



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO SINÉRGICO MULTI-BANDA UV PARA LA MEJORA DE LA
CALIDAD DEL AIRE INTERIOR EN ENTORNOS HOSPITALARIOS**

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO

INGENIERÍA BIOMÉDICA

PRESENTADO POR:

22111190 JORGE ERNESTO MALDONADO MARADIAGA

22111200 NOEL EDUARDO SÁNCHEZ MEJÍA

ASESOR: MANUEL GAMERO

SAN PEDRO SULA, CORTÉS, HONDURAS, C.A.

JUNIO, 2025

DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo a Dios, por regalarnos la bendición de vivir.

A nuestras familias y seres queridos, por apoyarnos incondicionalmente a través de toda
nuestra trayectoria universitaria.

A nosotros mismos, por no rendirnos y siempre levantar la cabeza ante las distintas
adversidades que se han dado a lo largo de toda la carrera universitaria.

Y finalmente, a todo estudiante de ingeniería biomédica o aquel interesado en, que está
a punto de sumergirse en un vasto y hermoso mundo de posibilidades que unen la ciencia de la
salud con la ingeniería.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer enormemente a mis padres, Jorge Maldonado y Sofia Maradiaga, por haberme dado todo, por haberse esforzado día tras día para que yo pueda seguir con mis estudios y por haberme brindado las enseñanzas y los valores que me convirtieron en la persona que soy ahora. Quiero agradecer a mi hermano Kevin Maldonado, por apoyarme y haberme brindado ese amor que solo un hermano es capaz de ofrecer.

A mi compañero de proyecto, Noel Sánchez, por siempre contagiarme de su optimismo, por no permitir que agachara la cabeza ante las distintas adversidades que se presentaron, y por siempre dar un paso hacia adelante.

Quiero agradecer profundamente al Ing. Manuel Gamero, al cual considero como mi mentor, por haberme brindado de su conocimiento y sabiduría para desenvolverme de manera exitosa a nivel individual y profesional. A la Dra. Sarahí Reyes, por apoyarnos con el acceso hacia la institución de salud en el cual se llevaron a cabo las pruebas del proyecto.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que me acompañaron a través de esta travesía, quienes me hicieron reír, me vieron llorar, me escucharon, me aconsejaron, confiaron en mí, y me permitieron, de igual manera, formar parte de la vida de ellos. Por lo tanto, agradezco a Alejandro Adain Navarro, Christian Zuniga, Lester Castellanos, Andrea Ponce, Aarón Chiessa, Dany Nieto, Nelson Aguilar y María José Gálvez.

- Jorge Maldonado.

Agradezco a mis padres, Hector Sánchez y Rosa Mejía por brindarme su compañía y apoyo incondicional en cada faceta de mi vida. Agradezco a mi hermano, Hector David Sánchez y a Glendy Alvarenga. Por último, a mi amigo y compañero, Mincho.

He de agradecerle especialmente al ingeniero Manuel Gamero, quien ha sido el mejor docente, jefe, asesor, amigo y mentor que este estudiante de ingeniería en biomédica pudo tener. Le agradezco por depositar su confianza en mis habilidades y por compartir sus conocimientos conmigo.

- Noel Sánchez.

ΕΠΙΓΡΑΦΕ

Audentes fortuna iuvat
- Virgilio, Eneida

RESUMEN EJECUTIVO

Las personas pasan aproximadamente más del 90% de su tiempo en interiores. Lo que los expone a contaminantes gaseosos y químicos habitados en el aire que pueden afectar a la salud y bienestar de estos. Este indicador se conoce como calidad del aire interior y ha surgido como una problemática a la gran cantidad de casos reportados en los últimos años. Esta problemática se agrava al trasladarse a entornos hospitalarios, donde los microorganismos transportados por el aire pueden causar infecciones en individuos con sistemas inmunológicos comprometidos, en estudios recientes se ha encontrado que hasta un 63% del personal de salud presenta al menos un problema de salud asociado a la mala calidad del aire interior. En consecuencia, a esto, en el presente estudio se evaluó las distintas tecnologías existentes para mejorar la calidad del aire interior y con base de la información recolectada se desarrolló un prototipo funcional que aprovecha la eficacia germicida de la luz UV-C y el efecto fotocatalítico generado mediante la exposición del dióxido de titanio a la luz UV-A. Se realizaron diferentes pruebas bajo tres escenarios experimentales distintos, obteniendo una reducción del 86.19%, 81.68% y 69.87% de reducción en compuestos orgánicos volátiles, y del 100% en la eliminación de bacterias aerobias y levaduras cuando se aplicó el prototipo a través de los distintos entornos hospitalarios evaluados. Los datos obtenidos fueron sometidos a rigurosas pruebas estadísticas, demostrando que existió diferencias significativas ($p < 0.001$) entre cada uno de los escenarios experimentales.

Palabras clave – Calidad del aire interior, desinfección del aire, radiación UV-C, fotocatalisis, hospitales.

ABSTRACT

People spend over 90% of their time indoors, which exposes them to gaseous and chemical pollutants lingering in the air that can negatively affect their health and well-being. This metric is referred to as indoor air quality (IAQ), and it has become a growing concern due to the increasing number of reported cases in recent years. The issue is exacerbated in hospital environments, where airborne microorganisms can infect individuals with weakened immune systems. Recent studies have found that up to 63% of healthcare workers experience at least one health issue associated with poor IAQ. In response to this, various existing technologies for improving IAQ were evaluated. Based on the collected data, a functional prototype was developed that combines the germicidal effect of UV-C light with the photocatalytic activity generated by titanium dioxide (TiO₂) under UV-A radiation. The prototype was tested under three distinct experimental conditions, resulting in reductions of 86.19%, 81.68%, and 69.87% in volatile organic compounds (VOCs), and a 100% elimination of aerobic bacteria and yeasts in the evaluated hospital environments. The data were subjected to rigorous statistical analysis, confirming statistically significant differences ($p < 0.001$) between each experimental scenario.

Keywords – Indoor air quality, air disinfection, UV-C radiation, photocatalysis, hospitals.

TABLA DE CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN	3
II. ESTADO DEL ARTE	4
2.1. ANTECEDENTES	4
2.1.1. CALIDAD DEL AIRE INTERIOR.....	7
2.1.2. LUZ ULTRAVIOLETA.....	8
2.1.3. IRRADIACIÓN GERMICIDA ULTRAVIOLETA	9
2.1.4. FOTOCATÁLISIS	11
2.1.5. APLICACIONES MULTIBANDA SINÉRGICAS.....	16
2.2. PROBLEMÁTICA	18
2.3. IMAGEN INTEGRADORA	19
2.4. TABLA DE LIMITANTES	20
III. OBJETIVOS	22
3.1. OBJETIVO GENERAL	22
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
IV. MÉTODOS	23
4.1. ENFOQUE	24
4.2. VARIABLES DE INVESTIGACIÓN	24
4.2.1. VARIABLES INDEPENDIENTES.....	25
4.2.2. VARIABLES DEPENDIENTES	25
4.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS APLICADOS	26
4.3.1. TÉCNICAS.....	26
4.3.1.1. Simulación de flujo de aire mediante Ansys Fluent.....	26
4.3.1.2. Monitoreo de la calidad del aire.	26
4.3.1.3. Recuento de bacterias aerobias mesófilas.....	26
4.3.2. INSTRUMENTOS.....	27
4.3.2.1. Software Ansys Fluent.....	27
4.3.2.2. Software SolidWorks.....	27
4.3.2.3. Software Datatab.....	27
4.3.2.4. Software AutoCAD.	27

4.3.2.5.	Placa de Petri.....	28
4.3.2.6.	Monitor de calidad de aire.....	28
4.3.2.7.	Balómetro.....	29
4.4.	MATERIALES.....	29
4.4.1.	LÁMPARA GERMICIDA UV-C.....	29
4.4.2.	LÁMPARA UV-A DE 365 NM.....	30
4.4.3.	DIÓXIDO DE TITANIO (TiO ₂).....	31
4.4.4.	CARCASA DEL PROTOTIPO.....	31
4.4.5.	VENTILADORES.....	32
4.4.6.	CONTENEDOR DE BATERÍAS.....	32
4.4.7.	PAPEL ALUMINIO.....	33
4.4.8.	LAMINA ACRÍLICA PLASKOLITE.....	33
4.5.	MÉTRICAS DE EVALUACIÓN.....	34
4.5.1.	DESARROLLO Y ANÁLISIS DEL PROTOTIPO.....	34
4.5.2.	LEVANTAMIENTO DE LA SALA.....	34
4.5.3.	CÁLCULO DE VELOCIDAD DEL AIRE.....	35
4.5.4.	SIMULACIÓN EN ANSYS FLUENT.....	35
4.5.5.	REALIZACIÓN DEL RECUBRIMIENTO POR INMERSIÓN.....	35
4.5.5.	MEDICIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AIRE.....	36
4.5.6.	TOMA DE MUESTRAS BACTERIOLÓGICAS.....	37
4.6.	METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN.....	37
4.6.1.	VALIDACIÓN MATEMÁTICA.....	37
4.6.2.	VALIDACIÓN EXPERIMENTAL.....	38
4.6.3.	VALIDACIÓN ESTADÍSTICA.....	38
4.6.3.1.	Estadística descriptiva.....	38
4.6.3.2.	Estadística inferencial.....	38
4.7.	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	39
4.8.	OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES.....	40
4.9.	MATRIZ METODOLÓGICA.....	42
V.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	43
5.1.	EVALUACIÓN DEL ENTORNO HOSPITALARIO.....	43

5.1.1.	LEVANTAMIENTO Y ESTUDIO DE LAS ÁREAS ASIGNADAS.....	43
5.1.1.1.	Área principal.....	44
5.1.1.2.	Cubículo #7.....	50
5.1.1.3.	Cubículo #8.....	51
5.1.2.	ANÁLISIS CFD.....	52
5.2.	VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO	56
5.2.1.	DISEÑO DEL PROTOTIPO.....	56
5.2.1.1.	Modelado y diseño físico.....	56
5.2.2.	ANÁLISIS DE FUNCIONALIDAD.....	60
5.2.2.1.	Análisis de control.....	60
5.2.2.2.	Análisis de flujo.....	61
5.2.2.3.	Análisis eléctrico.....	63
5.2.3.	VALIDACIÓN MATEMÁTICA.....	64
5.2.2.1.	Validación del efecto germicida.....	64
5.2.2.1.	Validación de la activación del TiO ₂	67
5.3.	RENDIMIENTO DEL PROTOTIPO	68
5.3.1.	MONITOREO DE PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AIRE.....	68
5.3.1.1.	Análisis por sala.....	68
5.3.1.2.	Análisis comparativo.....	73
5.3.2.	RESULTADOS DE TOMAS DE MUESTRAS.....	76
5.3.2.1.	Análisis por sala.....	76
5.3.2.2.	Análisis comparativo.....	78
5.4.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO INFERENCIAL	79
5.4.1.	ANÁLISIS EN PRUEBAS DE TCOV.....	80
5.4.2.	ANÁLISIS EN PRUEBAS DE HCHO.....	87
5.4.3.	ANÁLISIS DE PRUEBAS DE CO ₂	93
VI.	DISCUSIÓN	99
VII.	CONCLUSIONES	100
VIII.	RECOMENDACIONES.....	101
IX.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	102

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 - Distribución de artículos revisados por año.	4
Ilustración 2 - Distribución de artículos revisados a nivel global.....	5
Ilustración 3 - Áreas de estudio de las revistas involucradas.	6
Ilustración 4 - Palabras Claves.....	6
Ilustración 5 - Irradiación UVGI en ductos.	9
Ilustración 6 - Proceso de Fotocatálisis.	12
Ilustración 7 - Línea de tiempo.....	18
Ilustración 8 - Imagen Integradora.	20
Ilustración 9 – Metodología.	23
Ilustración 10 - Variables de investigación.....	25
Ilustración 11 - Placa de Petri.....	28
Ilustración 12 - Monitor de Calidad del Aire.....	28
Ilustración 13 - Balómetro.	29
Ilustración 14 - Lámpara UV-C.....	30
Ilustración 15 - Lámpara UV-A.....	30
Ilustración 16 - Empaque de dióxido de titanio.	31
Ilustración 17 – Carcasa.	31
Ilustración 18 – Ventiladores.	32
Ilustración 19 - Contenedor de baterías.....	32
Ilustración 20 - Piezas recubiertas con papel aluminio.	33
Ilustración 21 – Lamina plástica plaskolite.	33
Ilustración 22 - Desarrollo del prototipo.....	34
Ilustración 23 - Medición con balómetro.....	35
Ilustración 24 - Sustrato con el recubrimiento.	36
Ilustración 25 - Medición de parámetros de calidad del aire.....	36
Ilustración 26 - Toma de muestras bacteriológicas.....	37
Ilustración 27 - Cronograma de Actividades.....	39
Ilustración 28 - Sala principal UCIP: Rejillas de ventilación.....	44
Ilustración 29 - Sala principal UCIP: Mobiliario.....	45
Ilustración 30 - Cubículo de UCIP.....	50
Ilustración 31 – Modelado de sala y cubículo.....	53
Ilustración 32 - flujo de aire en la sala.	55
Ilustración 33 - flujo de aire en cubículo.	56
Ilustración 34 - Modelado del prototipo.....	57
Ilustración 35 - Prototipo.....	58
Ilustración 36 - Diagrama de bloques del prototipo.	60
Ilustración 37 - Simulación de flujo en el prototipo.	61
Ilustración 38 - Simulación CFD en el prototipo.	62

Ilustración 39 - Diagrama eléctrico de las lámparas.....	63
Ilustración 40 - Diagrama eléctrico de los ventiladores.....	63
Ilustración 41 – Diagrama de caja (Presencia de TCOV en UCIP).....	69
Ilustración 42 – Diagrama de caja (Presencia de TCOV en el cubículo 7).....	70
Ilustración 43 – Diagrama de caja (Presencia de TCOV en el cubículo 8).....	72
Ilustración 44 - Reducción relativa de TCOV.....	74
Ilustración 45 - Reducción relativa de HCHO.....	75
Ilustración 46 - Reducción relativa de CO ₂	76
Ilustración 47 - Reducción relativa de bacterias aerobias.....	78
Ilustración 48 - Reducción relativa de levaduras.....	79
Ilustración 49 - Diagrama cuantil-cuantil UCIP sin intervención (TCOV).....	82
Ilustración 50 - Diagrama cuantil-cuantil UCIP intervención UV-C (TCOV).....	82
Ilustración 51 - Diagrama cuantil-cuantil UCIP intervención UV-C + fotocátalisis (TCOV).....	83
Ilustración 52 - Diagrama cuantil-cuantil UCIP sin intervención (HCHO).....	88
Ilustración 53 - Diagrama cuantil-cuantil UCIP intervención UV-C (HCHO).....	89
Ilustración 54 - Diagrama cuantil-cuantil UCIP intervención UV-C + fotocátalisis (HCHO).....	89
Ilustración 55 - Diagrama cuantil-cuantil UCIP sin intervención (CO ₂).....	94
Ilustración 56 - Diagrama cuantil-cuantil UCIP intervención UV-C (CO ₂).....	95
Ilustración 57 - Diagrama cuantil-cuantil UCIP intervención UV-C + fotocátalisis (CO ₂).....	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 – Limitaciones.....	20
Tabla 2 - Enfoque.....	24
Tabla 3 - Operacionalización de las variables.....	40
Tabla 4 - Matriz metodológica.....	42
Tabla 5 - Estado ambiental de la sala principal.....	45
Tabla 6 - Medición de suministro de aire de la sala principal.....	47
Tabla 7 - Medición de rejilla de retorno de la sala principal.....	47
Tabla 8 - Medición de diámetro de ducto.....	48
Tabla 9 - Parámetros de los ductos de ventilación.....	49
Tabla 10 - Estado ambiental del cubículo 7.....	51
Tabla 11 - Estado ambiental del cubículo 8.....	51
Tabla 12 - Condiciones de contorno.....	52
Tabla 13 - Velocidades de flujo en el prototipo.....	61
Tabla 14 - Características técnicas de las lámparas.....	64
Tabla 15 - Distancia de la lámpara hacia la pared.....	65
Tabla 16 - Dosis de radiación UV-C por lámpara.....	66
Tabla 17 - Dosis de radiación UV-A.....	67

