que, en las aulas del edificio El Lago la sensación térmica percibida por la comunidad javeriana es alta, lo cual hace difícil realizar las actividades académicas; además, al recolectar los datos de las mediciones, se obtuvo resultados por fuera de los límites permisibles, para las variables de temperatura, humedad relativa y material particulado. Otra razón es que, en algunos salones se presenta gotereo en el aire acondicionado, generando así, diferentes contaminantes, que afectan la estadía en estos espacios. En la Tabla VII se realizó el análisis de 5 por qué's para encontrar la causa raíz del problema.

*TABLA VII.
ANÁLISIS 5 POR QUÉ'S*

Inadecuado funcionamiento del sistema de refrigeración				
¿Por qué 1?	¿Por qué 2?	¿Por qué 3?	¿Por qué 4?	¿Por qué 5?
Se evidencian inconformidades manifestadas por estudiantes y docentes encuestados sobre la calidad del aire y confort térmico	El edificio El Lago no cuenta con un sistema de refrigeración centralizado el cual permita controlar o registrar las condiciones dentro de las aulas de clase	El edificio El Lago cuenta con un sistema manual de refrigeración.	El edificio es uno de los primeros que se construyeron, por lo que se realizan las tareas de forma manual y no se recolectan datos de calidad del aire y confort térmico	La universidad no cuenta con una metodología de medición estandarizada que pueda evaluar y ayudar a prevenir riesgos sobre confort térmico y calidad del aire

Como resultado del análisis de 5 por qué's, se obtuvo que la causa raíz del problema es que la universidad no cuenta con una metodología de medición estandarizada, que permita evaluar y ayudar a prevenir riesgos en cuanto a confort térmico y calidad del aire, que es la inconformidad manifestada por las personas encuestadas en las aulas del edificio El Lago y al no tener como caracterizar la situación actual de los salones, se dificulta realizar una propuesta que pueda dar solución al problema.

B. Revisión de literatura

La no existencia de una metodología de medición de la calidad del aire y confort térmico en las aulas de la universidad, no permite que se tenga información de las condiciones dentro de los salones y que pueden estar afectando negativamente la salud y el rendimiento académico de la población asistente a la universidad.

Es así como, para el desarrollo del proyecto se procede a realizar la revisión de literatura que fue consultada de diferentes fuentes bibliográficas, las cuales tienen afinidad con la oportunidad de diseño identificada en el proyecto, esto con el fin de hacer una investigación académica sobre las diversas metodologías de medición y métodos propuestos de mejora que permitan contextualizar y profundizar sobre la importancia del análisis a través de la literatura. El resumen de la revisión bibliográfica efectuada puede ser consultada en el (Anexo 6).

En primer lugar, con el fin de tener conocimiento acerca de las normas existentes que rigen la calidad del aire y el confort térmico, se consulta la Norma global *ASHRAE standard 55* [13]. El estándar describe las condiciones en las cuales una fracción específica de los ocupantes de un espacio interior encontrará el ambiente térmicamente aceptable. El estándar está diseñado para su uso en el diseño, la puesta en marcha y las pruebas de edificios y otros espacios ocupados y sus sistemas HVAC y para la evaluación de entornos térmicos. También el estándar ofrece un método de evaluación de la comodidad de los edificios existentes desde la perspectiva de los ocupantes a partir de una guía de encuestas de satisfacción y mediciones ambientales. Standard 55 se publicó por primera vez en 1966 y se volvió a publicar en 1974, 1981 y 1992. A partir de 2004, ahora se actualiza de manera regular utilizando los procedimientos de mantenimiento continuo de ASHRAE.

Por otra parte, en Colombia existe la *Norma Técnica Colombiana (NTC) 5183* [14], la cual reglamenta la ventilación para una calidad aceptable del aire en espacios interiores, dicha norma es una versión de la Norma ASHRAE 62 la cual define los requisitos de ventilación para espacios destinados a ocupación humana y especifica las cantidades mínimas y las recomendadas de aire ventilado para preservar la salud y bienestar de los ocupantes, también dispone de un enfoque prescriptivo de la ventilación, especificando tanto las tasas mínimas de flujo de aire exterior como las recomendadas, para obtener una calidad aceptable de aire interior en una variedad de sitios interiores. Esta norma es la única que existe en Colombia y la más cercana al tema de calidad de aire y confort térmico, la cual solo evalúa la refrigeración en un espacio interior.

En el artículo *characterization of suspended particles in the university classrooms and offices in Bor, Serbia* [15], los autores se proponen presentar resultados de un estudio en curso sobre la exposición de estudiantes y maestros a partículas suspendidas en las aulas y oficinas seleccionadas en el Universidad de Belgrado, Facultad Técnica en Bor, Serbia, esto con el fin de definir la calidad del aire interior en los edificios educativos, ya que los estudiantes pasan gran tiempo en las aulas y lamentablemente, casi no hay programas de monitoreo sistemáticos que aborden este tema. Se midieron concentraciones de masa de partículas (TSP, PM 10 y PM 2,5) en las aulas y oficinas seleccionadas, con el monitor de partículas de aire en tiempo real llave en mano OSIRIS (Modelo 2 315). Se realizaron varias mediciones de muestreo en estaciones cálidas (abril-septiembre) y estaciones de frías (octubre-marzo) en el intervalo de tiempo de 2011 a 2016. Se observó un exceso del límite diario de PM 10 en el aire ambiente en el 17% de los días durante la temporada de calor y en el 40% de días en la temporada frías. El exceso del límite diario de PM 2,5 en el aire ambiente se observó en el 21% de los días durante la temporada de calor y en el 48% de los días en la temporada de frío.

También en el artículo *Assessment of indoor air quality in renovated buildings of Liepaja municipality* [8], los autores realizaron una investigación de edificios del sector público recientemente renovados, en el cual se enfatiza la capacidad de una persona para realizar tareas mentales en lo que respecta a los cambios en el confort térmico y la calidad del aire, para esto se llevaron a cabo encuestas con el gerente y los habitantes. Así como también se hicieron cálculos de los cambios en la productividad humana, también se han modelado cuatro escenarios de ventilación y se han evaluado los beneficios económicos de cada escenario. Como resultado solo unos pocos sistemas de ventilación de edificios trabajan con automatización en tiempos precisos, además en la mayoría de los edificios las mediciones de CO₂ son superiores a 1000 ppm y la velocidad del aire es demasiado baja, lo cual refleja que los edificios tienen unas condiciones no satisfactorias para sus habitantes.

En la obtención de datos el artículo *Indoor Air Quality in residential buildings in Upper Silesia, Poland* [16], proporciona datos sobre los niveles de concentración de contaminantes del aire interior y exterior en la región más contaminada de Polonia, que se puede utilizar para evaluar la exposición de los ciudadanos en la Alta Silesia, que es una de las zonas más contaminadas de la Unión Europea (UE). Los objetivos específicos incluyen la investigación de CO₂, NO₂, COV seleccionados y niveles de PM 4 en entornos residenciales (dos pisos y cuatro casas) durante la temporada de invierno, también la indicación de qué contaminantes dominan las fuentes exteriores o interiores, así como identificación de los contaminantes atmosféricos más influyentes entre determinados y la discusión sobre el contaminante atmosférico más relevante fuentes en edificios residenciales estudiados. En este estudio, se determinaron cuatro grupos de contaminantes (CO₂, BTESX, NO₂ y PM 4) en seis sitios de muestreo. A pesar de los diferentes volúmenes de habitaciones y el número de ocupantes, el CO₂ fue caracterizado por la menor diversidad entre contaminantes determinados.

Es importante, además, resaltar el aporte de los autores L.Lan, Wargocki P, D.P. Wyon y Z. Lian en los artículos [17] [18] y [19] respectivamente, donde explican que un nivel inadecuado de temperatura o velocidad del aire, no sólo afecta la salud de las

personas que están expuestas al mismo, sino que también, afecta la productividad de las mismas, ya que estas se sienten incómodas trabajando en un ambiente inadecuado y deben realizar más pausas de las necesarias para lograr una cierta comodidad, esto sucede tanto en adultos como en niños, es decir, el confort térmico y una buena calidad de aire es importante en un espacio interior, independiente de quienes realicen la actividad.

Para finalizar, Angélica Castillo y Luz Obregón en su artículo *incidencia del síndrome del edificio enfermo en la salud de los trabajadores de la dirección seccional de impuestos y aduanas de buenaventura* [4], presentan una investigación con el objetivo de determinar la incidencia del Síndrome en la salud de los trabajadores de la Dirección Seccional de Impuestos y Aduanas de Buenaventura, con la finalidad de divisar aquellas anomalías que se han generado en el entorno, los efectos producidos y las implicaciones que ha tenido en términos de seguridad y bienestar laboral. Se empleó una investigación de tipo descriptiva, la cual facilitó la obtención de datos, con el fin de conocer y comprender las variables del entorno laboral que afectan el bienestar de los trabajadores. Los datos se recogieron mediante encuestas y posteriormente se organizarán por medio de estadígrafos como distribuciones de frecuencias e indicadores de tendencia central (media, moda y mediana). Con la investigación se logró determinar la prevalencia de los síntomas en los individuos afectados, tales como visión borrosa, congestión nasal, dolor y sequedad en la garganta, entre otros síntomas, que de no prestarle la debida atención se pueden presentar reiteradamente incapacidades laborales y enfermedades profesionales, que en la gran mayoría de los casos ocasionan disconfort, absentismo y baja productividad.

Además como mejora se diseñó un plan de Gestión de Calidad para el fortalecimiento de entornos laborales saludables que implica la puesta en marcha de acciones correctivas, preventivas y de mejora continua, en un marco de tiempo determinado, bajo la responsabilidad de un gestor que estará asistido por un equipo de trabajo, los cuales serán asignados de acuerdo a los requerimientos establecidos y deberán cumplir con los procesos de gestión y estándares de calidad que garanticen la correcta ejecución del proyecto y con ello, la obtención de resultados favorables tanto para la entidad como para los trabajadores en pro de su bienestar [4].

C. Exploración de ideas y selección de alternativa

Con el fin de complementar la metodología de medición que se trabaja a lo largo del documento, se propone una opción de mejora para el problema encontrado con respecto a la calidad del aire, se hace uso de la técnica de ideación “Walt Disney”, la cual consiste en tres etapas: La primera una lluvia de ideas llamada la etapa “soñadora” la cual es la etapa en la que se generan las ideas, sin importar de qué tipo sean estas. La segunda etapa, aterriza estas ideas que se generaron en la primera, esta se conoce con la fase “realista”; por último, la tercera etapa conocida como la etapa “crítica”, identifica la razón o el porqué de cada alternativa que se propuso. Una vez una idea pasa de manera exitosa las tres etapas mencionadas anteriormente, se establecen como posibles alternativas, las resultantes se aprecian a continuación:

- **Filtros de aire de alta eficiencia:** Esta alternativa consiste en un purificador de aire, con el fin de reducir partículas de compuestos orgánicos volátiles, que pueden contribuir al aumento de síntomas relacionados con el edificio enfermo [20]. Estos filtros de alta eficiencia son acompañados por dos filtros de menor grado de aspiración con el fin de reducir costos de mantenimiento [21].
- **Control de aire acondicionado usando retroalimentación de los usuarios:** Esta alternativa consiste en instalar un sistema automático de ajuste de refrigeración en los aires acondicionados de la universidad, con base en la experiencia de los usuarios mediante una aplicación controlada que se puede instalar en cualquier teléfono inteligente [22], lo que ayudará a automatizar el sistema cumpliendo con los requerimientos de las partes interesadas.
- **Cambio en el plan de mantenimiento periódico de los aires acondicionados:** Con esta alternativa se busca que los aires acondicionados funcionen de una manera más eficiente al encontrarse en óptimas condiciones, realizar mantenimientos preventivos en lugar de correctivos facilita esta tarea, además de ahorrar en costos y minimizar problemas de salud [23]. Consiste en disminuir el tiempo entre los mantenimientos de los aires acondicionados a la mitad.
- **Control en puertas y ventanas:** Con esta alternativa se busca reducir la cantidad de contaminantes que entran desde el exterior y afectan la calidad del aire al interior de las aulas [24], además de reducir el consumo energético y ser una solución fácil de implementar a corto plazo. Consiste en ejercer un control más estricto sobre las puertas y ventanas al momento de tener activo el sistema de refrigeración de la universidad, cerrándolos cuando estos sean utilizados.

Para la selección de la mejor alternativa se realiza un proceso de análisis jerárquico (AHP) [25] en conjunto con una matriz de preferencias [26], el cual tiene como fin por medio de una calificación (Ver Anexos 7 y 8), establecer la viabilidad de cada

propuesta. Estos criterios son seleccionados por el Equipo de trabajo y un experto en el área de aire acondicionado, con el fin de que la propuesta de solución sea viable y pueda satisfacer los requerimientos de las partes interesadas.

Se hace la selección de cinco (5) criterios, los cuales se ha establecido su importancia, teniendo en la cuenta los requisitos de las partes interesadas y la asistencia del experto, como se puede apreciar en la Tabla VIII, es la siguiente: 1) Satisfacción del cliente el cual se refiere a qué tan satisfechas quedarían las partes interesadas, según los requerimientos especificados, con la opción a elegir; 2) Impacto ambiental, el cual se refiere a cómo la alternativa impacta negativamente al medio ambiente; 3) Confiabilidad y pertinencia, la cual se refiere a qué tanto la alternativa ayudará a solucionar el problema; 4) Costo, que se refiere a la evaluación económica de la alternativa, suponiendo que tan costosa puede llegar a ser su implementación; 5) Facilidad de implementación, que se refiere a la simplicidad de ser implementada y usada una alternativa.

*TABLA VIII.
PORCENTAJES DE PRIORIDAD DE LOS CRITERIOS*

Criterio	Prioridad
Satisfacción del cliente	41,8%
Impacto ambiental	26,4%
Confiabilidad y pertinencia	16,5%
Costo	10,4%
Facilidad de implementación	4,9%

Una vez se establece la importancia de cada criterio, por medio de la matriz de preferencias para la selección de alternativas [26], en la cual se hace uso de una calificación del uno (1) al diez (10), siendo uno el puntaje menos favorable y diez el puntaje más favorable con respecto a la alternativa a evaluar y el criterio de selección, es decir, una alternativa cuyos puntajes sean mayores, es la más preferida para ser seleccionada como propuesta de mejora. Para seleccionar la mejor alternativa se multiplica la prioridad (obtenida de la matriz AHP), con la calificación dada (puntaje del uno al diez), por cien. Se muestran los puntajes obtenidos en la Tabla IX en la que se observa que la alternativa con mayor puntaje es el control del aire usando retroalimentación. Sin embargo, por las condiciones externas que afectan al proyecto como, la situación de contingencia que se vive por el SARS-CoV-2 Covid 19, el tiempo en el que se puede implementar la solución y posteriormente ver sus resultados, además de los costos inmediatos del proyecto se propone como opción de mejora, los filtros de aire de alta eficiencia. Es importante mencionar que las propuestas no son mutuamente excluyentes, y que implementadas en conjunto se podría obtener un mejor resultado.

*TABLA IX.
PUNTUACIÓN TOTAL DE LAS ALTERNATIVAS*

Criterio	Prioridad
Filtros de aire de alta eficiencia	736,8
Control del aire usando retroalimentación	738,5
Cambio en el plan de mantenimiento periódico	654,4
Control de puertas	569,1

D. *Objetivos*

Objetivo general: Diseñar una metodología a través de herramientas de ingeniería para medir la calidad del aire y confort térmico con el fin de identificar riesgos y alternativas de mejora en las aulas de la Pontificia Universidad Javeriana Cali.