Tabla 18 – Estadística descriptiva UCIP (TCOV).....	70
Tabla 19 - Estadística descriptiva cubículo 7 (TCOV).....	71
Tabla 20 - Estadística descriptiva cubículo 8 (TCOV).....	73
Tabla 21 - Resultados toma de muestras bacteriológicas: Sala UCIP.	77
Tabla 22 - Resultados toma de muestras bacteriológicas: cubículo 7.	77
Tabla 23 - Resultados toma de muestras bacteriológicas: cubículo 8.	77
Tabla 24 - Pruebas estadísticas.	80
Tabla 25 - Pruebas de distribución normal (TCOV).	81
Tabla 26 - ANOVA UCIP (TCOV).	84
Tabla 27- Pruebas post HOC (TCOV).	84
Tabla 28 - ANOVA cubículo 7 (TCOV).....	85
Tabla 29 - Pruebas HOC cubículo 7 (TCOV).....	86
Tabla 30 - ANOVA de Welch cubículo 8 (TCOV).....	86
Tabla 31-Pruebas HOC cubículo 8 (TCOV).....	87
Tabla 32 - Pruebas de distribución normal (HCHO).....	87
Tabla 33- ANOVA UCIP (HCHO).	90
Tabla 34 - Pruebas Post Hoc UCIP (HCHO).....	90
Tabla 35 – Prueba de Kruskal – Wallis Cubículo 7 (HCHO).....	91
Tabla 36 - Prueba Post hoc cubículo 7 (HCHO).	91
Tabla 37 - ANOVA cubículo 8 (HCHO).	92
Tabla 38 - Pruebas Post hoc C8 (HCHO).....	92
Tabla 39 - Pruebas de distribución normal (CO ₂).	93
Tabla 40 - Prueba de Kruskal - Wallis UCIP (CO ₂).	96
Tabla 41 - Prueba Post hoc UCIP (CO ₂).	96
Tabla 42- ANOVA cubículo 7 (CO ₂).....	97
Tabla 43- Pruebas Post hoc cubículo 7 CO ₂	97
Tabla 44 - Prueba ANOVA de Welch C8 (CO ₂).	98
Tabla 45- Pruebas HOC cubículo 8 (CO ₂).....	98

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 – Promedio.	43
Ecuación 2 - Desviación estándar.....	43
Ecuación 3 - Muestreo de población finita.	46
Ecuación 4 - Formula de velocidad.	48
Ecuación 5 - Área de un círculo.	48
Ecuación 6 - Conversión de CFM a m ³ /s.....	49
Ecuación 7 - Error estadístico para mediciones indirectas.....	49
Ecuación 8 - ECT.	53

Ecuación 9 - Tasa de Disipación.....	54
Ecuación 10 - Dosis de radiación UV.	64
Ecuación 11 - Irradiancia.....	64
Ecuación 12 - Tiempo de exposición.	64
Ecuación 13 - Ley del inverso cuadrado.	65
Ecuación 14 - Energía de un fotón.....	67
Ecuación 15 - Conversión energía a electronvoltios.....	67

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 - Presencia de TVOC en UCIP.	114
Anexo 2 - Presencia de TVOC en el cubículo 7.....	114
Anexo 3 - Presencia de TVOC en el cubículo 8.....	115
Anexo 4 - Presencia de HCHO en UCIP.	115
Anexo 5 - Presencia de HCHO en el cubículo 7.	116
Anexo 6 - Presencia de HCHO en el cubículo 8.	116
Anexo 7 - Presencia de CO ₂ en UCIP.....	117
Anexo 8 - Presencia de CO ₂ en el cubículo 7.....	117
Anexo 9 - Presencia de CO ₂ en el cubículo 8.....	118
Anexo 10 - Estadística descriptiva UCIP (HCHO).....	118
Anexo 11 - Estadística descriptiva cubículo 7 (HCHO).	119
Anexo 12 - Estadística descriptiva cubículo 8 (HCHO).	119
Anexo 13 - Estadística descriptiva UCIP (CO ₂).	119
Anexo 14 - Estadística descriptiva cubículo 7 (CO ₂).....	120
Anexo 15 - Estadística descriptiva cubículo 8 (CO ₂).....	120
Anexo 16 – Diagrama de caja (Presencia de HCHO en UCIP).....	121
Anexo 17 – Diagrama de caja (Presencia de HCHO en el cubículo 7).....	121
Anexo 18 – Diagrama de caja (Presencia de HCHO en el cubículo 8).....	122
Anexo 19 – Diagrama de caja (Presencia de CO ₂ en UCIP).....	122
Anexo 20 – Diagrama de caja (Presencia de CO ₂ en el cubículo 7).....	123
Anexo 21 – Diagrama de caja (Presencia de CO ₂ en el cubículo 8).	123
Anexo 22 - Diagrama cuantil-cuantil C7 sin intervención (TCOV).....	124
Anexo 23 - Diagrama cuantil-cuantil C7 intervención UV-C (TCOV).	124
Anexo 24 - Diagrama cuantil-cuantil C7 intervención UV-C+ fotocatalisis (TCOV).....	125
Anexo 25 - Diagrama cuantil-cuantil C8 sin intervención (TCOV).....	125
Anexo 26 - Diagrama cuantil-cuantil C8 intervención UV-C (TCOV).	126
Anexo 27 - Diagrama cuantil-cuantil C8 intervención UV-C+ fotocatalisis (TCOV).....	126
Anexo 28 - Diagrama cuantil-cuantil C7 sin intervención (HCHO).	127
Anexo 29 - Diagrama cuantil-cuantil C7 intervención UV-C (HCHO).....	127

Anexo 30 - Diagrama cuantil-cuantil C7 intervención UV-C+ fotocátalisis (HCHO).	128
Anexo 31 - Diagrama cuantil-cuantil C8 sin intervención (HCHO).	128
Anexo 32 - Diagrama cuantil-cuantil C8 intervención UV-C (HCHO).	129
Anexo 33 - Diagrama cuantil-cuantil C8 intervención UV-C+ fotocátalisis (HCHO).	129
Anexo 34 - Diagrama cuantil-cuantil C7 sin intervención (CO ₂).	130
Anexo 35 - Diagrama cuantil-cuantil C7 intervención UV-C (CO ₂).	130
Anexo 36 - Diagrama cuantil-cuantil C7 intervención UV-C + fotocátalisis (CO ₂).	131
Anexo 37 - Diagrama cuantil-cuantil C8 sin intervención (CO ₂).	131
Anexo 38 - Diagrama cuantil-cuantil C8 intervención UV-C (CO ₂).	132
Anexo 39 - Diagrama cuantil-cuantil C8 intervención UV-C+ fotocátalisis (CO ₂).	132

LISTA DE SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

COV	Compuestos Orgánicos Volátiles
CO ₂	Dióxido de carbono
TCOV	Compuestos Orgánicos Volátiles totales
HVAC	Calefacción, ventilación y aire acondicionado (<i>Heating, Ventilation and Air conditioning</i>)
IAQ	Calidad del aire interior (<i>Indoor Air Quality</i>)
HCHO	Formaldehído
PCO	Oxidación fotocatalítica (<i>Photocatalytic Oxidation</i>)
TiO ₂	Dióxido de Titanio
UV-A	Radiación ultravioleta A (315-400 nm)
UV-B	Radiación Ultravioleta B (280-315 nm)
UV-C	Radiación Ultravioleta C (100-280 nm)
UVGI	Irradiación Germicida Ultravioleta (<i>Ultraviolet germicidal Irraditation</i>)
\bar{x}	Media
s^2	Varianza
CV	Coefficiente de varianza
H ₀	Hipótesis nula
H ₁	Hipótesis alternativa

GLOSARIO

Fotocatálisis: Proceso en el que una sustancia llamada fotocatalizador acelera una reacción química cuando es expuesta a luz (generalmente ultravioleta o visible) (Lapedes, 1981).

Radiación: proceso por el cual la energía se propaga a través del espacio o un medio en forma de ondas electromagnéticas o partículas (Lapedes, 1981).

Irradiación: Proceso mediante el cual una fuente emite energía en forma de radiación (como luz, rayos ultravioletas, rayos X o partículas) que se propaga a través del espacio y alcanza un objeto o medio (Lapedes, 1981).

Sustrato: Superficie sobre la cual se deposita o inmoviliza un material funcional, como un fotocatalizador, un circuito, o una capa delgada (Lapedes, 1981).

Flujo de aire: Movimiento del aire a través de un espacio, conducto o sistema, generado por diferencias de presión, temperatura o mediante dispositivos mecánicos (Lapedes, 1981).

Multibanda: Se refiere a un dispositivo, sistema o señal que puede operar o funcionar en varias bandas de frecuencia distintas (Lapedes, 1981).

Sinergia: Efecto positivo que resulta de la cooperación o interacción entre dos o más agentes, elementos o fuerzas, de manera que el resultado combinado es mayor que la suma de sus partes por separado (Lapedes, 1981).

Calidad del aire interior: Conjunto de características del aire dentro de un espacio cerrado (hogar, oficina, hospital, etc.) que determinan su aptitud para la salud, confort y bienestar de los ocupantes. Incluye la concentración de contaminantes químicos, biológicos y físicos, así como parámetros como temperatura, humedad y ventilación (Lapedes, 1981).

I. INTRODUCCIÓN

El aumento de la industrialización ha tenido como consecuencia una mayor producción de compuestos orgánicos volátiles, lo que provoca que la calidad del aire interior se vea reducida afectando a las personas que se encuentran dentro de las instalaciones. Además, estudios han comprobado que una persona promedio pasa alrededor del 90% de su vida dentro de interiores, lo que da como resultado un mayor impacto de la importancia de la calidad del aire interior.

Tendencias en investigación se han desarrollado de forma exponencial debido a la pandemia de la COVID-19, intentando encontrar formas de garantizar la seguridad de las personas en espacios interiores evitando la propagación de microorganismos transportados por aire. Entre estas tendencias la utilización de luz ultravioleta como mecanismo de inactivación ha sido ampliamente estudiado, estableciéndola como una tecnología confiable para la reducción de la carga bacteriana.

Sin embargo, la luz ultravioleta ha demostrado tener una baja eficiencia en la reducción de compuestos orgánicos volátiles, lo que limita su uso en la inactivación de microorganismos. Por otra parte, la fotocatalisis ha emergido como una alternativa más que prometedora para la reducción de compuestos orgánicos volátiles, tanto en interiores como en exteriores.

Por tanto, se buscó alcanzar la sinergia de las tecnologías antes mencionadas para mejorar la calidad del aire interior en una zona hospitalaria mediante el diseño de un prototipo sinérgico multibanda. Para alcanzar un estado de sinergia en el prototipo se estudiaron los principales componentes y factores que podrían afectar el rendimiento de cada tecnología por separado para ser tomadas en cuenta y que no afecten los resultados. Por último, se evaluó la influencia del prototipo midiendo parámetros de calidad del aire interior e inactivación de microorganismos.

II. ESTADO DEL ARTE

2.1. ANTECEDENTES

La literatura analizada se extrajo en base a artículos científicos que se encontraron en bases de datos indexadas a Scopus, tales como PubMed, ScienceDirect y MDPI. Estos artículos cumplieron con el criterio de inclusión el cual fue de año de publicación no menor a 2020 y tema de interés para el proyecto en cuestión obteniendo un total de 58 artículos científicos, el proceso consto en una lectura inmersiva de cada uno de los artículos encontrados, excluyéndolos, dependiendo de la evaluación de su aporte hacia el proyecto de investigación.

Como resultado, la revisión mostró una fuerte tendencia creciente en los últimos años lo que da visibilidad hacia el interés reciente que existe en los temas estudiados. Siendo el 2024 el año con mayor número de publicaciones (n=17), seguido del 2021 (n=12), 2023 (n=10), 2025 (n=8), 2020 (n=6) y 2022 (n=5) (*Ilustración 1*).

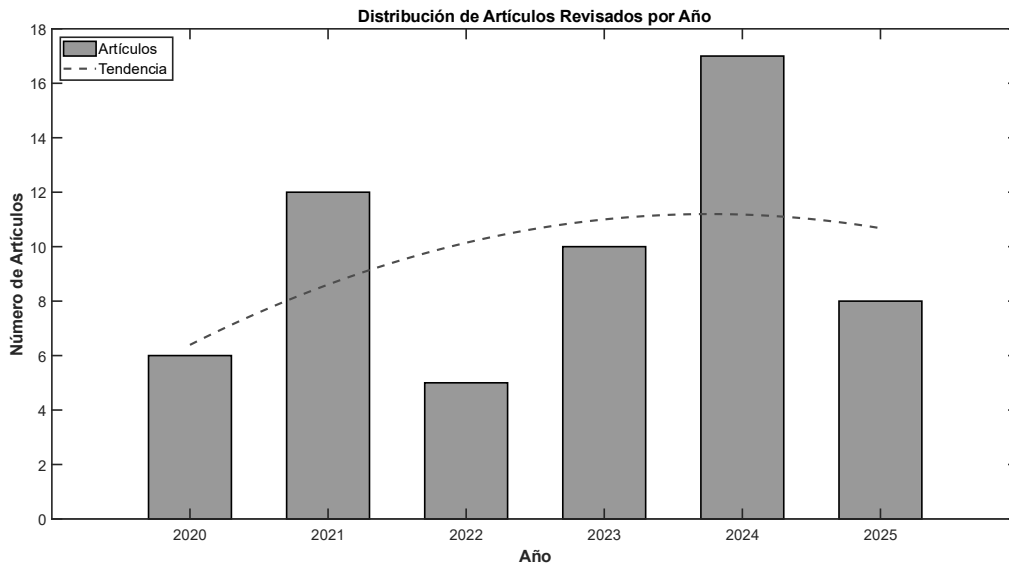


Ilustración 1 - Distribución de artículos revisados por año.

Fuente: Autoría propia.

Cabe destacar que la literatura revisada se encuentra esparcida a nivel global. Se analizaron estudios de 5 continentes, incluyendo un total de 27 países. El continente con mayor cantidad de estudios revisados fue Asia (n=26), seguido de Europa (n=21), América (n=8), África (n=2) y Oceanía (n=1). El país con mayor cantidad de estudios revisados fue La República Popular de China (n=15), seguido de Italia (n=6), Estados Unidos (4), Francia y Reino Unido (n=3), Alemania, Brasil, Canadá, Corea del Sur y Grecia (n=2), y finalmente Catar, España, Estonia, India, Indonesia, Irán, Japón, Nueva Zelanda, Pakistán, Polonia, Portugal, República Democrática del Congo, Singapur, Sri Lanka, Suiza, Tailandia y Túnez (n=1) (*Ilustración 2*).

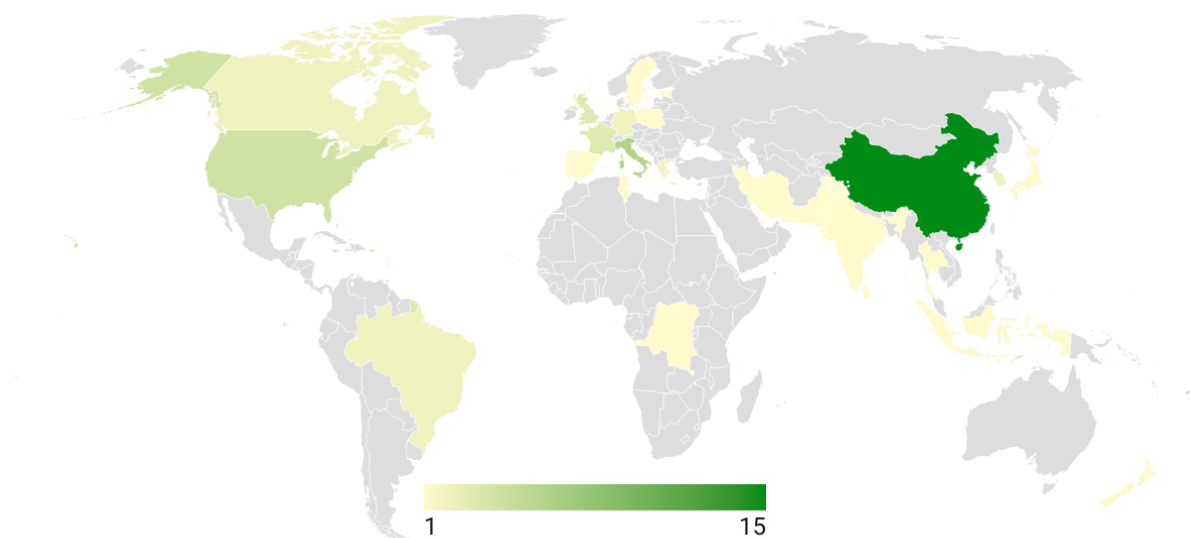


Ilustración 2 - Distribución de artículos revisados a nivel global.