Objetivos específicos:

1. Desarrollar una metodología para medir los parámetros requeridos por la norma internacional ASHRAE 55 y la reglamentación colombiana RITE 2017.

2. Diseñar un dispositivo de medición de calidad del aire y confort térmico para las aulas de la Pontificia Universidad Javeriana Cali.
3. Crear una herramienta para identificar el nivel de riesgo en cuanto a la calidad del aire y confort térmico de las aulas de la universidad Javeriana Cali.
4. Validar técnica, financiera y ambientalmente la viabilidad de la solución propuesta.

E. Plan de trabajo

La Tabla X muestra el plan de trabajo de proyecto, en el cual se presentan las actividades que se van a llevar a cabo para cumplir con los objetivos específicos, con el fin de cumplir con los requerimientos de las partes interesadas, el cronograma detallado se puede apreciar en el (Anexo 9).

TABLA X.
PLAN DE TRABAJO

Objetivo	Área IISE	Herramientas de Ingeniería Industrial	#	Actividad	Entregable (alcance)	Fecha entrega
Diseñar un dispositivo de medición de calidad del aire y confort térmico que sea adecuado a las condiciones de operación de las aulas de la universidad Javeriana Cali	Ingeniería de operaciones y administración	Equipos	F	Construir una herramienta de medición de variables de calidad del aire y confort térmico hecho con Arduino	Un (1) equipo de medición hecho con placa de Arduino y sensores que permite medir partículas del aire y variables como temperatura y humedad	12/10/2020
Desarrollar una metodología de medición que permita recolectar los parámetros más relevantes basado en la norma internacional ASHRAE 55 y la reglamentación colombiana RITE 2017.	Ingeniería de la información	Requisitos de información para las organizaciones	C	Crear software de recolección de parámetros relevantes, que permita su análisis de forma sencilla	Excel que permita la visualización de datos recolectados y los organice según criticidad basado en las normas (anexo 10)	16/10/2020
		Diseño de formularios	N	Crear un manual de procedimientos que permita a un operario realizar un estudio correctamente cuando este sea requerido	Manual de uso del dispositivo.	23/10/2020
Crear una herramienta que permita evaluar el nivel de riesgo en las aulas de la universidad, con respecto a la calidad del aire y confort térmico.	Seguridad	Reconocimiento, evaluación y control de riesgos	C	Desarrollar indicadores que permitan conocer el nivel de riesgo en el que se encuentran las personas al interior del aula de clase por motivos de calidad del aire y confort térmico	Excel con los respectivos indicadores y sus valores límites	24/10/2020
	Ingeniería de la información	Diseño de formularios	N	Crear documento de interpretación de indicadores	Manual de interpretación del Excel	24/10/2020

Objetivo	Área IISE	Herramientas de Ingeniería Industrial	#	Actividad	Entregable (alcance)	Fecha entrega
Validar la viabilidad de la solución técnica, financiera y ambiental.	Ingeniería de calidad y confiabilidad	Estadística y análisis de capacidad	B	Simulación del funcionamiento de mejoras en caso de ser implementadas	Resultados de los indicadores estudiados derivados de la simulación	11/11/2020
	Análisis económico ingenieril	Estimación económica de elementos	L		Comparación con equipos actuales, junto con las potenciales ventajas y desventajas de adquirirlos	11/11/2020

V. MEJORAR

A. Desarrollo del diseño de la solución

En el siguiente apartado, se comenzó con el diseño de un dispositivo de medición de calidad del aire y confort térmico que se adecuara a las condiciones de operación de las aulas de la Pontificia Universidad Javeriana Cali y proporcionara los datos necesarios para el análisis de las variables seleccionadas en este proyecto.

Para la construcción del dispositivo de medición se hizo uso de Arduinos, con componentes electrónicos, encargados de captar la información mediante sensores que proporcionaron la información acerca de las concentraciones y niveles de las variables a medir generadas por fuentes fijas y variables en las aulas que sirvieron de muestra en la universidad, además permitieron guardar la información recolectada para su posterior análisis.


*TABLA XI.
CARACTERÍSTICAS DEL DISPOSITIVO DE MEDICIÓN*

Características requeridas para el dispositivo de medición	
Disponibilidad	Los componentes del dispositivo deben encontrarse en el mercado nacional y ser de fácil acceso.
Flexibilidad	El dispositivo de poder realizar varias funciones al mismo tiempo.
Precisión	Capacidad del dispositivo de tener la misma salida de diferentes muestras a las mismas condiciones.
Rango	El dispositivo debe tener un rango que abarque los exigidos por ley.
Durabilidad	El dispositivo debe tener una vida útil de mínimo 1 año.
Costo	El dispositivo debe ser de un costo accesible para poder construir varios.

La selección de los componentes electrónicos se hizo con base en las características mostradas en la Tabla XI donde se tuvo en cuenta la disponibilidad, flexibilidad, precisión, rango, durabilidad y costo. Luego de analizadas las características para la construcción global del dispositivo se obtuvo como resultado los elementos electrónicos mostrados en la Tabla XII.

*TABLA XII.
COMPONENTES DEL DISPOSITIVO DE MEDICIÓN DE CALIDAD DEL AIRE Y CONFORT TERMICO*

Componentes del dispositivo de medición

 <p>[28]</p>	<p>Sensor MQ-135 es un sensor de calidad del aire que permite detectar algunos gases peligrosos como Amoniaco, Dióxido de Nitrógeno, Alcohol, Benceno, Dióxido y Monóxido de carbono. El sensor puede detectar concentraciones de gas entre 10 y 1 000 ppm y es de utilidad para detección de gases nocivos para la salud en la industria principalmente.[28]</p>
 <p>[29]</p>	<p>Sensor MQ-4 es un sensor de detección de gases inflamables como el metano, hidrogeno, gas licuado de petróleo, alcohol y humo. Este sensor puede detectar concentraciones desde las 200 hasta las 10 000 ppm. Tiene una alta sensibilidad y un tiempo de respuesta rápido. [29]</p>
 <p>[30]</p>	<p>Sensor DHT11 es un sensor digital de temperatura y humedad. Integra un sensor capacitivo de humedad y un termistor para medir el aire circundante, y muestra los datos mediante una señal digital. El sensor tiene un rango de 0 a 50 °C para la temperatura y de 20% a 90%RH para la humedad. [30]</p>
 <p>[31]</p>	<p>Esta tarjeta de interfaz permite almacenar grandes cantidades de información en una memoria microSD, se puede usar con Arduino y en general con cualquier microcontrolador y tarjeta de desarrollo. [31]</p>
 <p>[31]</p>	<p>Arduino UNO es un microcontrolador compuesto por un circuito integrado en el que se puede grabar instrucciones que permiten crear programas que interactúan con los circuitos de la placa. [31]</p>

Una vez seleccionados los componentes se realizó el diseño del dispositivo de medición el cual se muestra en la Fig. 13., se ensambló sobre una base de cartón duro, donde se montaron todos los componentes, incluyendo una baqueta de conexión universal, estos fueron adheridos a la base con silicona con el fin de que el dispositivo fuera bastante liviano. No se utilizó ninguna cubierta o caja ya que no era necesario porque las mediciones se efectuarían en interiores y también porque podría afectar la recolección de datos debido a que la cubierta podría interferir entre los sensores y las variables a medir en el entorno. El dispositivo puede ser alimentado por medio de un adaptador de 5 Voltios o una batería que proporcione la misma energía. Es de resaltar que para la realización de este proyecto se construyeron 4 dispositivos con el fin de obtener la mayor información posible sobre la edificación muestra.