Fuente: Autoría propia.

Asimismo, se revisaron las revistas en las cuales fueron publicados los artículos seleccionados, obteniendo un total de 44 revistas. Con el objetivo de estudiar las áreas de interés de las revistas involucradas se dividieron estas en 6 categorías, siendo la categoría predominante de interés las ciencias químicas y ambientales (n=20), seguida de ingeniería y tecnología (n=6), ciencias de la salud (n=8), ciencias multidisciplinarias (n=6), ciencias físicas y materiales, y otras áreas (n=4). Este hecho destacó la oportunidad de un proyecto multidisciplinario al observar todas las áreas involucradas en la investigación del tema abordado (*Ilustración 3*).

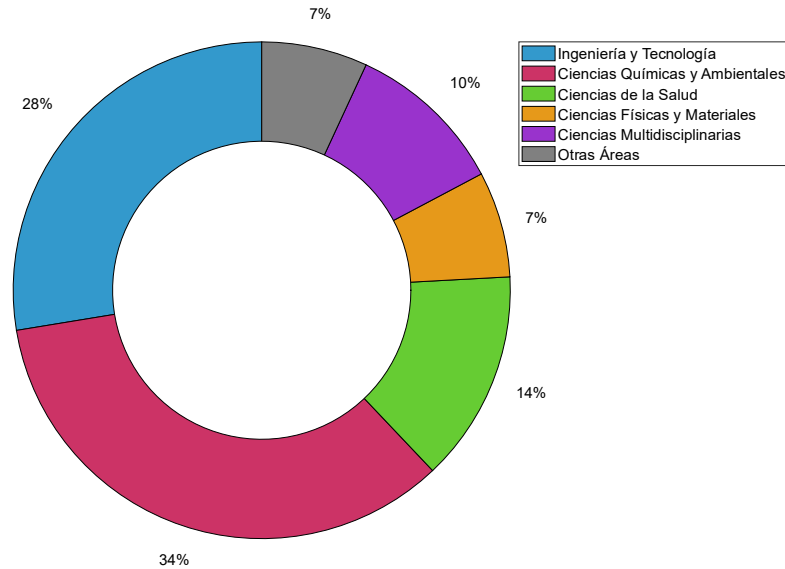


Ilustración 3 - Áreas de estudio de las revistas involucradas.

Fuente: Autoría propia

Finalmente, se obtuvo una serie de palabras claves repetidas dentro de cada artículo lo que daba hincapié a la importancia de dichos conceptos dentro de la temática abordada. Debido a que la literatura estudiada se concentró en su totalidad en artículos publicados en el idioma inglés, estos conceptos están revisados en dicho idioma. Sin embargo, cabe destacar que los conceptos que presentaron mayor importancia fueron Calidad del Aire Interior, Fotocatálisis / Fotocatalíticos, UV / Ultravioleta, UVGI, UV-C, UV-A y Dióxido de Titanio (TiO_2) (Ilustración 4).

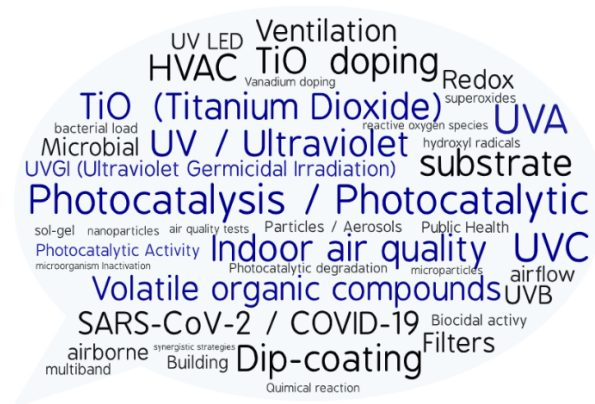


Ilustración 4 - Palabras Claves.

Fuente: Autoría propia.

2.1.1. CALIDAD DEL AIRE INTERIOR

Hay numerosos estudios que demuestran como la calidad del aire interior afecta a la salud y bienestar de las personas alrededor del mundo. Vardoulakis et al. (2020) realizaron un estudio exhaustivo en el cual documentaron que las personas pasan aproximadamente más del 90% de su tiempo en interiores. Lo que las expone a contaminantes vinculados a infecciones y síntomas crónicos. Este hecho va con la mano del estudio realizado por Sakellaris et al. (2021), llevado a cabo en 148 oficinas europeas, reveló que el 77.7% de los ocupantes reportaron síntomas relacionados a infecciones producidas por ambientes contaminados.

Ante la situación planteada y para abordar con mayor claridad esta problemática, Tran et al. (2020) realizaron una búsqueda en la cual listaron los contaminantes comunes que se pueden encontrar en interiores, así como sus efectos en la salud humana. Exponiendo así la importancia que recae en mantener una buena calidad del aire interior. Estos hallazgos coinciden con una investigación realizada por Saffell & Nehr (2023) donde destacaron como los contaminantes no solo afectan a la salud respiratoria, sino que también contribuyen a enfermedades crónicas.

Hechas las consideraciones anteriores, es importante mencionar que dentro de las instituciones de atención medica la calidad del aire interior juega un papel fundamental. Debido a que los microorganismos transportados por el aire generalmente no representan un gran riesgo para las personas sanas. Sin embargo, aquellos que son patógenos, junto con agentes ambientales oportunistas pueden causar infecciones en individuos con sistemas inmunológicos comprometidos (Bonadonna et al., 2021). Cabe agregar que esto expone a los trabajadores de estas instalaciones a infecciones asociadas a una mala calidad del aire interior. Para comprobar este hecho Nyembwe et al. (2024) realizaron un estudio en las unidades de cuidados intensivos de dos hospitales. Obteniendo como resultado que el 63% de los trabajadores en el área de la salud sufren de al menos un problema de salud relacionado a la mala calidad del aire interior.

De esta manera, el monitoreo de la calidad del aire interior en las instalaciones de atención médica consiste en un paso fundamental para atacar directamente a este sector de microorganismos involucrados en la propagación de infecciones (Do Nascimento et al., 2023).

De acuerdo con los descubrimientos encontrados en la literatura, para combatir esta problemática, se han desarrollado diversas estrategias de ventilación para optimizar la calidad del aire interior y garantizar el confort en distintos espacios cerrados (Al-Rikabi et al., 2024). Principalmente ya que mejorando la calidad del aire interior por medio de técnicas de ventilación se reduce el riesgo de contraer infecciones, tales como la producida por el SARS-COV-2 (Braggion et al., 2023). Haciendo uso de distintas técnicas dentro de las cuales hacen parte la aplicación de radiación producida por luz ultravioleta.

2.1.2. LUZ ULTRAVIOLETA

La radiación solar constituye la fuente principal de energía de nuestro planeta e incluye una cantidad significativa de rayos ultravioleta (UV). Los rayos ultravioleta son ondas electromagnéticas las cuales son invisibles e imperceptibles para el ser humano (Tang et al., 2024). Y esta se divide en tres tipos dependiendo de su longitud de onda: los rayos ultravioletas c (UV-C) que se constituyen por ondas de 200 – 280 nanómetros (nm), rayos ultravioletas b (UV-B) que van de ondas de 280 – 315 nm y los rayos ultravioletas a (UV-A) que cubren el rango de 315 – 400 nm. (Bai et al., 2020). Teniendo cada una de estas diferentes aplicaciones debido a sus propiedades únicas.

Resulta oportuno mencionar que la radiación ultravioleta que alcanza la superficie terrestre está compuesta mayoritariamente por UV-A, con una menor proporción de UV-B. La cantidad de radiación disponible varía según diversos factores tales como el ángulo solar, latitud, altitud, cobertura de nubes y espesor de la capa de ozono (Raymond-Lezman & Riskin, 2023). En el caso de la radiación UV-C, esta es absorbida en su mayor parte por la capa de ozono (Z.-W. Yu et al., 2024). Por lo que para la aplicación de estas se requiere de métodos artificiales que aprovechen en su máxima expresión las propiedades de estos elementos.

Sin embargo, la exposición hacia esta radiación se puede convertir en algo perjudicial para la salud humana. La radiación UV-C puede dañar ojos y piel con dosis mínimas de 4 – 6 mJcm⁻² causando fotoqueratitis (Slincy & Stuck, 2021). Por otro lado, la UV-A aunque es menos riesgosa, genera estrés oxidativo vinculado a cáncer de piel (Sandri et al., 2023). Lo que deja en claro que

se debe cuidar la exposición hacia esta radiación por parte de las personas si se quieren realizar de aplicaciones que requieran dosis controladas de radiación.

2.1.3. IRRADIACIÓN GERMICIDA ULTRAVIOLETA

La irradiación germicida ultravioleta (UVGI, por sus siglas en inglés) emplea luz ultravioleta de onda corta (UV-C) para desactivar organismos como virus, bacterias y hongos. Con el fin de evitar que estos organismos se reproduzcan y propaguen enfermedades (H. Luo & Zhong, 2021). Resulta oportuno mencionar que la razón del uso de radiación UV-C (longitud de onda 220 – 280 nm) es debido a que se ha comprobado que es una técnica efectiva para eliminar amplia gama de microorganismos y virus (Lai et al., 2021). Siendo principalmente útil aplicada en interiores (*Ilustración 5*).

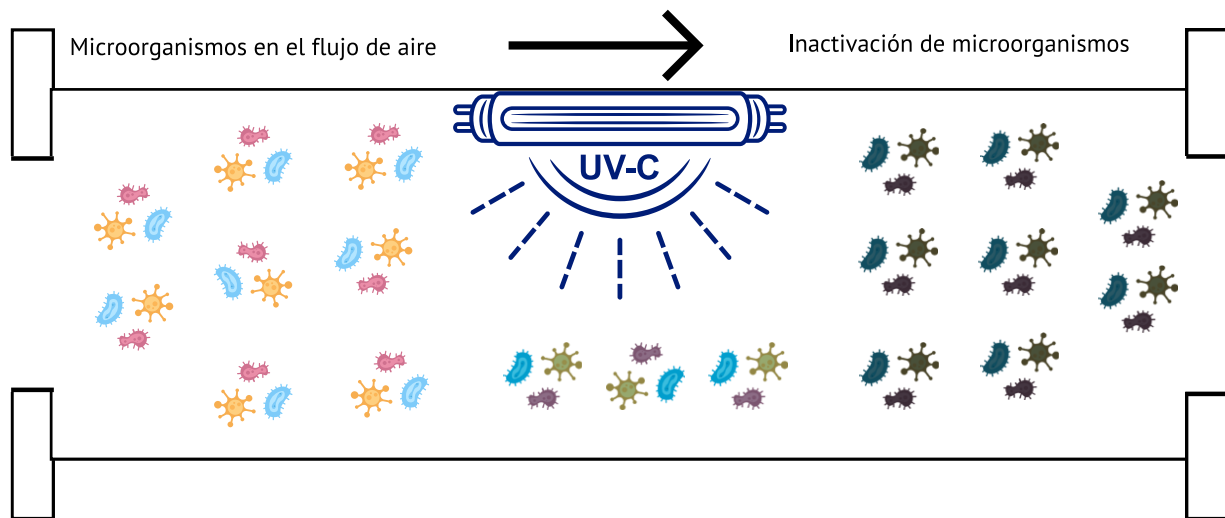


Ilustración 5 - Irradiación UVGI en ductos.

Fuente: Autoría propia, basado en Ye et).

Este proceso se da cuando los microorganismos atraviesan e interactúan con la radiación de luz UV-C. La inactivación se da por la absorción directa de fotones de UV-C ya sea por las bases

de los ácidos nucleicos o las proteínas de la cápside. Esta interacción genera fotoproductos responsables de desactivar la capacidad del virus de replicarse (Biasin et al., 2021).

Para este proceso se suele utilizar como fuente una lámpara de vapor de mercurio. Tal y como expuso Cattai et al. (2023) en un revisión sistemática basada en el UVGI y su conclusión de que esta es la tecnología más utilizada hasta la fecha. No obstante, existe otra fuente en forma de diodos emisores de luz. Para comprobar la efectividad de los sistemas UVC-LED, Nunayon et al. (2020) realizaron un estudio que tenía como fin comparar estos dos sistemas. Se obtuvo como resultado que el sistema de desinfección UVC-LED eran ligeramente menos efectivo que el sistema convencional. Sin embargo, el sistema basado en UVC-LED destacó por su flexibilidad de uso, diseño compacto, menor costo de mantenimiento y mayor vida útil. Esto los posiciona como una alternativa útil y prometedora en aplicaciones de desinfección en interiores.

Cabe agregar que la efectividad de esta técnica puede variar dependiendo de varios factores. Luo & zhong (2024) demostraron por medio de un estudio que existe menor efectividad para partículas largas (2.1 – 7 μm) en comparación a partículas de menor tamaño (0.65-2.1 μm). Además, encontraron que una humedad relativa mayor al 50% reduce la eficiencia de la desinfección UV. Estos factores en contra implican que se debe aumentar la dosis de UV en casos con partículas grandes y ambientes húmedos como opciones válidas para contrarrestar esta situación. Al-Rawi et al. (2022) realizaron un estudio en el que modificaron un deshumidificador domestico añadiéndole luces germicidas UV-C. Al unir ambos dispositivos se observó una reducción del crecimiento de hongos, del tamaño de las partículas del aire, y de la humedad relativa a menos del 50%.

Después de las consideraciones anteriores y en búsqueda de las mejores condiciones para la aplicación de UVGI, Y. Li et al. (2024) demostraron por medio de diversos estudios que la mayor eficacia de UV-C se dio con una temperatura en el rango de 26 - 28 °C, y humedad relativa entre el 30 - 40%. Además de esto, se encontró una relación inversamente proporcional con respecto a la velocidad del aire en el ducto de ventilación. De igual manera, también afecta la cantidad de dosis de radiación generada por la lámpara. Bono et al. (2021) encontraron que la dosis de radiación para la inactivación bacteriana generalmente varía entre decenas y cientos de mJ cm^{-2} .

Por otro lado, los virus demuestran mayor sensibilidad, pudiendo ser inactivados con dosis considerablemente menores de $1 - 10 \text{ mJ cm}^{-2}$.

Por su parte, dentro de las instalaciones existen dos maneras de colocar las lámparas UV. En paredes o techos altos, o integrados dentro de los ductos de ventilación de un sistema HVAC. Cada una de las formas tienen sus beneficios, sin embargo, el primer sistema es menos efectivo en espacios grandes. Aunque el segundo sistema es más costoso y complejo, ofrece una desinfección uniforme del aire antes de distribuirlo por edificios completos, además de evitar la exposición directa a la radiación UV (Sankurantripati & Duchaine, 2024).

En relación con este último, para comprobar la efectividad de la integración de las lámparas UV en los ductos del sistema HVAC se han realizado múltiples estudios. De Souza et al. (2022) instalaron 6 lámparas de mercurio que emitían una radiación UV-C (253.7 nm) en los conductos de la Unidad de Cuidados Intensivos (UCI). Luego de 24 horas de uso continuo se observó una reducción en el crecimiento de microorganismos, encontrando solamente 16 colonias bacterianas de las 150 vistas previamente. De igual manera Qiao et al. (2021) realizaron un estudio haciendo uso de un sistema de desinfección UV en ductos conformado por 3 lámparas de mercurio ($252.7 \text{ nm} \pm 1$) y filtros MERV 4. Ese estudio obtuvo una efectividad de inactivación de bioaerosoles del 99.98%.

Asimismo, otros estudios han buscado aprovechar el máximo potencial de la desinfección UVGI sin estar restringidos por los espacios de los ductos de ventilación, aplicando así nuevas técnicas y en nuevos sitios. Por ejemplo, Nunayon et al. (2020) desarrollaron un sistema de desinfección de bioaerosoles con UVC-LED rotativo. Obtuvieron como resultados que la rotación mejora la eficacia en entornos con mezcla de aire limitada entre un 22 – 49%. Por otro lado, Ruwan Jayakantha et al. (2022) desarrollaron un sistema que combinaba luz UV-C con un campo eléctrico multidireccional para eliminar microorganismos. Los resultados experimentales mostraron que el instrumento era efectivo incluso cuando se probó contra altas concentraciones bacterianas.

2.1.4. FOTOCATÁLISIS

El proceso fotocatalítico se da cuando una superficie fotoactivada es expuesta a la suficiente energía, lo que da paso a la excitación de un electrón (e^-) desde la banda de valencia,

que al recibir la energía del fotón deja un hueco (h^+) en la banda de valencia, obteniendo como resultado la reducción del oxígeno y la oxidación del agua (Ilustración 6).

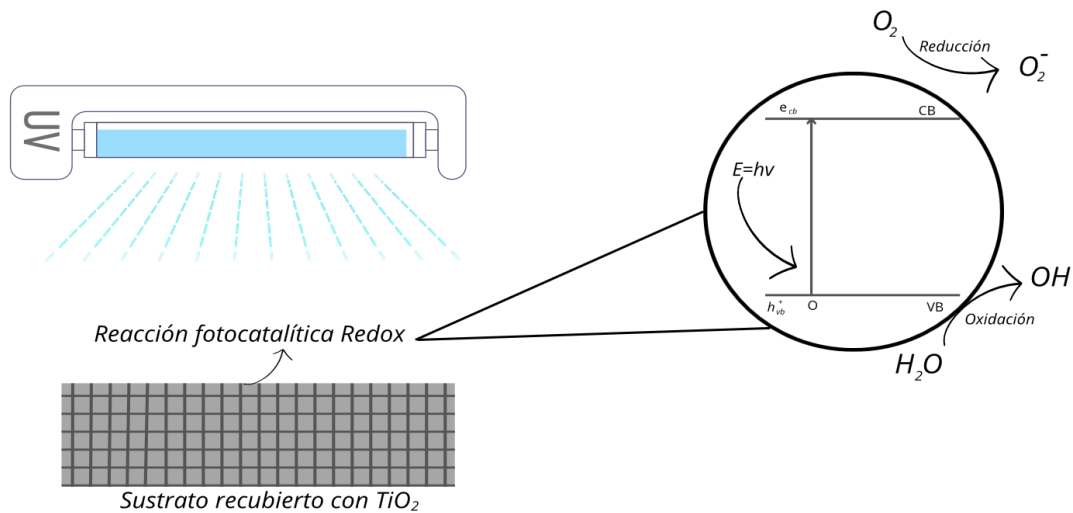


Ilustración 6 - Proceso de Fotocatálisis.

Fuente: Autoría propia basado en Bono et al.

Bono et al. (2021) afirma que estamos presenciando un aumento en las investigaciones enfocadas en la fotocatalisis por medio de semiconductores. Esta tendencia se atribuye principalmente a la pandemia de COVID-19 ya que toda la comunidad científica priorizó acelerar los avances tecnológicos que permitieran mitigar la propagación del virus.

Por otra parte, Chakravorty & Roy (2024) afirman que el crecimiento exponencial que tiene año tras año la revolución industrial ha destruido el mundo natural, obteniendo como resultado un incremento de la contaminación ambiental. Impulsando el interés en investigaciones que buscan comprobar la efectividad de métodos y medios de contención para mejorar la calidad del aire interior (IAQ) por sus siglas en ingles.

Otro factor que influye en la IAQ es la presencia de compuestos orgánicos volátiles (COV), ya que se ha asociado su presencia con afecciones como el asma, la enfermedad pulmonar obstructiva crónica, enfermedades cardiovasculares y el cáncer gastrointestinal (Ma et al., 2024). En relación a esto, Greco et al. (2025) realizaron un estudio en el cual listaron los COV más

comunes encontrados en ambientes interiores, de igual manera, exponiendo el riesgo que perciben estos elementos.

En consecuencia a la problemática planteada, la fotocatalisis sobresalió como un método efectivo para degradar una amplia gama de contaminantes y agentes biológicos. Se priorizó su aplicación con luz ultravioleta en ductos de ventilación en espacios como hospitales e industrias (Bono et al., 2021). En ese sentido, el estudio llevado a cabo por (Chakravorty & Roy, 2024) aplica la fotocatalisis utilizando luz visible para activar el fotocatalizador o superficie fotoactivada debido a que la implementación se realizó al aire libre. A pesar de utilizar distintos métodos, estas investigaciones comparten el mismo objetivo, la degradación fotocatalítica de los COV.

Un estudio llevado a cabo por Zhang et al. (2022) demostró que la implementación de fotocatalisis ya sea mediante fotocatalizadores activados por luz UV o luz visible es una de las estrategias más prometedoras para la eliminación de COV debido a su bajo costo, debido a su bajo costo, operación segura, eficiencia energética y alta eficiencia de mineralización en condiciones ambientales. No obstante, Almaie et al. (2022) afirma que a pesar de los resultados prometedores, se deben combinar varios enfoques para producir efectos sinérgicos para mejorar el rendimiento fotocatalítico, lo que conlleve a una mejora de la IAQ.

Precisando de una vez que este proceso se puede realizar por medio del uso de distintos materiales, siendo el más investigado el dióxido de titanio (TiO_2) debido a su alta estabilidad, bajo costo y nula toxicidad, otros materiales que se pueden considerar fotocatalíticos son el óxido de zinc (ZnO), trióxido de tungsteno (WO_3), vanadato de bismuto (BiVO_4) y estructuras metal-orgánicas (MOFs) (Chakravorty & Roy, 2024). Estos materiales son usados debido a su capacidad de acelerar la fotorreacción a través de una fuente de energía de luz ultravioleta. (Alhussain et al., 2024)

El dióxido de titanio (TiO_2) es el fotocatalizador más utilizado debido a sus propiedades que lo hacen eficaz en la destrucción de una variedad de contaminantes en su estado natural. La activación de este se realiza por medio de luz ultravioleta con una longitud de onda entre 180 – 400 nm (Tapia-Brito et al., 2023). Esto permite el uso de ya sea de UV-C como UV-A para la activación de dicho material. Tal y como se observó en un estudio realizado por lee et al. (2021).

Según Da Costa Filho & Vilar (2020) las técnicas de destrucción de COV que predominan son la ozonización, oxidación impulsada por plasma y la oxidación fotocatalítica (PCO). Se ha demostrado que la PCO mediante TiO_2 como fotocatalizador es una de las técnicas más sobresaliente debido a su alta eficiencia de destrucción y la capacidad de reutilizar el fotocatalizador. Abdelkader et al. (2025) afirma que el proceso de fotocatálisis mediante TiO_2 se basa en la irradiación UV sobre este material actuando como semiconductor para dar paso a una serie de reacciones que darán como resultado la formulación de agentes oxidantes como: especies reactivas de oxígeno (O_2^-) y radicales de Hidroxilo (OH).

Ahora bien, el TiO_2 es un material prometedor para la descomposición de VOCS en sistemas de ventilación interiores (Song et al., 2023). Sin embargo y a pesar que el TiO_2 tiene un alto rendimiento fotocatalítico, Xie et al. (2023) establece en su estudio basado en encontrar combinaciones de semiconductores que proporcionaran una mayor producción de agentes oxidantes para mejorar la destrucción de COV, que el proceso fotocatalítico se ve mejorado cuando se combinan varios semiconductores para la constitución del fotocatalizador. Sin embargo, esto dependerá de la eficiencia de la técnica de recubrimiento utilizada para preparar el sustrato.

Un estudio de Kayani et al. (2021) realizaron una comparativa entre el rendimiento fotocatalítico del TiO_2 dopado y en estado natural, demostrando que el TiO_2 posee algunas desventajas que afectan el resultado de destrucción de COV como la amplia banda prohibida, lo que imposibilita su aplicación en luz visible y restringe su aplicación en un rango determinado de longitud de onda. Este estudio permitió comprobar que se necesita de un dopaje o alteración en el fotocatalizador para deshacerse de las limitaciones asociadas al TiO_2 . Por esto mismo, los materiales basados en TiO_2 se han investigado exhaustivamente debido principalmente a su capacidad para inactivar microorganismos patógenos (Rokicka-Konieczna & Morawski, 2024).

El estudio llevado a cabo por Xie et al. (2023) hace uso de diferentes materiales como metal, vidrio y cerámica para el sustrato. Además de aplicar dopaje al TiO_2 con la intención de incrementar la capacidad destructiva de COV y no de obtener un medio de activación diferente. En cambio kayani et al. (2021) utiliza películas delgadas de TiO_2 como sustrato, enfocándose en el dopaje del TiO_2 con Vanadio, no para incrementar sus propiedades destructivas, sino para

cambiar el agente activador. Sin embargo, debido a que la luz solar está compuesta en 4% de luz UV, 42% de luz visible y 54% de luz infrarroja, una parte importante del espectro de activación se desperdicia si no se realiza el dopaje, ya que se demostró que el TiO_2 dopado con vanadio tiene un mayor rango de absorción, lo que conlleva a una mayor liberación de agentes oxidantes.

Resulta oportuno mencionar el estudio desarrollado por Abidi et al. (2025) que al realizar el dopaje de TiO_2 con semiconductores con menores bandas prohibidas se obtiene una mejora significativa en la actividad fotocatalítica impulsada por luz visible. Sin embargo, no se comprueba su eficiencia en luz ultravioleta.

No obstante, se ha demostrado que la implementación de recubrimientos fotocatalíticos puede mejorar la capacidad destructiva de COV. Wongaree et al. (2022) realizó un estudio en el cual la implementación del recubrimiento por inmersión, proceso que consiste en sumergir el sustrato en una mezcla que incluye el semiconductor y agua. Se demostró que la calidad del recubrimiento depende de factores como la viscosidad de la solución, el tiempo de inmersión y la velocidad de extracción. Por otra parte, Pedraza-Soto et al. (2025) establece que el éxito del recubrimiento depende en gran medida de la humectabilidad del sustrato.

Además, Li et al. (2024) demostraron que a pesar del incremento de actividad fotocatalítica que un recubrimiento por inmersión correctamente aplicado puede brindar, la superficie sigue estando expuesta a la contaminación por polvo o partículas inorgánicas que puedan interferir en la reacción del fotocatalizador con la luz UV. Esta problemática no se presenta únicamente en la técnica de recubrimiento por inmersión. Qiu et al. (2025) demostraron que la técnica de sol-gel también es susceptible a la formación de defectos en la superficie del sustrato, lo que puede provocar que el tiempo de respuesta de la reacción se extienda.

Por otra parte, Novra Gabriela et al. (2025) afirman que en aquellas aplicaciones en las cuales el sustrato estará expuesto a un mayor número de partículas y componentes, el recubrimiento con TiO_2 agregó una característica autolimpiante sobre el sustrato, aunque recomiendan realizar el recubrimiento nuevamente cuando se visualice que la superficie está dañada. Sin embargo, Yuqi et al. (2024) estableció que, a parte del recubrimiento es necesario realizar un proceso de redopaje independientemente de la técnica utilizada para el recubrimiento.

Negishi et al. (2023) diseñaron un sistema de eliminación de aerosoles por medio de fotocatalisis con una activación a través de irradiación de UV-A (365 nm). Como resultado obtuvieron una eliminación del 99.8% de aerosoles que tenían un tamaño de partícula con un rango de 1-10 μm . Al igual, Herrmann et al. (2024) diseñaron un reactor que contenía un total de 30 UV-LEDS a 367 nm con el fin de irradiar una membrana tubular de Al_2O_3 recubierta de TiO_2 . Como resultados se destacó la efectividad del reactor en la degradación de contaminantes micropoluentes. Demostrando así, el avance que se ha tenido en el diseño de sistemas fotocatalíticos para la desinfección ya sea del aire, como del agua.

De igual manera, en un estudio realizado por Al Hallak et al. (2023) demostraron que la actividad fungicida de los fotocatalizadores fue significativamente menor que su actividad bactericida, esto por las características propias de los hongos. Además, se demostró que la variación de la efectividad de esta técnica varía en función de la concentración y la duración del contacto.

Otra forma aplicable de las propiedades fotocatalíticas es realizando pintura a base de TiO_2 dopado con el fin de realizar la activación por medio de luz visible. Maggos et al. (2024) realizaron un estudio en el cual recubrieron con pintura fotocatalítica las paredes y el techo de una habitación de prueba. Como resultado se obtuvo una degradación del 85.4% de NO_2 y del 32.4% del tolueno. También existen cristales y vidrios comerciales que están recubiertos con TiO_2 dopado para adaptar su propiedad de antimicrobiana. Kisand et al. (2022) evaluaron las propiedades de distintas marcas de esta clase de productos, demostrando así, su efectividad en la capacidad de degradar contaminantes orgánicos y reducir de manera significativa la viabilidad de bacterias.

2.1.5. APLICACIONES MULTIBANDA SINÉRGICAS

Las estrategias sinérgicas multibanda se definen como la aplicación de métodos de distinta naturaleza con objetivos distintos que, cuando se combinan en un ambiente controlado pueden mejorar el resultado final de la operación.

Un estudio llevado a cabo por Ye et al. (2025) recopiló distintos métodos de aplicación de UVGI, comparando la eficiencia al colocar la fuente de radiación en distintas zonas dentro de

ducto, y modificando la longitud de onda de la fuente, concluyó que, a pesar de obtener resultados prometedores en la capacidad de desinfección de la UV-C, los resultados podrían mejorar si se combina con otras tecnologías para mejorar la IAQ.

La aplicación de estrategias multibanda son amplias debido a la amplitud del concepto, (J. Luo et al., 2025) la aplicaron para poder mejorar el rendimiento de un sistema de impresión 4D mediante la aplicación de distintas frecuencias durante el procedimiento. Teniendo en cuenta que la implementación de distintos métodos puede afectarse entre sí, es necesaria la intervención de un componente que haga la función de «puente» entre los demás componentes.

De acuerdo con Yu et al. (2025) el diseño de estrategias multibanda conlleva a menudo al desarrollo de sistemas multifuncionales, permitiendo la sinergia entre componentes que no comparten características ni objetivos, pero conviven en el mismo sistema para mejorar el rendimiento en general.

A pesar de que la aplicación de estrategias multibanda sinérgicas no ha tenido un enfoque primordial en instalaciones de atención médica, los resultados obtenidos en otras aplicaciones son alentadoras para su expansión a otros campos (Ye et al., 2025). Según Yu et al. (2025) una de las ventajas es que se pueden ampliar las funciones del sistema aprovechando los componentes agregados. A pesar de ello, J. Luo et al. (2025) comprobó que esta estrategia no puede ser aplicable bajo cualquier circunstancia, ya que los componentes podrían afectarse entre sí, disminuyendo la eficiencia del sistema.

Finalmente, a lo largo de toda la revisión bibliográfica se observó el creciente interés que ha habido hacia la implementación de UVGI y fotocatalisis en la desinfección de distintas superficies. Distintos autores han estudiado estas dos tecnologías buscando las mejores condiciones existentes para mejorar la eficacia. Por eso es importante visualizar en forma de una línea cronológica los eventos importantes que han marcado estas dos tecnologías en los últimos años (*Ilustración 7*).