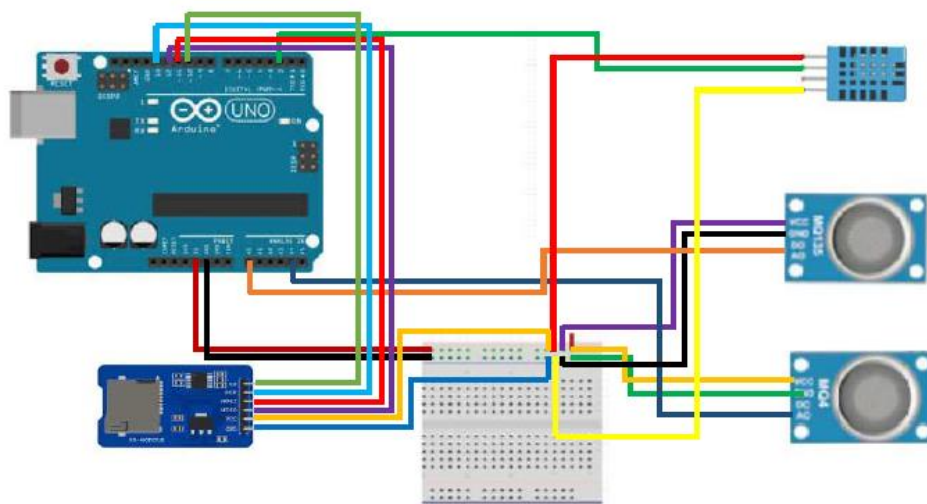


Fig. 13. Diseño del dispositivo de medición. de Calidad del aire y Confort térmico.

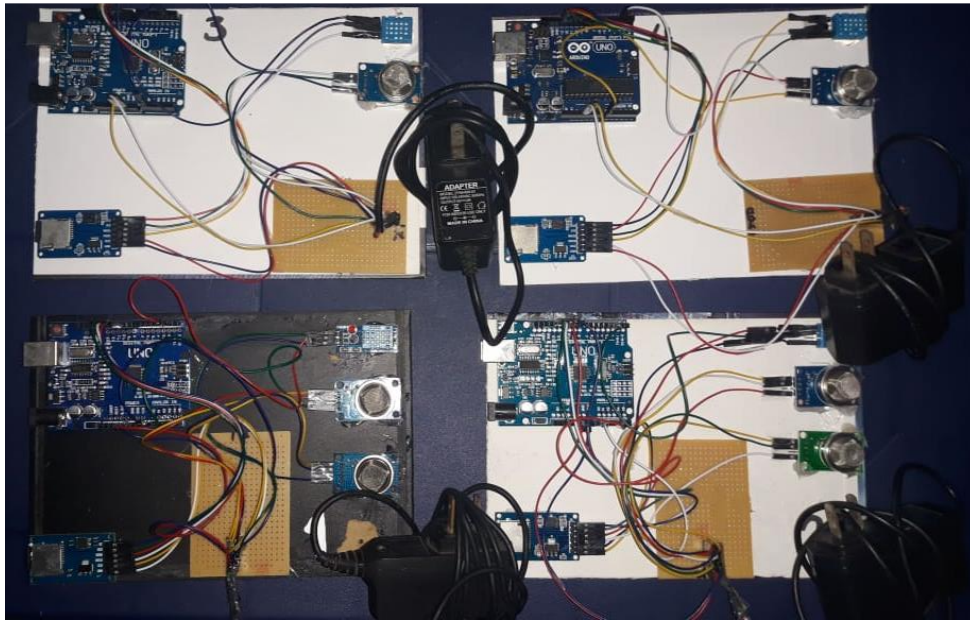


Fig. 14. Dispositivos de medición. de Calidad del aire y Confort térmico.

Por otra parte, la metodología propuesta para la medición de la calidad del aire y confort térmico en las aulas de la universidad se encuentra estimada en cuatro etapas perteneciente al ciclo PHVA o ciclo Deming: Planear, Hacer, Verificar y Actuar; estas se originan de diversos estándares de evaluación de gestión de la calidad y mejora continua.

La Fig. 15. ilustra la secuencia de pasos que se debe seguir al momento de querer efectuar las mediciones asegurando el adecuado uso y funcionamiento de los dispositivos de medición, al igual que la forma correcta de la recolección de la información, en el cumplimiento del objetivo principal del proyecto y siguiendo los lineamientos de la norma ASHRAE y RITE.



Fig. 15. Ciclo PHVA de la metodología propuesta de medición. de Calidad del aire y Confort térmico.

La etapa planear corresponde a las actividades que debe ejecutar la persona que efectuará la medición las cuales corresponden a: la organización de la información, reconocimiento del entorno y obtención de recursos necesarios. Esto con el fin de realizar la planeación controlada de la toma de mediciones lo que permite manejar bajos niveles de incertidumbre, delimitando las variables que puedan afectar el entorno de estudio a lo largo del tiempo de ejecución de este, evitando los reprocesos y optimizando tiempos, costos y demás recursos; también facilita la asignación de tareas y el control de estas. En la Fig. 16 se muestra un formato para establecer las variables a medir, los recursos a ser usados y el costo de estos.

Guía reconocimiento para el análisis del entorno								
Fecha							Página	
Nombre de la Institución								
Cargo que ocupa en la institución								
Edificio								
Aulas de clase								
Duración				Fecha inicio			Fecha fin	
Variables a medir	Variables			Fuentes				
Recursos físicos	Recurso	Justificación		Cantidad	Costo			
			Costo total					
Realizado por:	Diligenciado por:			Aprobado por:				

Fig. 16. Plantilla de reconocimiento del entorno etapa planificar

En la etapa hacer se realiza la aplicación de los instrumentos seleccionados por parte de los encargados de la medición, esta etapa tiene como fin recolectar la información necesaria para llevar a cabo los respectivos análisis de la calidad del aire y confort térmico de las aulas de la universidad a través de los indicadores que se obtuvieron teniendo en cuenta la norma ASHRAE 62 y RITE 2017. Además de aplicar los instrumentos correspondientes, se ejecuta una verificación de la veracidad de los datos obtenidos de los dispositivos de medición con la información existente realizada en la etapa de planificación, esto con el objetivo de comprobar que las respuestas de los dispositivos coinciden realmente con la planeación que se llevó a cabo, al igual que con la documentación registrada. Para la verificación de los dispositivos de medición se utilizan los siguientes formatos el primero de recolección de datos mostrado en la Fig. 17. y el segundo sobre las especificaciones del dispositivo de medición Fig. 18.

Formato de recolección de datos			
Fecha		Página	
Nombre de la institución			
Edificio		Aula de clase	
Duración			
Fecha inicio		Fecha Fin	
Dispositivo de medición			
N°	Variable:	Variable:	Variable:
1			
2			
3			
4			
5			
6			
Observaciones:			
Realizado por:	Diligenciado por:	Aprobado por:	

Fig. 17. Plantilla para recolección de datos

Ficha técnica del dispositivo							
Nombre o identificación							
Fabricante							
Modelo							
Capacidad							
Marca							
Características generales							
Peso		Altura		Ancho		Largo	
Foto del dispositivo				Características técnicas			
				Función			
Último mantenimiento	Fecha:						
	Realizado por:						

Fig. 18. Ficha técnica para dispositivos de medición

La etapa verificar corresponde a la realización del análisis de los datos obtenidos por los diferentes dispositivos de medición en la etapa hacer; después de un análisis de las variables definidas y recolectadas de la plantilla de reconocimiento del entorno Fig. 17. y del formato de recolección de datos Fig. 18., se determina el cumplimiento de los resultados recolectados con las normas establecidas por la ASHRAE y RITE. La validación de la información se hace en el formato de validación mostrado en la Fig. 19.

Formato de validación de mediciones				
Fecha				
Nombre de la institución				
Edificio				
Dispositivo de medición				
Variable	Promedio	Calidad de la variable medida según las normas ASHRAE y RITE		
		Buena	Media	Baja
Realizado por:	Diligenciado por:	Aprobado por:		

Fig. 19. Formato de validación de datos recolectados por los dispositivos de medición.