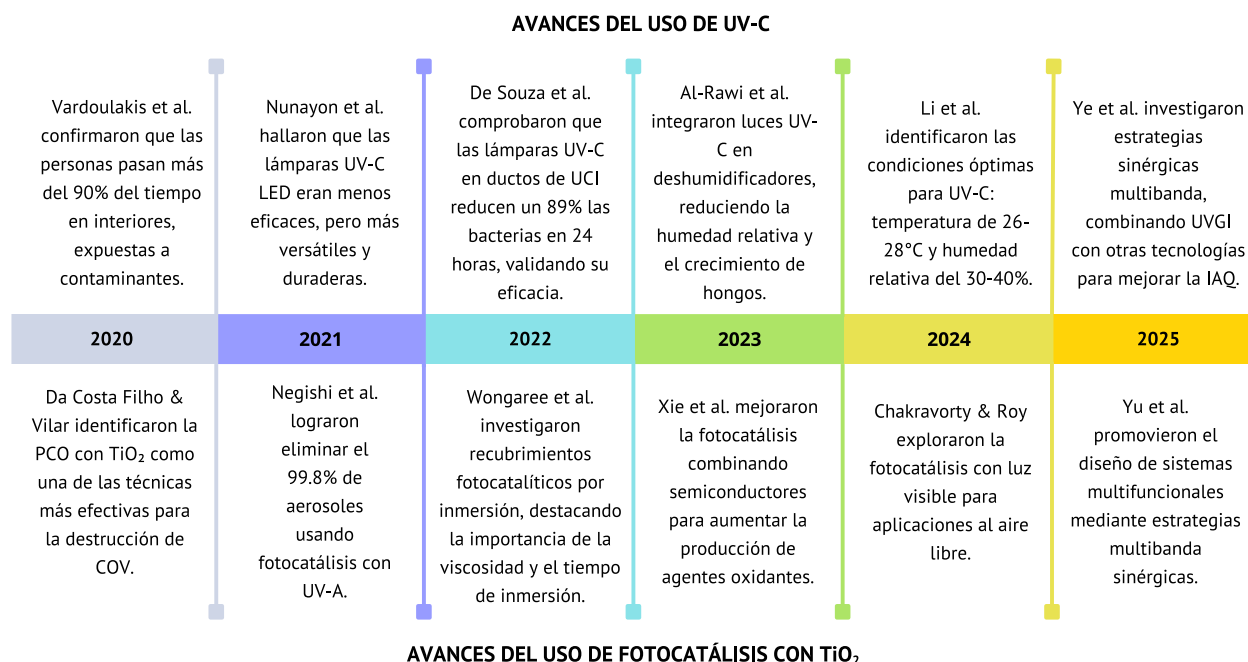


Ilustración 7 - Línea de tiempo.

Fuente: Autoría propia.

Esta representación cronológica muestra como estas tecnologías han ganado protagonismo en el ámbito científico y clínico debido a su capacidad para inactivar una amplia gama de microorganismos patógenos y reducir compuestos orgánicos volátiles sin la necesidad de químicos agresivos.

De igual manera, el enfoque de las investigaciones no solamente se ha centrado en la efectividad de dichas tecnologías, sino que también en la viabilidad de su implementación en entornos hospitalarios, industriales, residenciales e incluso al aire libre. Lo que concluye en el aprovechamiento de las fortalezas de cada energía para así, aumentar considerablemente la calidad del aire interior mediante un uso sinérgico.

2.2. PROBLEMÁTICA

La calidad del aire interior se ha convertido en un tema de creciente preocupación debido a su impacto directo en la salud humana, el bienestar y la productividad. Estudios recientes indican que las personas pasan aproximadamente más del 90% de su tiempo en espacios interiores, lo

que las expone exponencialmente a contraer alguna enfermedad producto de los contaminantes encontrados en el aire (Vardoulakis et al., 2020). Esta situación se agrava en entornos laborales, como oficinas, donde el 77.7% de los ocupantes reportan problemas de salud relacionados con ambientes contaminados. En instalaciones médicas, el riesgo es aún mayor, ya que los microorganismos y los compuestos orgánicos volátiles pueden afectar tanto a pacientes con sistemas inmunológicos comprometidos como al personal sanitario, del cual el 63% sufre al menos un problema de salud asociado a la mala calidad del aire según estudios llevados a cabo. (Nyembwe et al., 2024; Sakellaris et al., 2021).

A pesar de los avances en tecnologías de desinfección, como la irradiación germicida ultravioleta (UVGI) y la fotocatalisis, persisten desafíos significativos. La UVGI, aunque efectiva para inactivar microorganismos, depende de condiciones ambientales específicas, como una humedad relativa inferior al 50% y temperaturas entre 26 y 28°C, para alcanzar su máxima eficacia. Sin embargo, su eficacia se ve limitada en la degradación de COV. Por otro lado, la fotocatalisis particularmente con dióxido de titanio (TiO₂) ha demostrado ser prometedora en la degradación de COV y gases contaminantes, pero enfrenta limitaciones como un poco impacto en la desinfección de microorganismos (Y. Li et al., 2024; Qiu et al., 2025).

Estas limitaciones subrayan la necesidad de desarrollar estrategias innovadoras y sinérgicas que combinen múltiples tecnologías para optimizar la desinfección del aire en diversos entornos y por consiguiente, mejorar la calidad del aire interior. Sin embargo, la implementación de tales soluciones requiere de una comprensión profunda de factores que influyen en su eficacia, así como un enfoque multidisciplinario que garantiza su viabilidad técnica y económica.

2.3. IMAGEN INTEGRADORA

La imagen integradora muestra las acciones necesarias para la ejecución del proyecto de investigación. Esta ilustración representa explícitamente el primer paso que constituye en la recolección de información necesaria para planificar el proyecto, lo que le prosigue a la identificación de los materiales adecuados para llevar a cabo las pruebas y finalmente validar los resultados (*Ilustración 8*).

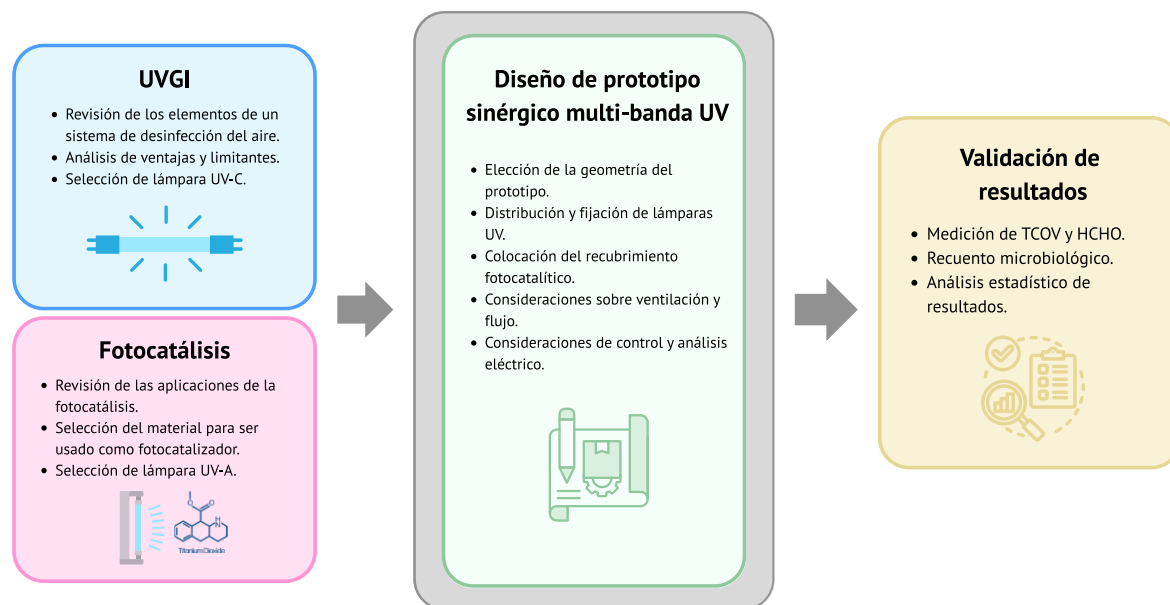


Ilustración 8 - Imagen Integradora.

Fuente: Autoría propia.

2.4. TABLA DE LIMITANTES

Los estudios analizados presentaron diversas limitantes (*Tabla 1*).

Tabla 1 – Limitaciones.

Autor (es)	Limitante	Detalle de la limitación
de Souza et al. (2022)	Limitaciones Experimentales	El estudio presentó limitaciones como la imposibilidad de realizar pruebas directas con virus además de no contar con condiciones óptimas de los ductos lo que redujo la eficiencia de la radiación UV-C.
Nunayon et al. (2020a)	Limitaciones Técnicas	Las pruebas se realizaron en una cámara controlada lo que limita la extrapolación de los resultados a otros espacios.
Biasin et al. (2021)	Limitaciones Experimentales	El estudio se limitó a ciertos cultivos y concentraciones específicos, además de no trabajar con superficies secas ni con aerosoles.
Al-Rawi et al. (2022)	Limitaciones Técnicas	El dispositivo consume más energía que alternativas comerciales. Además de no estudiar como afectaría la eficacia las condiciones climáticas variables.
Qiao et al. (2021)	Limitaciones Experimentales	Debido a requisitos de bioseguridad, el estudio no evaluó la efectividad del proyecto contra virus reales, si no que tuvo que usar modelos similares.

Continuación de Tabla 1.

Autor (es)	Limitante	Detalle de la limitación
Nunayon et al. (2020)	Limitaciones Técnicas	El estudio realizó las pruebas en una cámara hermética controlada, lo que no refleja completamente la eficacia en una situación real.
Abdelkader et al. (2025)	Imposibilidad de aplicación en el campo	Los resultados obtenidos han sido provocados por la simulación de un entorno verdadero, lo que pone en duda el rendimiento que se obtendría en una aplicación real.
Abidi et al. (2025)	Imposibilidad de aplicación en el campo	Los resultados obtenidos han sido provocados por la simulación de un entorno verdadero, sin considerar la presencia de partículas de polvo, ni el impacto de filtros.
J. Li et al. (2024)	Limitación experimental	No se comprobó si el dopaje realizado con TiO ₂ y sustancias fóbicas influía en la capacidad fotocatalítica del sustrato.
Xie et al. (2023)	Limitaciones Experimentales	No se comprobó la efectividad del proceso de oxidación avanzada basado en UV/peróxido mediante la adición de KMnO ₄ en aire.
Lee et al. (2021)	Imposibilidad de aplicación en el campo	La implementación de UV-C podían generar subproductos indeseados como el CO ₂ y el ozono, lo que implicaría desafíos adicionales para la implementación a gran escala.
Pedraza-Soto et al. (2025)	Limitaciones Experimentales	Al utilizar un sustrato metálico y liso se requieren de métodos de grabado agresivos lo que aumenta los precios y pone en riesgo al personal.
Al Hallak et al. (2023)	Limitaciones Experimentales	Se utilizó fotocátalisis como método de inactivación de microorganismos, cuando se ha demostrado su poca efectividad sin combinación de un método más.

Fuente: Autoría propia.

III. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un prototipo sinérgico multi-banda UV para la mejora de la calidad del aire interior en entornos hospitalarios.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar el rendimiento del prototipo bajo el escenario experimental UV-C + fotocatalisis con el uso aislado de UV-C en la eliminación de COV.
- Evaluar la influencia del prototipo en parámetros de calidad del aire interior.
- Examinar el impacto del prototipo en la inactivación de microorganismos presentes en el aire.

IV. MÉTODOS

Se optó por la implementación de un modelo metodológico de tipo secuencial, estructurado bajo el enfoque de la metodología en V, a fin de garantizar una correlación directa entre cada etapa de diseño y su correspondiente fase de validación. La propuesta parte de la definición de un prototipo funcional orientado a la desinfección del aire en entornos hospitalarios mediante radiación UV multibanda (*Ilustración 9*). El proceso inicia estableciendo el nivel de función, el cual es la búsqueda de mejorar la calidad del aire interior. Posteriormente, se desarrolló el diseño del prototipo, integrando criterios funcionales en base a la literatura revisada. Como último paso de esta etapa, se procedió con la selección y levantamiento de las distintas áreas donde se pondría a prueba el prototipo desarrollado.

De forma paralela, se realizaron simulaciones por dinámica de fluidos computacionales con el objetivo de identificar las zonas de mayor concentración de flujo dentro de las áreas previamente definidas. Esto permitió la integración del prototipo en el sitio más adecuado para una correcta desinfección del aire. A efectos de validación, se realizaron ensayos de medición mediante el recuento de carga microbiana y compuestos orgánicos volátiles totales, entre otros parámetros de validación, empleando equipos de muestreo en puntos estratégicos antes y después de la intervención del sistema.

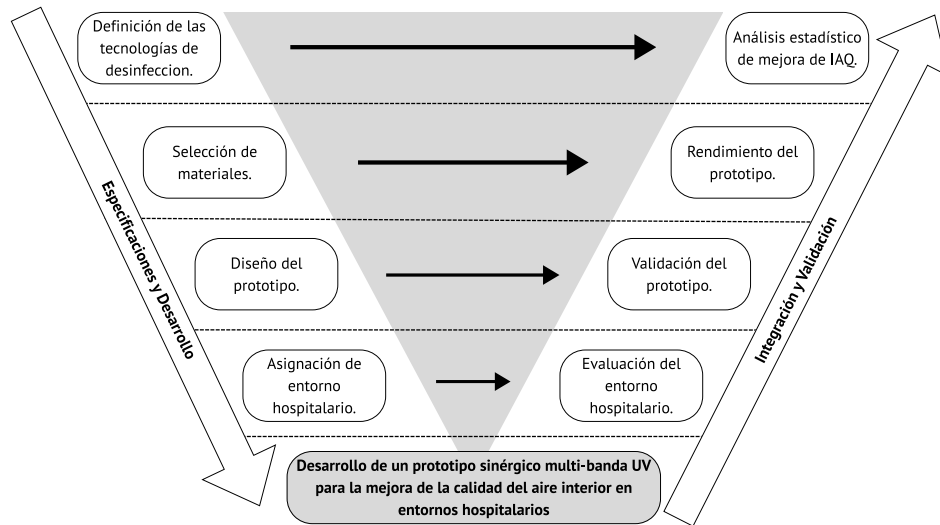


Ilustración 9 – Metodología.

Fuente: Autoría propia.

4.1. ENFOQUE

El enfoque de la presente investigación es de carácter cuantitativo, esto a razón de que se basa en la recopilación y análisis de datos numéricos relacionados con la eficacia del prototipo propuesto para mejorar la calidad del aire interior y reducir el conteo de microorganismos. El tipo de estudio es transversal debido a que los datos se obtuvieron en un periodo específico, sin seguimiento en el tiempo. Por otro lado, el diseño es experimental, dado que se manipularon intencionalmente ciertas variables para observar el impacto de estas en las variables dependientes. Finalmente, se utilizaron técnicas como la medición de parámetros de calidad del aire interior y conteo total de bacterias aerobias mesófilas, entre otras. durante varias etapas de la investigación, haciendo uso de instrumentos tales como monitores de calidad del aire, placa de petri, balómetro, software Ansys Fluent, entre otros (*Tabla 2*).

Tabla 2 - Enfoque.

Categoría	Tipo
Enfoque	Cuantitativo
Tipo de estudio	Transversal
Tipo de diseño	Experimental
Técnicas e Instrumentos	Monitores de calidad del aire, placa de petri, balómetro, software Ansys Fluent, entre otros.

Fuente: Autoría propia.

4.2. VARIABLES DE INVESTIGACIÓN

Según Hernández-Sampieri & Mendoza (2018) la variable dependiente no se manipula, siendo esta un objeto de medición para determinar el impacto o efecto de la manipulación de la variable independiente. En esta sección se describieron las variables involucradas en la investigación (*Ilustración 10*).