En esta fase es necesario para la ejecución del análisis y medición de cada una de las variables, la realización de una escala de valoración que permita una evaluación objetiva de la planeación del proyecto; por lo tanto, se propone la evaluación en una escala constituida por tres contextos de calificación, el primero es **Buena**, que involucra: que en promedio la variable se encuentra dentro de los rangos establecidos por norma, el segundo es **Medio** que significa: que en promedio la variable se encuentra en el rango máximo permitido, y el tercero es **Malo** que implica: que en promedio la variable se encuentra fuera del rango permitido.

Para finalizar con la metodología de evaluación en la etapa actuar se presentan las actividades que pertenecen a la entrega de informes y propuesta de mejora considerando los resultados y hallazgos que se obtuvieron en la etapa verificar; los informes a elaborar al finalizar la medición de las variables objetivo corresponden a: primero un informe detallado sobre el procedimiento que se llevó a cabo en la medición y evaluación de las variables estudio, segundo un informe gerencial que resuma los hallazgos relevantes para la universidad y tercero un documento donde se presente la propuesta de mejoramiento o posibles acciones en función de mejorar la calidad del aire y confort térmico de las aulas de clase de la universidad; a continuación se proponen algunos instructivos guía para la realización de los informes, que se pueden observar en las Fig. 20. y Fig. 21.

En el Anexo 10. se encuentra de manera detallada el manual de medición, con las cuatro (4) etapas que se deben realizar y todas las plantillas necesarias para realizar la recolección de datos en forma correcta de las variables de calidad del aire y confort térmico.

Resumen informe general			
Fecha inicio		Fecha fin	
Nombre de la institución			
Responsables			
Edificio			
Aulas de clase			
Variable	Valor obtenido	Valor esperado	
Gráfico resumen			
V. Obtenido	V. Esperado		
23	25		
19	28		
6	20		
15	20		
25	25		
17	20		
Realizado por:	Diligenciado por:	Aprobado por:	

Fig. 2019. Formato resumen para el informe gerencial.

Formato guía para elaboración de recomendaciones		
Variable	Situación actual	Recomendaciones
		1.
		2.
		3.
		1.
		2.
		3.
		1.
		2.
		3.
		1.
		2.
		3.
Realizado por:	Diligenciado por:	Aprobado por:

Fig. 201. Formato guía de plan de mejoramiento.

Por último, de acuerdo con la situación hallada en la universidad sobre la calidad del aire y confort térmico se plantean dos propuestas de mejora. La primera consiste en la implementación de filtros de aires de alta eficiencia, estos constan de un purificador de aire electrónico y eléctrico que circulará el aire hacia él, contribuyendo a mejorar la calidad de aire que respiran los ocupantes del aula mediante la reducción de partículas de compuestos orgánicos volátiles, de productos químicos utilizados para limpieza, bacterias, hongos, moho, etc., que podrían afectar la salud y por ende el desempeño de los participantes de las aulas de clase de la universidad. Para la implementación del filtro éste debe: primero indicar el tamaño máximo y mínimo de la habitación en m^2 en la que puede ser instalado, de esta forma se garantiza una limpieza eficaz del aire si se instala un filtro purificador de tamaño superior al del aula de clase, segundo debe presentar el consumo de energía eléctrica, esto permitirá evaluar el gasto económico en energía de manera que se pueda adquirir uno de un consumo energético ahorrador, y tercero el filtro deberá mostrar instrucciones específicas de seguridad y mantenimiento para poder incrementar la eficiencia y durabilidad del equipo. Lo mejor es utilizar los filtros en las aulas y oficinas donde transcurren mayormente las personas en la universidad y ubicarlos en lugares donde se identifiquen fuentes de contaminación cercanas como por ejemplo circulación de vehículos, restaurantes y vegetación. Teniendo en cuenta la anterior y con ayuda de un experto en el área, se recomienda el filtro AstroCel I High Efficiency Particulate Air (HEPA), el cual tiene una eficiencia mínima del 99,97 % y por esto es el mejor filtro disponible en el mercado. La ficha técnica del equipo se puede encontrar en el Anexo 11. y en la Fig. 22. Una foto del filtro.

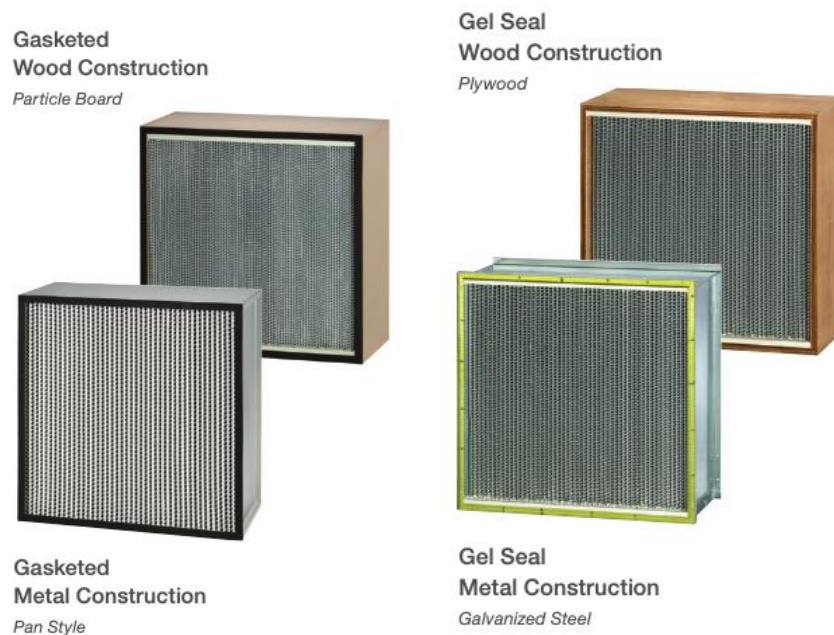


Fig. 212. Foto del filtro seleccionado como alternativa de mejora [35]

En cuanto a la segunda alternativa se propone la utilización de un precipitador electrostático (PES), dispositivos usados en el proceso de purificar el medio ambiente. Este proceso se realiza por medio de alta tensión de voltaje en placas de metales para generar campos eléctricos que atrapan las partículas de contaminantes. De esta manera se purifica el aire del ambiente.

El principio de ionización es la base del funcionamiento de un PES, es decir, las partículas que pasan a través de las placas se ven afectadas por un campo eléctrico, lo que hace que estas se carguen eléctricamente. Los gases pasan por el interior de una cámara, lugar donde se crea el campo electrostático formado por electrodos de descarga (negativo) y electrodos colectores (positivo); ambos electrodos son de placas de cobre. Cuando pasa el gas por las placas, este se carga negativamente debido al principio de ionización, y es atraído a los electrodos colectores debido a su diferente carga eléctrica (Ver Fig. 23).

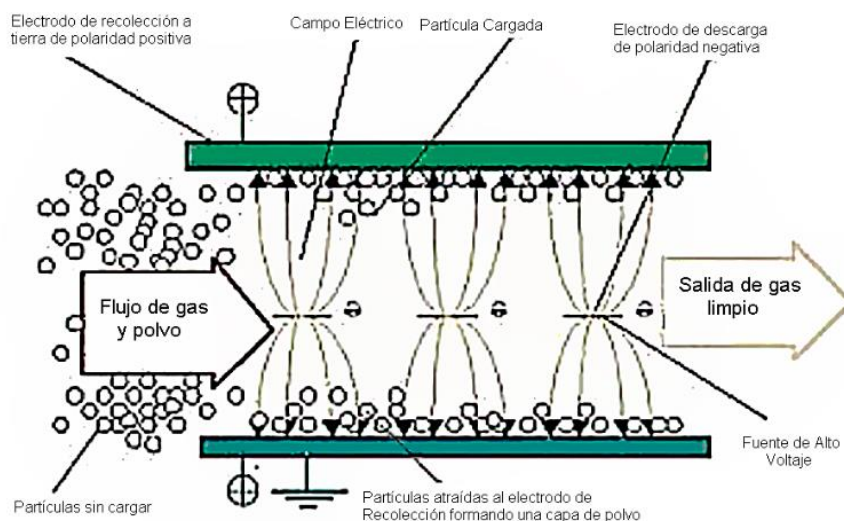


Fig. 223. Principio del precipitador electrostático [36]

Debido a diferentes causas como la situación actual de pandemia, el acceso limitado a la universidad durante el año inmediatamente anterior, la falta de recursos como equipos de medición, información histórica y actual de la universidad con respecto a las condiciones de las aulas de clase y datos relevantes sobre los aires acondicionados, no es posible proporcionar una alternativa de solución adecuada al problema de confort térmico, sin embargo se espera que el trabajo actual sirva como base a futuros trabajos al tener una metodología estandarizada, con el fin de medir las condiciones de las aulas y así proponer una mejora para las mismas.

B. Validación del diseño propuesto

Se tenía planeado realizar la validación de los dispositivos comparando los datos obtenidos de instrumentos de medición ya calibrados, pero debido a la situación endémica que se vive a nivel mundial, no fue posible solicitar a instituciones educativas y gubernamentales los dispositivos profesionales necesarios para efectuar la calibración del dispositivo elaborado. Sin embargo, los componentes del dispositivo construido disponen de una ficha técnica estándar de fabricación, la cual es de fácil acceso debido ya que los componentes son hardware libre.

La validación de la propuesta de metodología para la medición de la calidad del aire y confort térmico se realizó mediante la ejecución de cuatro pasos fundamentales: primero se contactaron profesionales con experiencia en proyectos o servicios en el área de calidad de aire y confort térmico; los datos de estos se registran en la Tabla XIII con la finalidad de que evaluar la metodología propuesta; segundo, se realizó un Manual (anexo 10) de operaciones en el cual se resume la información técnica de la metodología para su posterior envío a los profesionales que aceptarán ser partícipes de la evaluación; tercero, se envía un formato estableciendo tres (3) criterios de evaluación como se muestra en la Tabla XIV los cuales son: pertinencia, coherencia y trazabilidad de la información; por último, una vez recolectado la información de los profesionales, se consolidarán las sugerencias y recomendaciones con el objetivo de adecuar la metodología propuesta.

A través de la validación de la metodología propuesta se busca que ésta pueda ser aplicada con seguridad al ser revisada por expertos en el área. Se incluirán los anexos del formato de evaluación de cada experto los cuales se pueden verificar en el Anexo 12, Anexo 13 y Anexo 14 respectivamente según los datos de profesionales registrados en la Tabla XIII.

TABLA XIII.
PROFESIONALES QUE PARTICIPARON EN LA EVALUACIÓN DE LA METODOLOGÍA

Evaluador	Empresa	Cargo
William Andrés Padilla Restrepo	Mutilareis Colombia SAS	Gerente
Silver Andrés Uribe Marín	Pontificia Universidad Javeriana Cali	Analista de Infraestructura

Evaluador	Empresa	Cargo
Camilo Botero Gonima	Camilo Botero G. Ingeniero Consultor	Especialista en ingeniería térmica

*TABLA XIV.
EVALUACION DE LOS PROFESIONALES*

Evaluador	Pertinencia (SI/NO)	Coherencia (SI/NO)	Trazabilidad de la información (SI/NO)	Observaciones
William Andrés Padilla Restrepo	SI	SI	SI	Se observa un correcto diseño de metodología para medición en la calidad del aire. Se ajusta a la normatividad.
Silver Andrés Uribe Marín	SI	SI	SI	Deben tener en cuenta dentro de los formatos de recolección de datos, que no solamente se considera la variable a medir, además debe tener fecha y hora para hacer un perfil de comportamiento del ambiente interior del espacio.
Camilo Botero Gonima	SI	SI	SI	Se debe tener en cuenta que la forma calificación de las variables medidas es si cumple o no cumple con la norma establecida, no es de relevancia calificarlo como bueno, regular y malo. En la situación actual de emergencia sanitaria COVID19 en la que se encuentra el mundo, es de gran importancia el estudio y recolección datos sobre todo en la calidad del aire interior (CAI), ya que dicha emergencia presenta un riesgo de capacidad total y muerte.

El análisis de las respuestas de los expertos se efectuará de forma cualitativa identificando su pertinencia en cada uno de los aspectos a evaluar de la metodología propuesta para la medición de la calidad del aire y confort térmico los criterios se listan a continuación:

- **Pertinencia:** Este criterio evaluará si se considera que la metodología diseñada es pertinente para los objetivos planteados del presente proyecto y para la universidad.
- **Coherencia:** Este criterio está relacionado con la correcta concepción de la metodología propuesta para la medición de calidad del aire y confort térmico, lo cual permitirá al evaluador identificar las diferentes ideas que se presentan y aportar con base en su experiencia y conocimiento información relevante que permitan efectuar cambios o mejoras a la metodología propuesta con el fin de obtener un resultado de mayor seguridad y facilidad de aplicación. Además, se podrá identificar si la metodología se encuentra alineada con las normas de calidad del aire y confort térmico.
- **Trazabilidad de la información:** Este criterio tiene como objetivo identificar si la forma de registro de los datos de medición permite crear un histórico de datos que sea fácilmente trazable y genere la información pertinente y suficiente para el análisis de la información.
- **Recomendaciones:** Aquí los expertos consolidarán sus opiniones, sugerencias y recomendaciones relevantes acerca de la metodología evaluada de forma detallada con el fin de retroalimentar al equipo de trabajo del proyecto y así poder ejecutar cambios específicos en la metodología propuesta

En cuanto a la alternativa planteada que se puede implementar a corto plazo para mejorar la calidad del aire como parte de la metodología de medición para las aulas de clase del edificio El Lago (Filtro de aire de alta eficiencia), se opta por simular con el programa IAQx, diseñado por la agencia de protección ambiental de los Estados Unidos (EPA), el ambiente en un salón del edificio El Lago, teniendo en cuenta el volumen del mismo, el no funcionamiento del aire acondicionado, las condiciones promedio en las que se encontraban los salones al momento de realizar la medición en el edificio, tomando como referente la

variable de material particulado menor a 2,5 micras (PM 2,5) y un porcentaje de eficiencia real de 99% del filtro HEPA. Los resultados de la simulación después de 48 horas de la implementación del filtro se pueden ver en la Fig. 24.



Fig. 234. Resultado de la simulación programa IAQx diseñado por la EPA

Como se puede apreciar la concentración de material particulado se redujo desde 28,77 µg/m³ hasta aproximadamente 11 µg/m³ después de instalar el filtro en las primeras horas, es decir un 38,77% de reducción y se espera que al estar en funcionamiento el aire acondicionado, las condiciones sean aún mejor en el interior de las aulas incluso cuando haya la cantidad máxima de ocupantes recomendada dentro de las mismas.

VI. CONTROLAR

A. Medición de los impactos

Para establecer el impacto financiero del proyecto se muestra el costo de inversión para la elaboración de los dispositivos de medición utilizados a través de la Fig. 25.

Dispositivos elaborados		4
Componentes	Cantidad (UNI)	Costo (COP)
Tarjeta ARDUINO UNO	4	\$ 40.000,00
Sensor MQ135	4	\$ 8.000,00
Sensor MQ4	4	\$ 12.000,00
Sensor DTH11	4	\$ 4.000,00
Tarjeta SD	4	\$ 9.000,00
MicroSD	4	\$ 13.000,00
Cables arduino	43	\$ 300,00
Baquela universal	4	\$ 2.000,00
TOTAL COSTO		\$ 364.900,00

Fig. 245. Costos incurridos en la elaboración del dispositivo de medición.