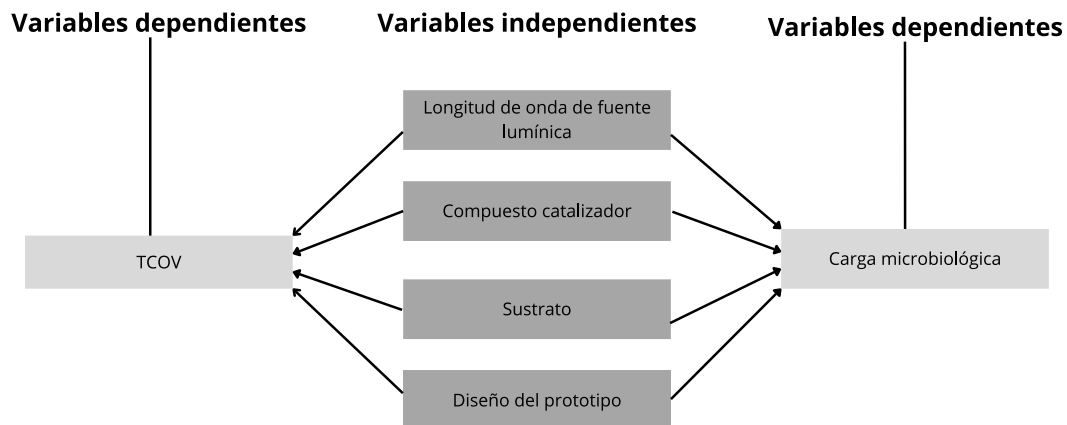


Ilustración 10 - Variables de investigación.

Fuente: Autoría propia.

4.2.1. VARIABLES INDEPENDIENTES

Se identificaron las siguientes variables independientes:

- Longitud de onda de fuente lumínica: Esta variable consistió en la selección de la longitud de onda de las lámparas UV utilizadas, lo que permitió clasificarlas dentro del espectro de UV-C y UV-A.
- Compuesto catalizador: Se implementó la selección del dióxido de titanio como compuesto catalizador, seleccionando su pureza, concentración en la mezcla y técnica de recubrimiento.
- Sustrato: Esta variable permitió la selección del material utilizado para realizar el recubrimiento con el compuesto catalizador.
- Diseño del prototipo: Esta variable abarcó la conceptualización del prototipo y el resultado final de su diseño.

4.2.2. VARIABLES DEPENDIENTES

Se identificaron las siguientes variables dependientes:

- TCOV: Esta variable permitió medir el total de compuestos orgánicos volátiles en el aire durante los distintos escenarios experimentales.
- Carga microbiológica: Esta variable permitió medir el efecto de inactivación de microorganismos del prototipo.

4.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS APLICADOS

4.3.1. TÉCNICAS

4.3.1.1. Simulación de flujo de aire mediante Ansys Fluent.

Se utilizó el software Ansys Fluent para realizar simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD). El objetivo de la aplicación de este software fue modelar el comportamiento del flujo de aire dentro de las ubicaciones donde se realizaron las evaluaciones. Esto permitió identificar las zonas de mayor concentración de flujo.

4.3.1.2. Monitoreo de la calidad del aire.

Se aplicó una técnica experimental que consiste en la medición en tiempo real de parámetros de calidad del aire. Tales como temperatura, humedad relativa, número total de compuestos orgánicos volátiles (TCOV), presencia de dióxido de carbono (CO₂) y formaldehído (HCHO). Haciendo uso de un monitor especializado para realizar mediciones de calidad del aire.

4.3.1.3. Recuento de bacterias aerobias mesófilas

Con el objetivo de evaluar la efectividad del prototipo en la reducción de la carga de bacterias aerobias mesófilas, levaduras y mohos. Se utilizaron placas preparadas con medio de cultivo conservadas previamente en un rango de temperatura entre 2°C y 8°C, posteriormente se realizó el proceso de incubación para favorecer el crecimiento de bacterias aerobias mesófilas, levaduras y mohos y obtener un recuento de unidades formadoras de colonias en las diferentes etapas de validación.

4.3.2. INSTRUMENTOS

4.3.2.1. *Software Ansys Fluent.*

Considerado como el software de simulación de fluidos líder en la industria (ANSYS, Revisado en 2025), se usó con el fin de realizar simulaciones CFD del flujo de aire en la sala hospitalaria de interés, siendo esta la zona principal de la Unidad de Cuidados Intensivos Pediátrico (UCIP), y dos cubículos individuales dentro de esta misma.

4.3.2.2. *Software SolidWorks.*

Se empleó SolidWorks Flow Simulation, módulo de simulación de flujo incluido en SolidWorks, con el objetivo de analizar el comportamiento del aire dentro del prototipo. Esta herramienta permitió visualizar la distribución de velocidades y trayectorias del flujo en el interior del prototipo, brindando información clave para optimizar la ubicación de los emisores UV y del material fotocatalítico.

4.3.2.3. *Software Datatab.*

Datatab fue utilizado como herramienta estadística para el análisis de datos obtenidos en el estudio, particularmente para evaluar la variación de parámetros durante las distintas fases de validación del prototipo. Este Software permitió aplicar pruebas para la comprobación de hipótesis, análisis de varianza, estadística descriptiva, estadística inferencial y visualización grafica de los resultados.

4.3.2.4. *Software AutoCAD.*

Siendo una herramienta útil para el diseño asistido por computadora. AutoCAD fue utilizado para elaborar los planos detallados de la sala hospitalaria seleccionada, incluyendo la zona principal y dos cubículos individuales dentro de la misma. Estos planos sirvieron como base para el modelado y posterior análisis en otros softwares de simulación.

4.3.2.5. *Placa de Petri.*

Placa de Petri que contiene un medio de cultivo adecuado para el crecimiento bacteriano. Se utilizó para la siembra y posterior incubación de las muestras bacteriológicas recolectadas en superficies de interés después de las simulaciones realizadas (*Ilustración 11*).

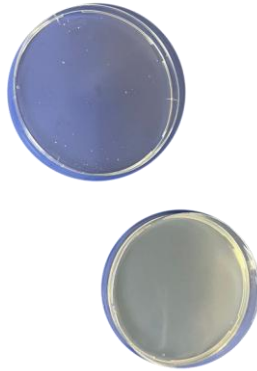


Ilustración 11 - Placa de Petri.

Fuente: Autoría propia.

4.3.2.6. *Monitor de calidad de aire*

Es un instrumento especializado para el conteo y medición de distintas variables ambientales y presencia de gases en el aire. Se usó para la medición de la temperatura, humedad, dióxido de carbono, formaldehído y conteo de compuestos orgánicos volátiles totales en las zonas de interés (*Ilustración 12*).



Ilustración 12 - Monitor de Calidad del Aire.

Fuente: Autoría propia.

4.3.2.7. *Balómetro*

El balómetro es un instrumento que tiene como uso principal tomar lecturas directas del volumen del aire encontrado en difusores y rejillas. Se utilizo con el fin de tomar las mediciones anteriormente planteadas para calcular la velocidad del aire en ductos de ventilación (CFM) (*Ilustración 13*).



Ilustración 13 - Balómetro.

Fuente: Autoría propia.

4.4. MATERIALES

Los materiales utilizados para realizar el prototipo se mencionan a continuación, con descripciones específicas de sus funciones y características técnicas.

4.4.1. LÁMPARA GERMICIDA UV-C.

Dispositivo que emite radiación ultravioleta en el rango UV-C (Longitud de onda de 253.7 nm), útil para la inactivación de microorganismos. Cuenta con una potencia de 6 vatios, alimentación de 110V, fabricado con fibra de vidrio, con dimensiones de 3.56 cm de ancho y 23.5cm de largo, y con un diámetro de bombilla de 3.56 cm. Fabricado por COOSPIDER UV (*Ilustración 14*) (COOSPIDER UV, Revisado en 2025).



Ilustración 14 - Lámpara UV-C.

Fuente: Autoría propia.

4.4.2. LÁMPARA UV-A DE 365 NM.

Lámpara fluorescente que emite radiación ultravioleta en el rango UV-A. Su uso está justificado debido a que es ideal para activar el proceso de fotocatalisis cuando se usa en combinación con dióxido de titanio (TiO_2). Cuenta con una potencia de 6 vatios, alimentación de 120V, con dimensiones de 2.54 cm de ancho, 23.5 cm de largo, y con un diámetro de bombilla de 2.54 cm. Fabricado por Hypool (*Ilustración 15*) (Hypool, Revisado en 2025).



Ilustración 15 - Lámpara UV-A.

Fuente: Autoría propia.

4.4.3. DIÓXIDO DE TITANIO (TiO₂).

Polvo semiconductor con propiedades fotocatalíticas. Al ser activado por luz ultravioleta, promueve la formación de especies reactivas de oxígeno capaces de oxidar y descomponer compuestos orgánicos volátiles. Es puro, de grado reactivo, comercializado por la empresa Pantai (*Ilustración 16*) (Pantai, Revisado en 2025).



Ilustración 16 - Empaque de dióxido de titanio.

Fuente: Autoría propia.

4.4.4. CARCASA DEL PROTOTIPO.

Carcasa del prototipo, de lámina metálica, se utilizó como cuerpo principal del proyecto y espacio por el cual va a fluir el aire a tratar. Cuenta dos tapas en forma de “V” que cierran los extremos (*Ilustración 17*).



Ilustración 17 – Carcasa.

Fuente: Autoría propia.

4.4.5. VENTILADORES.

Se utilizaron dos ventiladores axiales de 40 x 40 mm alimentados a 5V, encargados de generar el flujo de aire dentro del prototipo. Uno de ellos se encargó de introducir el aire ambiente al interior del prototipo, mientras que el otro, ubicado en el extremo opuesto, lo expulsaba al exterior. Los ventiladores tienen la capacidad de mover un caudal de 6 CFM (*Ilustración 18*).



Ilustración 18 – Ventiladores.

Fuente: Autoría propia.

4.4.6. CONTENEDOR DE BATERÍAS.

Se usaron dos contenedores de baterías con capacidad máxima de 3 baterías por cada uno para alimentar cada ventilador respectivamente (*Ilustración 19*).



Ilustración 19 - Contenedor de baterías.

Fuente: Autoría propia.

4.4.7. PAPEL ALUMINIO.

Algunas superficies de la carcasa fueron recubiertas con papel aluminio, con el objetivo de mejorar la reflexión de la radiación UV y reducir la absorción por parte del material, optimizando así la eficiencia del prototipo (*Ilustración 20*).



Ilustración 20 - Piezas recubiertas con papel aluminio.

Fuente: Autoría propia.

4.4.8. LAMINA ACRÍLICA PLASKOLITE.

Para la aplicación de la fotocatalisis fue necesario seleccionar un sustrato, en este caso un acrílico transparente plaskolite debido a sus propiedades resistentes a la luz UV y la facilidad de adición que su superficie tiene con el TiO_2 (*Ilustración 21*).



Ilustración 21 – Lamina plástica plaskolite.

Fuente: Autoría propia.

4.5. MÉTRICAS DE EVALUACIÓN

4.5.1. DESARROLLO Y ANÁLISIS DEL PROTOTIPO

Se llevó a cabo el desarrollo del prototipo haciendo uso de los materiales previamente mencionados. Posterior a los distintos cortes, acoplamiento y ensamblaje, se realizaron pruebas de dinámica de fluidos computacional para estudiar el comportamiento del flujo dentro de este (Ilustración 22).



Ilustración 22 - Desarrollo del prototipo.

Fuente: Autoría propia.

Nota*: En la ilustración se observa a) Corte del material elegido para contener el sustrato. b) Colocación de las lámparas dentro del cuerpo del prototipo. c) Vista superior de la ubicación de las tres lámparas. d) Vista frontal descubierta del prototipo.

4.5.2. LEVANTAMIENTO DE LA SALA

Se obtuvo disponibilidad en la sala de unidad de cuidados intensivos pediátricos (UCIP). Dicha sala está destinada para el tratamiento de pacientes pediátricos con enfermedades complejas como infecciones respiratorias graves. Posteriormente, se procedió a realizar el

levantamiento de la sala para poder realizar la simulación en Ansys Fluent sobre el comportamiento del flujo de aire.

4.5.3. CÁLCULO DE VELOCIDAD DEL AIRE

Se utilizó el balómetro para medir el caudal de las rejillas de ventilación usadas como parte del muestreo, posteriormente, se procedió a calcular la velocidad del aire (*Ilustración 23*).



Ilustración 23 - Medición con balómetro.

Fuente: Autoría propia.

4.5.4. SIMULACIÓN EN ANSYS FLUENT

Mediante el software de simulación Ansys Fluent se llevó a cabo el estudio del comportamiento del flujo de aire en la habitación teniendo en cuenta los datos obtenidos en las secciones 4.5.2. y 4.5.3., esto permitió conocer los lugares donde se colocaría el prototipo para la realización de tomas de muestras.

4.5.5. REALIZACIÓN DEL RECUBRIMIENTO POR INMERSIÓN

El recubrimiento consistió en la mezcla de 5 gramos de TiO_2 con 100 mL de agua destilada como solvente. Una vez realizada la mezcla, se realizó la técnica convencional del recubrimiento por inmersión (*Ilustración 24*).



Ilustración 24 - Sustrato con el recubrimiento.

Fuente: Autoría propia.

4.5.5. MEDICIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AIRE

Se colocó el monitor de calidad del aire al ventilador de salida del prototipo para obtener valores de medición. Se obtuvieron valores de compuestos orgánicos volátiles totales, formaldehído, temperatura ambiente, humedad relativa, y presencia de dióxido de carbono. En total, se obtuvieron tres muestras por zona analizada: una bajo condiciones en ambientes normales sin ningún tipo de intervención, otra únicamente con intervención de la radiación UV-C y una tercera con la intervención del prototipo operando en su totalidad (UV-C + fotocatalisis), con intervalos de 15 minutos por cada escenario experimental (*Ilustración 25*).

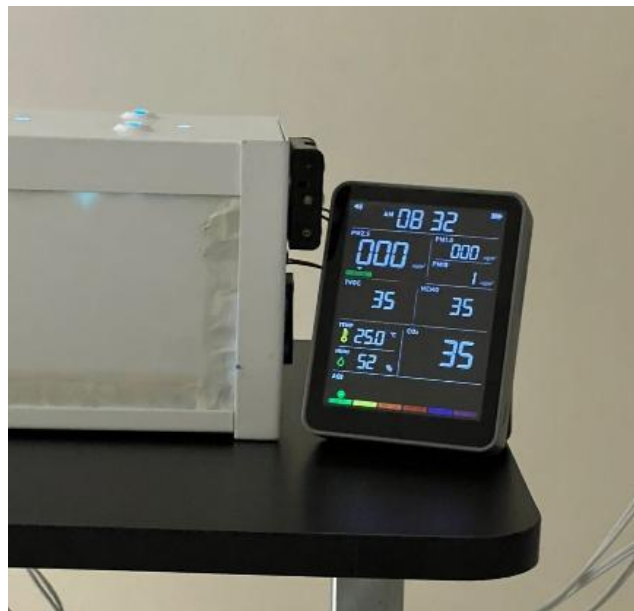


Ilustración 25 - Medición de parámetros de calidad del aire.

Fuente: Autoría propia.

4.5.6. TOMA DE MUESTRAS BACTERIOLÓGICAS

Se colocaron placas de Petri con medio de cultivo en las zonas donde la simulación indicó una mayor concentración del flujo de aire. Las placas se expusieron durante 5 minutos para cada una de las fases de evaluación del prototipo a 5 centímetros del ventilador de salida. Se realizó este proceso durante los tres escenarios experimentales de validación del prototipo mencionados en la sección 4.5.5. con un intervalo de 15 minutos por escenario (*Ilustración 26*).



Ilustración 26 - Toma de muestras bacteriológicas.

Fuente: Autoría propia.

4.6. METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN

4.6.1. VALIDACIÓN MATEMÁTICA

Esta técnica consistió en el desarrollo de cálculos teóricos que respalden la efectividad del prototipo. Se determinó el valor total atribuible a la irradiación germicida ultravioleta provocada por las lámparas UV-C a distintos tiempos de exposición, considerándose todas las variables presentes. Adicionalmente, se calculó el rendimiento teórico del proceso de fotocatalisis asistida con dióxido de titanio (TiO_2). Para este proceso se tomaron en cuenta formulas observadas durante la revisión de la literatura.

4.6.2. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

La validación experimental del prototipo propuesto se llevó a cabo mediante una serie de pruebas consistentes en tres escenarios experimentales, con el objetivo de evaluar progresivamente la eficacia del prototipo. Cabe destacar que cada prueba se realizó en zonas de interés evaluadas por software de simulación de dinámica de fluidos con el fin de aprovechar las zonas con mayor flujo de aire.