Como se evidencia en la Fig. 25, el costo total de inversión de los cuatro dispositivos de medición elaborados tuvo un valor aproximado de \$364 900, además el costo que podría tener la implementación de un filtro HEPA en las 45 aulas del clase es de \$1 080 000, ya que cada filtro puede costar entre \$10 324 y \$34 430, según proveedores del mercado. Por otro lado, a continuación, se muestra la Fig. 26 los costos de algunos dispositivos disponibles en el mercado para realizar la medición de las variables objeto de estudio.

DISPOSITIVO	Variables	FABRICANTE	Costo Unidad (COP)
PCE-CMM 5	CO2, humedad, temperatura	PCE Instruments	\$ 874.000,00
PCE-AQD 20	PM2.5, humedad, temperatura, CO2	PCE Instruments	\$ 4.794.300,00
CO2 HQ 210	CO2, CO, temperatura	PCE Instruments	\$ 2.145.808,00
PCE-RCM 8	TVOC	PCE Instruments	\$ 1.014.300,00
PCE-MPC 30	PM2.5, PM10	PCE Instruments	\$ 5.179.300,00

Fig. 256. Costos de algunos dispositivos disponibles en el mercado.

En la Fig. 26, se evidencia un ahorro significativo, esto se debe a que, gracias a la propuesta implementada de elaborar el dispositivo de medición en vez de comprarlo, la relación costo beneficio de implementar un dispositivo de medición propio aumenta debido a que con la inversión de comprar un solo dispositivo puedo elaborar varios de ellos. Además, para ejecutar las mediciones de las variables estudio se tendría que recurrir a más de un dispositivo, lo cual aumentaría el costo.

Impacto Ambiental

Con la implementación de la metodología de medición, se espera poder registrar la información pertinente a la calidad del aire y confort térmico de una manera adecuada y trazable, con el fin de identificar las posibles fuentes contaminantes que pueden afectar el ambiente interior de las aulas de clase y por ende la salud y bienestar de las personas que asisten a las aulas, al igual que posibles alternativas de mejora de tal forma que se afecte positivamente a la sociedad y el ambiente.

Impacto social:

Se espera que con el proyecto se espera definir una metodología de medición estandarizada con la que sea posible monitorear la calidad del aire y confort térmico de las aulas, para tomar decisiones informadas acerca de las medidas que permitan mejorar las condiciones ambientales al interior de estas. Con la situación global que se está atravesando se denota la importancia de un ambiente interior libre de contaminantes que puedan influir negativamente en la salud de los ocupantes.

B. Estandarización de la solución – POE'S (plan de control)

Para el cumplimiento del objetivo general del proyecto se realizó una metodología de evaluación consolidada en el manual (Ver anexo 10), el cual se utilizará para estandarizar el proceso de medición de la calidad del aire y el confort térmico en las aulas de clase del edificio El Lago. De esta manera se espera realizar seguimiento para verificar el buen funcionamiento del sistema de refrigeración, además de los niveles de contaminantes en las aulas, ya que cuenta con el paso a paso de proceso que se debe realizar y diferentes plantillas donde se registrará cada dato y observación encontrada.

C. Conclusiones

- Se puede concluir que en la universidad existe un problema con las variables de temperatura y humedad con respecto al confort térmico y la variable de material particulado con respecto a la calidad del aire según las encuestas realizadas por estudiantes y docentes y las mediciones tomadas en las aulas de clase del edificio el lago.
- Con ayuda de expertos fue posible validar la metodología medición que se plantea para la universidad, con el fin de hacer un seguimiento de forma continua a cualquier espacio y de este modo contribuir a la toma de decisiones que puedan asegurar un ambiente óptimo de trabajo para los estudiantes y sus colaboradores que desarrollen su actividad en aulas de clase. Cabe destacar que la metodología planeada no se pudo implementar debido a la situación de pandemia puesto que el acceso a la universidad solo se permitió en una ocasión.
- Los resultados mostrados en el presente documento pueden variar debido a la forma en que fueron tomados a causa de la situación de contingencia global que se vive actualmente, sin embargo, se estima que esté dentro de los límites cuando las aulas operen con normalidad nuevamente.

- El dispositivo de medición elaborado es factible técnica, ambiental y financieramente, y al implementarlo se pudo verificar las condiciones manifestadas por la comunidad en la encuesta realizada. Lo cual contribuyó a plantear una alternativa de mejora que respondiera a la calidad del aire (anexo 11).

D. Recomendaciones

Se plantean recomendaciones a la universidad con el fin de obtener espacios más adecuados para el trabajo de sus colaboradores y estudiantes que son el público objetivo de esta; la universidad debe vigilar que las propuestas sean implementadas y se realicen correctamente asegurando un mejoramiento continuo que puede ser ejecutado por estudiantes de la universidad siguiendo las recomendaciones listadas a continuación:

- Tener en cuenta las políticas institucionales orientadas en la importancia de conservar un ambiente interior en las aulas de clase adecuado y tomar medidas en caso de que las condiciones no se cumplan.
- Realizar mediciones como pruebas piloto en los salones que presenten más afectaciones y encuestas a estudiantes y profesores, con el fin de intervenir con la metodología presentada en este documento y extenderlo al resto de la universidad para garantizar que se tengan las condiciones adecuadas en el campus.
- Investigar alternativas de mejora adicionales a las cuatro exploradas, realizando un trabajo más extensivo y ejecutarlas para evaluar la metodología en un contexto real y de este modo contribuir a la mejora continua de la calidad del aire y confort térmico en las diferentes aulas de la Pontificia Universidad Javeriana Cali.

VII. GLOSARIO

PM2.5: Material particulado con diámetro aerodinámico inferior a 2,5 micras [32]

PM10: Material particulado con diámetro aerodinámico inferior a 10 micras [32]

Calidad del aire: Aire en el cual no hay contaminantes perjudiciales en concentraciones perjudiciales [14]

Confort térmico: Condición de la mente que expresa satisfacción con el ambiente térmico y es juzgada bajo condiciones [13]

Ozono: Es un componente natural de la atmósfera cuya concentración aumenta con la altitud hasta encontrar un máximo en la capa de ozono. [33]

PPM: Partes por millón o ppm según sus siglas, es la proporción de la concentración de una sustancia con respecto a la concentración de otra [34]

COVs: Los compuestos orgánicos volátiles son un grupo de compuestos pertenecientes a diferentes familias químicas (alcoholes, aldehídos, cetonas, éteres de glicol, terpenos, etc.) que tienen en común su base química de carbono y la particularidad de volatilizarse en el aire en estado gaseoso a temperatura ambiente, de forma más o menos rápida. [10]

Formaldehído: formaldehído es una sustancia química producida a gran escala en el mundo y es utilizada por distintas industrias como conservador y desinfectante, ha sido clasificada como cancerígeno por expertos de la Organización Mundial de la Salud (OMS). Se le conoce también como metanol, óxido de metileno, metaldehído, y oxometano. [10]

Radón: Se considera la fuente más frecuente de radiación natural. Es un gas noble radiactivo, sin olor ni sabor, que se genera naturalmente en la desintegración del uranio, que se encuentra en pequeñas cantidades en la mayoría de las rocas y en el suelo. [10]

Arduino: Es un dispositivo de hardware libre que monta un microcontrolador en una placa de circuito impreso con los elementos necesarios para su funcionamiento y que dispone de un entorno de programación libre junto con un lenguaje de programación propio [27]

VIII. REFERENCIAS

- [1] Organización Mundial de la Salud, 2014. [Online]. Available: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health). [Accessed febrero 2020].
- [2] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2019. [Online]. Available: <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/calidad-del-aire>. [Accessed febrero 2020].
- [3] Grupo de gestión de la Calidad del Aire, 2019. [Online]. Available: <https://www.cali.gov.co/documentos/2936/boletines-diarios-de-la-calidad-del-aire-de-diciembre-de-2019/>. [Accessed febrero 2020].
- [4] L. O. H. A. Castillo Benalcázar, 2014. [Online]. Available: <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/10759/1/0522089.pdf>. [Accessed febrero 2020].
- [5] Pontificia Universidad Javeriana Cali, 2018. [Online]. Available: https://www.javerianacali.edu.co/sites/ujc/files/node/field-documents/field_document_file/en_cifras_2019_v3_individual_reducido.pdf. [Accessed febrero 2020].
- [6] ICONTEC, "NTC-ISO 9000 Sistemas de Gestión de la Calidad - fundamentos y vocabulario," Icontec, No. 571, 2015, pp. 1-23.
- [7] Google Maps, Agosto 2019. [En línea].
- [8] L. Asere, T. M. y A. B. , «ResearchGate,» 2016. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/305749605_Assessment_of_Indoor_Air_Quality_in_Renovated_Buildings_of_Liepaja_Municipality. [Último acceso: Abril 2020].
- [9] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2020. [Online]. Available: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Caracter%C3%ADsticas+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Tur%C3%ADsticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc>. [Último acceso: Octubre 2020].
- [10] I. M. Morales, V. B. Acevedo y A. G. Nieto, «Comunidad de madrid,» CONSEJERIA DE SANIDAD DE LA COMUNIDAD DE MADRID, Julio 2018. [En línea]. Available: <http://www.madrid.org/bvirtual/BVCM020191.pdf>. [Último acceso: Junio 2020].
- [11] [ASHRAE, "ASHRAE 55 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy," Ashrae, Ed., 2017, p. 3.
- [12] Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, 2015. [En línea]. Available: http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Articulos_Ciat/biblioteca/ESTUDIO_PARA_LA_MICROZONIFICACION_CLIMATICA_PARA_EL_MUNICIPIO_DE_SANTIAGO_DE_CALI.pdf. [Último acceso: Junio 2020].
- [13] Ideam, [En línea]. Available: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Caracter%C3%ADsticas+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Tur%C3%ADsticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc>. [Último acceso: Junio 2020].
- [14] ICONTEC, "NTC 5183 Ventilación para una calidad aceptable del aire en espacios interiores," Icontec, Ed., 2003, p. 5
- [15] R. K. M. C. I. L. M. Z. M. J.-S. V. Tasić, Septiembre 2019. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/335652143_CHARACTERIZATION_OF_SUSPENDED_PARTICLES_IN_THE_UNIVERSITY_CLASSROOMS_AND_OFFICES_IN_BOR_SERBIA. [Último acceso: Abril 2020]
- [16] A. M. M. Z. D. K. W. M. Barbara Kozielska, Febrero 2020. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/340944966_Indoor_air_quality_in_residential_buildings_in_Upper_Silesia_Poland. [Último acceso: Abril 2020].
- [17] Lan, L., et al., "Effects of thermal discomfort in an office on perceived air quality, SBS symptoms, physiological responses, and human performance". *Indoor Air*, 2011. 21(5): p. 376-390.

[18] Wargocki, P. and D.P. Wyon, "The effect of moderately raised classroom temperatures and classroom ventilation rate on the performance of schoolwork by children". HVAC&R Research, 2007. 13(2): p. 193-220.

[19] Lan, L., P. Wargocki, and Z. Lian, "Quantitative measurement of productivity loss due to thermal discomfort". Energy and Buildings, 2011b. 43(5): p. 1057-1062.

[20] Sun Y., Hou J., Cheng R., Sheng Y., Zhang X., Sundell J., Indoor air quality, ventilation and their associations with sick building syndrome in Chinese homes, Energy and Buildings, Volume 197, 2019.

[21] S&P, Mejorar la calidad del aire interior con filtros de alta eficiencia HEPA. 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/filtros-hepa/>.

[22] Purdon, Sean and Kusy, Branislav & Jurdak, Raja & Challen, Geoffrey. 2013. Model-free HVAC control using occupant feedback. 84-92. [En línea] Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/271454239_Model-free_HVAC_control_using_occupant_feedback

[23] Interempresas, 2019. La importancia del mantenimiento del aire acondicionado. [En línea]. Disponible en: <https://www.interempresas.net/Instaladores/Articulos/204950-La-importancia-del-mantenimiento-del-aire-acondicionado.html>

[24] Instituto Valenciano de la Edificación. Como influye la Calidad del aire exterior en el interior. [En línea]. Disponible en: <http://aire.five.es/155>

[25] Figueroa A. 2020, Plantilla Análisis Jerárquico Total (AHP). Santiago de Cali, Colombia

[26] Figueroa A. 2020, Plantilla Matriz de preferencias para Selección de alternativas. Santiago de Cali, Colombia

[27] Moreno, A. and Córcoles S., "¿Qué es arduino?". Arduino curso práctico. Ediciones de la U, 2018. P. 28-30.

[28] MQ135 sensor Calidad de Aire Gases Toxicos - MakerElectronico. (2020). Retrieved 10 November 2020, from <https://www.makerelectronico.com/producto/mq135-sensor-calidad-aire-gases-toxicos/>

[29] MÓDULO SENSOR MQ4 GAS METANO Y NATURAL MQ-4. (2020). Retrieved 10 November 2020, from <https://ssdielect.com/es/gas-1/338-modulo-mq-4.html>

[30] Sensor de temperatura y humedad relativa DHT11. (2015). Naylamp Mechatronics - Perú. https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/57-sensor-de-temperatura-y-humedad-relativa-dht11.html?search_query=Sensor+DHT11+&results=159

[31] Módulo lector de memoria Micro SD Card. (2018). Naylamp Mechatronics - Perú. https://naylampmechatronics.com/modulos/104-modulo-lector-de-memoria-micro-sd-card.html?search_query=sd&results=53

[32] [Online]. Available: <http://www.murciasalud.es/pagina.php?id=244308&idsec=1573>. [Accessed febrero 2020].

[33] Dirección de monitoreo atmosférico, [Online]. Available: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/noticias/que-es-ozono/que-es-ozono.pdf>. [Accessed febrero 2020].

[34] Green Facts, [En línea]. Available: <https://www.greenfacts.org/es/glosario/pqrs/partes-million.htm>. [Último acceso: 28 Mayo 2020].

[35] Astrocel Filtro de Alta Eficiencia [En línea] Available: <https://www.aafintl.com/es-es/commercial/browse-products/commercial/hepa-ulpa-filters/astrocel-i>

[36] Rodríguez, J., Alarcón Pinto, U., García Bedoya, O. and Benavides, G., 2017. Diseño Y Prototipo De Un Precipitador Electrostático. [online] Revistas.utadeo.edu.co. Available at: <https://revistas.utadeo.edu.co/index.php/mutis/article/view/1237/1242> [Accessed 9 December 2020].

IX. ANEXOS

A continuación, se presentan los anexos del documento. Los archivos se encuentran adjuntos y en la Tabla XI está la información sobre la enumeración, nombre, desarrollo y tipo de archivo de cada uno de estos.

*TABLA XV.
TABLA DE ANEXOS*

No. Anexo	Nombre	Desarrollo (propio o terceros)	Tipo de Archivo (PDF, HTLM, Excel, Word...)
1	Anexo 1. Encuesta para requerimientos	Propio	Word
2	Anexo 2. Imagen de sensores Arduino	Propio	JPG
3	Anexo 3. Pruebas de funcionamiento de los sensores	Propio	Excel
4	Anexo 4. Plan para recolección de datos en la universidad	Propio	Excel
5	Anexo 5. Planos del edificio El Lago	Terceros	AutoCAD y PDF
6	Anexo 6. Resumen de revisión de literatura	Propio	Word
7	Anexo 7. Análisis jerárquico (AHP)	Propio	Excel
8	Anexo 8. Matriz de preferencias de Selección de alternativas	Propio	Excel
9	Anexo 9. Project	Propio	Project
10	Anexo 10. Manual de medición	Propio	Excel
11	Anexo 11. Ficha técnica de la alternativa de mejora	Terceros	PDF