- Escenario experimental sin intervención: Pruebas sin ningún tipo de sistema de irradiación para observar los valores base. Se realizó en 3 zonas distintas.
- Escenario experimental con intervención UV-C: Pruebas utilizando únicamente lámparas UV-C, para evaluar la eficacia de la irradiación directa. Se realizó en 3 zonas distintas.
- Escenario experimental con intervención UV-C+ fotocatalisis: Pruebas con el prototipo completo, con el fin de evaluar el aumento de eficacia con respecto al escenario experimental con intervención UV-C. Se realizó en 3 zonas distintas.

4.6.3. VALIDACIÓN ESTADÍSTICA

Se hicieron uso de análisis estadísticos para determinar la significancia de los resultados y la confiabilidad del sistema. Este análisis se dividió en dos secciones.

4.6.3.1. *Estadística descriptiva*

Al tener distintas mediciones de los mismos parámetros, se utilizaron medidas de tendencia central, tales como media y mediana, así como se calculó la dispersión de los datos por medio de la desviación estándar. De igual manera, se realizó un análisis de estos valores para comprender el conjunto de datos obtenidos.

4.6.3.2. *Estadística inferencial*

Para la conclusión de hipótesis se aplicaron pruebas de análisis comparativos, estas pruebas dependieron de la distribución y forma de los datos. Entre las pruebas aplicadas se encuentran ANOVA, ANOVA de Welch y la prueba de Kruskal-Wallis.

4.7. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

ACTIVIDADES REALIZADAS	SEMANA #1	SEMANA #2	SEMANA #3	SEMANA #4	SEMANA #5	SEMANA #6	SEMANA #7	SEMANA #8	SEMANA #9
Revisión bibliográfica de otros estudios llevados a cabo para criterio de diseño.									
Adquisición de materiales e instrumentos.									
Diseño y desarrollo del prototipo.									
Asignación y levantamiento de la sala.									
Simulación de flujo.									
Implementación de lámparas UV-C y primera toma de muestras.									
Implementación del prototipo sinérgico multi-banda UV y segunda toma de muestras.									
Análisis de resultados.									
Discusión y conclusiones.									

Ilustración 27 - Cronograma de Actividades.

Fuente: Autoría propia.

4.8. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

Tabla 3 - Operacionalización de las variables.

Objetivos	VARIABLES	Definición	Dimensiones	Indicadores
	Independiente			
	Longitud de onda de fuente lumínica	Se refiere al tipo de luz UV que se utilizó	Rango de longitudes de onda, dosis de irradiación	nm máximos y mínimos, Intensidad de luz UV emitida a la longitud de onda específica (mW/cm ²)
	Independiente			
	Compuesto catalizador	Tipo de compuesto químico utilizado como catalizador	Concentración del compuesto	Grado de pureza del compuesto
Objetivo General Desarrollar un prototipo sinérgico multi-banda UV para la mejora de la calidad del aire interior en entornos hospitalarios.	Independiente			
	Diseño del prototipo	Consideraciones de diseño y revisión de los componentes del prototipo	distribución de lámparas UV, flujo de aire	Cantidad de lámparas, velocidad del aire y caudal total
	Dependiente			
	TCOV	Se refiere al impacto del prototipo en los niveles de COV	Cantidad de COV, eficiencia de eliminación	Concentración total de COV, porcentaje de eliminación después de la aplicación del prototipo
	Dependiente			
	Carga microbiológica	Impacto del prototipo en el nivel de carga bacteriana	Tipo de microorganismos, eficiencia de inactivación	Resultados de muestras bacteriológicas, porcentaje de inactivación de microorganismos después de la aplicación del prototipo

Continuación de Tabla 3.

Objetivos	Variabes	Definición	Dimensiones	Indicadores
Objetivo específico Comparar el rendimiento del prototipo bajo el escenario experimental UV-C + fotocátalisis con el uso aislado de UV-C en la eliminación de COV.	Independiente Diseño del prototipo	Consideraciones de diseño y revisión de los componentes del prototipo	Tipo de lámparas UV, tipo de catalizador y sustrato	Longitud de onda de las lámparas, compuesto químico seleccionado y material
	Independiente Compuesto catalizador	Tipo de compuesto químico utilizado como catalizador	Eficiencia fotocatalítica del compuesto, compatibilidad con UV	Porcentaje de eliminación de COV y tiempo de reacción, banda prohibida de activación del compuesto
	Independiente Longitud de onda de fuente lumínica	Se refiere al tipo de luz UV que se utilizó	Interacción con el compuesto catalizador, eficiencia en inactivación	Eficiencia de reacción y generación de especies reactivas de oxígeno, porcentaje de inactivación de distintos tipos de UV
Objetivo específico Evaluar la influencia del prototipo en parámetros de calidad del aire interior.	Dependiente TCOV	Se refiere al impacto del prototipo en los niveles de COV	Concentración de COV, eficiencia del prototipo	Porcentaje de COV antes y después de la aplicación del prototipo, porcentaje de reducción de COV
Objetivo específico Examinar el impacto del prototipo en la inactivación de microorganismos presentes en el aire.	Dependiente Efectos microbiológicos	Impacto del prototipo en el nivel de carga bacteriana	Inactivación microbiana	Porcentaje de inactivación de microorganismos

Fuente: Autoría propia.

4.9. MATRIZ METODOLÓGICA

Tabla 4 - Matriz metodológica.

Problema de Investigación	Preguntas de investigación	Objetivos	Variables	Metodología y herramientas
La problemática se centra en la necesidad de mejorar la calidad del aire interior en entornos hospitalarios críticos, mediante la identificación de las limitantes de los métodos convencionales de desinfección del aire o debido a su mala utilización. Debido a esto se plantea el diseño de un prototipo sinérgico multi-banda UV conformado por tecnología UVGI y fotocatalisis, de modo que los componentes trabajen aprovechando sus ventajas individuales y que mutuamente reduzcan sus respectivas limitaciones, optimizando la bioseguridad del ambiente.	¿Cuál es el impacto de un prototipo sinérgico multi-banda al ser utilizado en entornos hospitalarios?	Objetivo General Diseñar un prototipo sinérgico multi-banda UV para la mejora de la calidad del aire interior en entornos hospitalarios.	Independiente Longitud de onda de fuente lumínica. Compuesto catalizador. Sustrato. Diseño de prototipo.	Validación experimental, diagrama eléctrico, monitor calidad de aire, cultivos bacterianos, validación estadística descriptiva e inferencial.
	¿Cuál es la eficacia del prototipo sinérgico UV-C + fotocatalisis en la eliminación de COV en comparación con el uso exclusivo de UV-C?	Objetivos Específicos Comparar el rendimiento del prototipo bajo el escenario experimental UV-C + fotocatalisis con el uso aislado de UV-C en la eliminación de COV.	Dependientes TCOV	Medición de compuestos orgánicos volátiles (TVOC), validación estadística inferencial (pruebas t o ANOVA), y uso de monitor de calidad del aire.
	¿Qué impacto tiene el prototipo en los niveles de COV en el ambiente de estudio?	Objetivos Específicos Evaluar la influencia del prototipo en los niveles de COV en el ambiente.	Dependientes TCOV	validación experimental, monitor calidad de aire, cultivos bacterianos.
	¿Cuál es el impacto del prototipo en la inactivación de microorganismos presentes en el aire?	Objetivos Específicos Examinar el impacto del prototipo en la inactivación de microorganismos presentes en el aire.	Dependientes Efectos microbiológicos	Validación experimental, monitor calidad de aire, cultivos bacterianos.

Fuente: Autoría propia.

V. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1. EVALUACIÓN DEL ENTORNO HOSPITALARIO

5.1.1. LEVANTAMIENTO Y ESTUDIO DE LAS ÁREAS ASIGNADAS

El estudio se llevó a cabo en 3 áreas de la unidad de cuidados intensivos pediátrica, siendo estas el área principal, el cubículo individual #7, y el cubículo individual #8. Debido a la disponibilidad de espacio, no fue posible el realizar mediciones a lo largo de todas las rejillas de ventilación encontradas en las distintas áreas, por tanto, se aplicaron técnicas de muestreo para obtener un estimado total de los datos requeridos.

Las mediciones del caudal, temperatura ambiente, humedad relativa, entre otros valores que fueron medidos a través de un instrumento especializado se consideran mediciones directas. Por lo tanto, siguiendo las recomendaciones, se determinó el valor central de la medida haciendo uso de la fórmula del promedio (Ecuación 1) y el error estadístico se calculó por medio de la desviación estándar (Ecuación 2).

$$\langle x \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Ecuación 1 – Promedio.

Donde:

$\langle x \rangle$ = Valor central de x.

n = Número de mediciones.

x_i = Medidas individuales de x.

$$\sigma_{ex} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \langle x \rangle)^2}{n}}$$

Ecuación 2 - Desviación estándar.

Donde:

σ_{ex} = Error estadístico para x.

$\langle x \rangle$ = Valor central de x .

n = Número de mediciones.

x_i = Medidas individuales de x .

5.1.1.1. Área principal

El área principal contaba con una superficie total de 93.932 m² y un volumen de 234.83 m³. En cuanto al flujo de aire dentro de la sala, se observaron seis rejillas de retorno distribuidas en tres grupos, con tres rejillas en cada extremo del recinto. Adicionalmente, se identificaron nueve rejillas de entrada distribuidas en dos tipos, difiriendo en el tamaño (*Ilustración 28*).

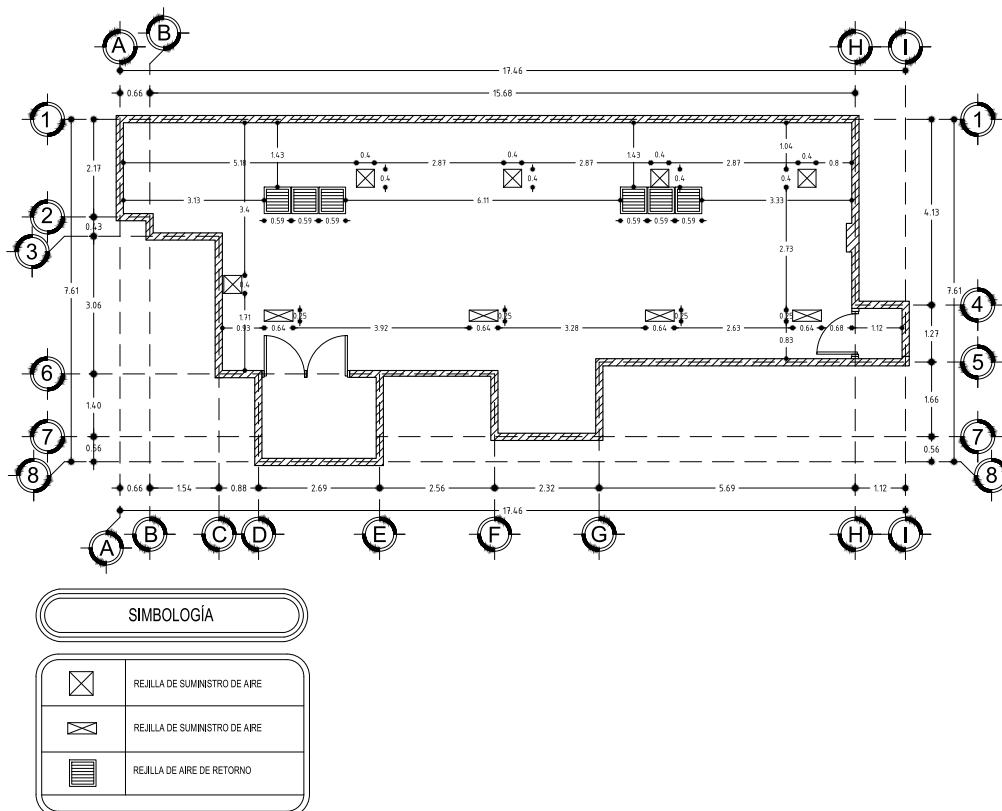


Ilustración 28 - Sala principal UCIP: Rejillas de ventilación.

Fuente: Autoría propia.

Debido al alto costo computacional que requiere la simulación de flujo de aire en relación con varios objetos se obviaron aquellos elementos más pequeños, teniendo únicamente en cuenta armarios y estaciones de enfermería (*Ilustración 29*).

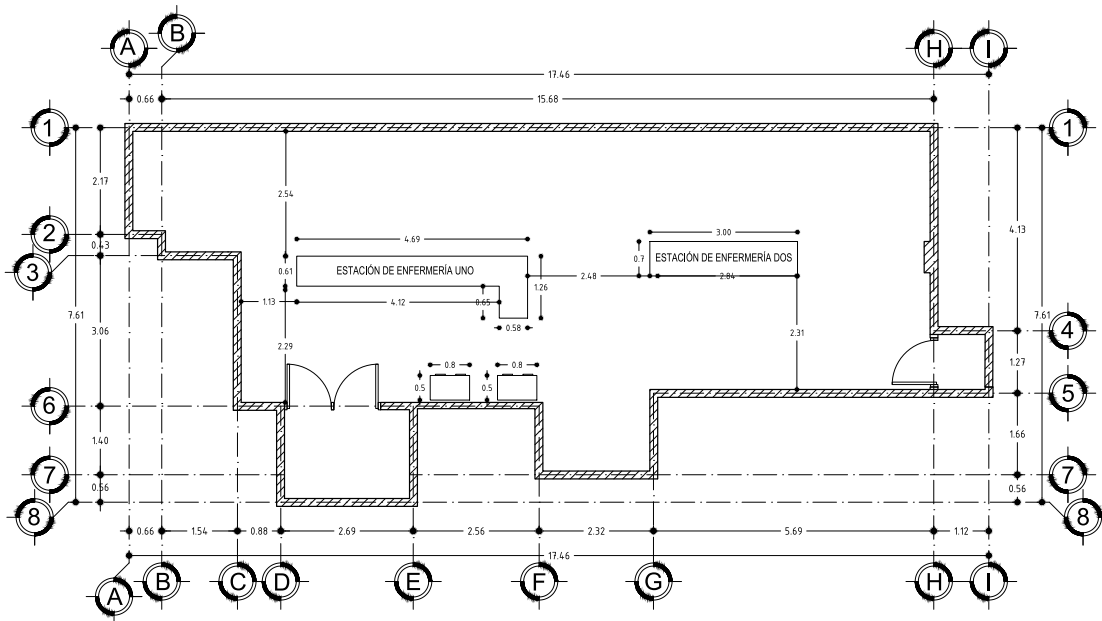


Ilustración 29 - Sala principal UCIP: Mobiliario.

Fuente: Autoría propia.

Haciendo uso de las técnicas anteriormente mencionadas se realizó el proceso adecuado para la estimación correcta de los valores de temperatura y humedad relativa de la zona. Siendo estos dos valores muy importantes para la correcta efectividad del efecto germicida producido por las lámparas UV-C (Tabla 5).

Tabla 5 - Estado ambiental de la sala principal.

Valor	Medición	Valor final
Temperatura	24.2 °C	24.62 ± 0.33 °C
	24.4 °C	
	24.9 °C	
	25.0 °C	
Humedad relativa	64 %	64 ± 0.7 %
	65 %	
	64 %	
	63 %	

Fuente: Autoría propia.

Al comparar los valores ideales reportados en la literatura con los obtenidos a través de las mediciones realizadas, se observó que la temperatura de la sala se encuentra dentro del rango

ideal. No obstante, la humedad relativa se encuentra por encima de los niveles recomendados, lo cual representó un aspecto a considerar en el rendimiento del prototipo.

Con respecto a la medición del caudal, se definió una metodología de muestreo para la medición del flujo de aire en las rejillas del sistema de ventilación, compuesto por un total de 9 unidades de suministro de aire, y 6 unidades de retorno. Debido a restricciones de acceso físico, inicialmente se realizó mediciones en dos rejillas del mismo tipo, obteniendo valores consistentes y una desviación estándar aproximada de 1.29 CFM. Con base en estos datos preliminares, se estableció un margen de error aceptable de ± 1 CFM.

Posteriormente, mediante la aplicación de un cálculo estadístico para poblaciones finitas (*Ecuación 3*), se determinó que una muestra mínima de cuatro rejillas permitiría estimar el flujo promedio con un nivel de confianza del 95 % (*Tabla 6*). En el caso de las rejillas de retorno, se registró mediciones en una rejilla, obteniéndose una desviación estándar estimada de 1.29 CFM. Considerándose este bajo nivel de variabilidad, se definió un margen de error aceptable de ± 1.13 CFM. Bajo estas condiciones, el cálculo del tamaño de la muestra mínima arrojó un valor de dos rejillas como representativo para el total (*Tabla 7*).

$$n = \frac{N \cdot z^2 \cdot s^2}{(N - 1) \cdot E^2 + z^2 \cdot s^2}$$

Ecuación 3 - Muestreo de población finita.

Donde:

N = Tamaño total de la muestra.

z = Porcentaje de confianza.

s = Desviación estándar estimada.

E = Margen de error permitido.

Esta aproximación estadística garantiza una representación estadística válida, permitiendo extrapolar los resultados al conjunto total de rejillas homogéneas en tamaño y características.

Tabla 6 - Medición de suministro de aire de la sala principal.

Lugar	Medición (CFM)	Valor final (CFM)
Suministro de Aire 1	243	244.5 ± 1.29
	244	
	245	
	246	
Suministro de Aire 2	250	248.5 ± 1.73
	249	
	246	
	249	
Suministro de Aire 3	241	241.5 ± 1.29
	243	
	242	
	240	
Suministro de Aire 4	244	244.0 ± 0.82
	245	
	243	
	244	

Fuente: Autoría propia.

Tabla 7 - Medición de rejilla de retorno de la sala principal.

Lugar	Medición (CFM)	Valor final (CFM)
Salida de Aire 1	-29	-29.5 ± 1.29
	-31	
	-30	
	-28	
Salida de Aire 2	-30	-29.8 ± 1.26
	-31	
	-30	
	-28	
Salida de Aire 3	-32	-30.3 ± 1.26
	-30	
	-29	
	-30	

Fuente: Autoría propia.

Tomando en cuenta que los datos tomados fueron suficientes para estimar el valor de las unidades restantes, se calculó el promedio y la desviación estándar global. Esto dio como resultado un valor total de 244.6 ± 2.4 CFM para cada suministro de aire restante, y -29.9 ± 1.25 para cada salida de aire restante. Por último, para la recolección de información necesaria se

realizó la medición del diámetro del ducto de forma manual, debido a la falta de accesibilidad, se tomó solamente una medición y se estandarizó esta para el resto de los ductos de ventilación (Tabla 8).

Tabla 8 - Medición de diámetro de ducto.

Lugar	Medición (m)	Valor final (m)
Suministro de Aire 1	0.316	0.316 ± 0.001
	0.316	
	0.315	
	0.317	
Rejilla de Retorno 1	0.400	0.401 ± 0.001
	0.401	
	0.400	
	0.401	

Fuente: Autoría propia.

Posterior a todas las mediciones, se calculó la velocidad del aire en cada uno de los ductos de ventilación (Ecuación 4).

$$V = \frac{Q}{A}$$

Ecuación 4 - Formula de velocidad.

Donde:

V = Velocidad del aire $\left(\frac{m}{s}\right)$

Q = Caudal $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

A = Área del ducto de ventilación (m^2)

Para llevar a cabo este proceso se tuvo que calcular el área del ducto de ventilación el cual cuenta con forma circular (Ecuación 5). También se hizo una conversión de pies cúbicos por minuto a metros cúbicos por segundo (Ecuación 6) con el fin de mantener conformidad en las variables de la ecuación de interés.

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

Ecuación 5 - Área de un círculo.

Donde:

A = Área total.

d = Diámetro del círculo.

$$1 \text{ CFM} = 0.000471947 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Ecuación 6 - Conversión de CFM a m3/s.

Al realizar estos cálculos, los valores del área del círculo y de la velocidad del aire se consideran mediciones indirectas por lo que se tuvo que emplear la fórmula de error estadístico para mediciones indirectas (Ecuación 7).

$$\sigma_F = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x} \sigma_x\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y} \sigma_y\right)^2}$$

Ecuación 7 - Error estadístico para mediciones indirectas.

Donde:

σ_F = Error total de F

$\partial F/\partial x$ = Derivada parcial de F con respecto a x

$\partial F/\partial y$ = Derivada parcial de F con respecto a y

σ_x = Error total de x

σ_y = Error total de y

Finalmente, se obtuvieron los valores de velocidad de aire (Tabla 9).

Tabla 9 - Parámetros de los ductos de ventilación.

Lugar	Caudal (m ³ /s)	Área del ducto (m ²)	Velocidad del aire (m/s)
Suministro de aire 1	0.1154 ± 0.0006	0.0784 ± 0.0005	1.472 ± 0.010
Suministro de aire 2	0.1173 ± 0.0008	0.0784 ± 0.0005	1.495 ± 0.011
Suministro de aire 3	0.1140 ± 0.0006	0.0784 ± 0.0005	1.454 ± 0.010
Suministro de aire 4	0.1152 ± 0.0004	0.0784 ± 0.0005	1.469 ± 0.008
Suministro de aire 5	0.1155 ± 0.0011	0.0784 ± 0.0005	1.473 ± 0.015
Suministro de aire 6	0.1155 ± 0.0011	0.0784 ± 0.0005	1.473 ± 0.015
Suministro de aire 7	0.1155 ± 0.0011	0.0784 ± 0.0005	1.473 ± 0.015
Suministro de aire 8	0.1155 ± 0.0011	0.0784 ± 0.0005	1.473 ± 0.015
Suministro de aire 9	0.1155 ± 0.0011	0.0784 ± 0.0005	1.473 ± 0.015

Continuación de tabla 9.

Lugar	Caudal (m ³ /s)	Área del ducto (m ²)	Velocidad del aire (m/s)
Salida de aire 1	-0.0139 ± 0.0006	0.1263 ± 0.0006	-0.110 ± 0.005
Salida de aire 2	-0.0141 ± 0.0006	0.1263 ± 0.0006	-0.111 ± 0.005
Salida de aire 3	-0.0143 ± 0.0006	0.1263 ± 0.0006	-0.113 ± 0.005
Salida de aire 4	-0.0141 ± 0.0006	0.1263 ± 0.0006	-0.112 ± 0.005
Salida de aire 5	-0.0141 ± 0.0006	0.1263 ± 0.0006	-0.112 ± 0.005
Salida de aire 6	-0.0141 ± 0.0006	0.1263 ± 0.0006	-0.112 ± 0.005

Fuente: Autoría propia.

5.1.1.2. Cubículo #7

El cubículo #7 contaba con una superficie total de 14.2376 m², y un volumen de 35.594 m³ (Ilustración 30). Dentro de este recinto solamente se logró apreciar una sola unidad de suministro de aire, a la cual se le atribuyó una velocidad de 1.473 ± 0.0015 (m/s) debido a los cálculos previamente realizados. Es importante destacar que a este recinto se le realizó una desinfección más exigente a la de las demás unidades por parte del personal de la institución debido al deceso de uno de los pacientes dentro del cubículo.

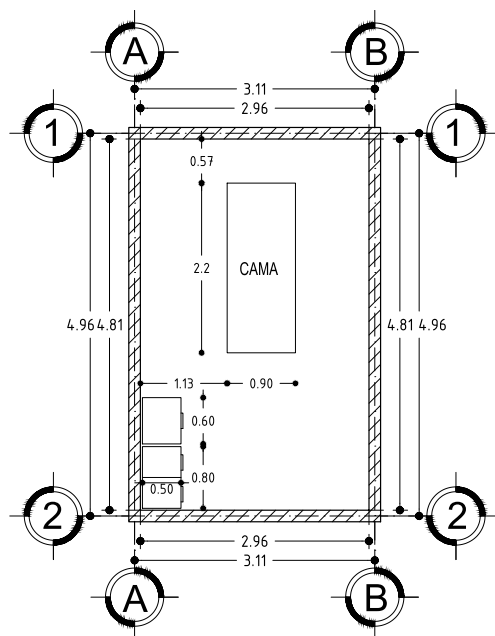


Ilustración 30 - Cubículo de UCIP.

Fuente: Autoría propia.

De igual manera, se tomaron los datos de temperatura y humedad relativa del estado ambiental del cubículo (Tabla 10).

Tabla 10 - Estado ambiental del cubículo 7.

Valor	Medición	Valor final
Temperatura	23.7 °C	23.93 ± 0.13 °C
	24.0 °C	
	24.0 °C	
	24.0 °C	
Humedad relativa	59 %	58 ± 0.7 %
	58 %	
	58 %	
	57 %	

Fuente: Autoría propia.

Similar a lo observado en el área principal, se mantiene una temperatura similar a lo ideal, sin embargo, el problema vuelve a recaer en la humedad relativa, que se mantiene por encima de lo recomendado, aunque es menor a la obtenida en la sala principal.

5.1.1.3. Cubículo #8

El cubículo #8 cuenta con las mismas dimensiones que el cubículo #7. La diferencia entre estos dos es que este espacio no fue desinfectado estrictamente previo a la colocación del prototipo, por lo que existía la posibilidad de observar diferencias entre los microorganismos encontrados en cada uno de los cubículos. Se realizaron las mediciones para conocer el estado ambiente en este espacio (Tabla 11).

Tabla 11 - Estado ambiental del cubículo 8.

Valor	Medición	Valor final
Temperatura	23.6 °C	23.63 ± 0.04 °C
	23.6 °C	
	23.6 °C	
	23.7 °C	
Humedad relativa	60 %	58 ± 1.9 %
	59 %	
	58 %	
	55 %	

Fuente: Autoría propia.

Se observó el mismo patrón que en el cubículo #7. La conclusión respecto a las tres áreas estudiadas destaco en que, aunque el prototipo no fue evaluado en condiciones ideales, esto no represento una limitación para evidencias su efectividad.

5.1.2. ANÁLISIS CFD

La mecánica de fluidos computacional permitió la identificación del comportamiento del aire dentro de la habitación, teniendo en cuenta condiciones de contorno para asegurar que los resultados de la simulación sean fidedignos al estado de la sala.

Una vez definidos los parámetros de los ductos de ventilación se procedió a integrarlos como parte de las condiciones de contorno utilizadas en la simulación (*Tabla 12*), destacando el uso de los valores obtenidos por medio de las técnicas estadísticas en las mediciones. Se dividieron todas aquellas superficies pertenecientes a muebles, mesas, escritorios, columnas y paredes en un único grupo. En cambio, las rejillas de entrada y salida corresponden a grupos individuales correspondientemente.

Tabla 12 - Condiciones de contorno.

Condición	Tipo
Suministro de aire	Velocidad de entrada
Salida de aire	Velocidad de salida
Paredes, muebles, mesas, escritorios, columnas	Superficie con condición de no deslizamiento

Fuente: Autoría propia.

Luego de identificar todas las condiciones de contorno, se precedió a representar el espacio dentro del diseñador de modelos de Ansys, manteniendo los datos originales obtenidos en el levantamiento. Debido al alto costo computacional, se estableció la separación de las áreas, tomando los cubículos como cerrados y realizando los modelados de la sala y de los cubículos por separado (*Ilustración 31*).

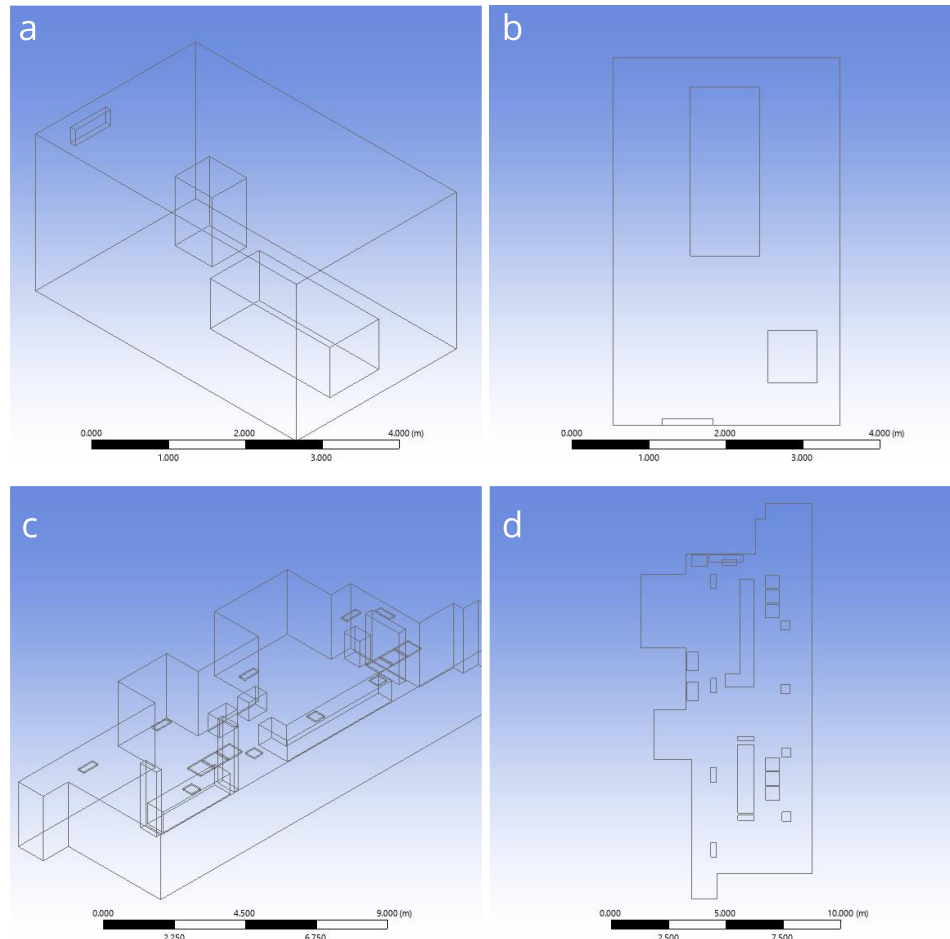


Ilustración 31 – Modelado de sala y cubículo.

Fuente: Autoría propia.

Nota*: En la ilustración se observa a) Modelado de cubículo vista isométrica. b) Modelado de cubículo vista de planta. c) Modelado de sala vista isométrica. d) Modelado de sala vista de planta.

Posteriormente, se aplicó el modelo de turbulencia estándar k-épsilon con la intención de representar fidedignamente el comportamiento del flujo de aire en la habitación. El modelo de turbulencia aplicado está dado por las ecuaciones de energía cinética turbulenta (*Ecuación 8*) y la tasa de disipación (*Ecuación 9*).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m + S_k$$

Ecuación 8 - ECT.

Donde:

k = Energía cinética turbulenta.

ε = Tasa de disipación.

ρ = Densidad del fluido.

μ = Viscosidad dinámica molecular del fluido.

μ_t = Viscosidad turbulenta.

u_i = componente de velocidad media en dirección i .

Y_m = Contribución de la dilatación fluctuante en turbulencia compresible a la tasa total de disipación.

G_k = Generación de energía cinética turbulenta debido a los gradientes de velocidad media.

G_b = Generación de energía cinética turbulenta debido a la flotación.

S_k = Término de origen del modelo.

σ_k = Número de Prandtl turbulento para k

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$$

Ecuación 9 - Tasa de Disipación.

Donde:

k = Energía cinética turbulenta.

ε = Tasa de disipación.

ρ = Densidad del fluido.

μ = Viscosidad dinámica molecular del fluido.

μ_t = Viscosidad turbulenta.

u_i = Componente de velocidad media en dirección i .

G_k = Generación de energía cinética turbulenta debido a los gradientes de velocidad media.

G_b = Generación de energía cinética turbulenta debido a la flotación.

$C_{1\varepsilon}$ = Constante.

$C_{2\varepsilon}$ = Constante.

$C_{3\varepsilon}$ = constante.

S_ε = Término de origen del modelo.

σ_ε = Número de Prandtl turbulento para ε .

La simulación permitió comprender el comportamiento del flujo de aire dentro de la habitación. Mediante la aplicación de las condiciones de contorno definidas previamente se identificaron el comportamiento de k y ε (Ecuación 7, 8) lo que daría pie a la selección de las zonas que serían de mayor provecho para la colocación del prototipo (Ilustración 32).

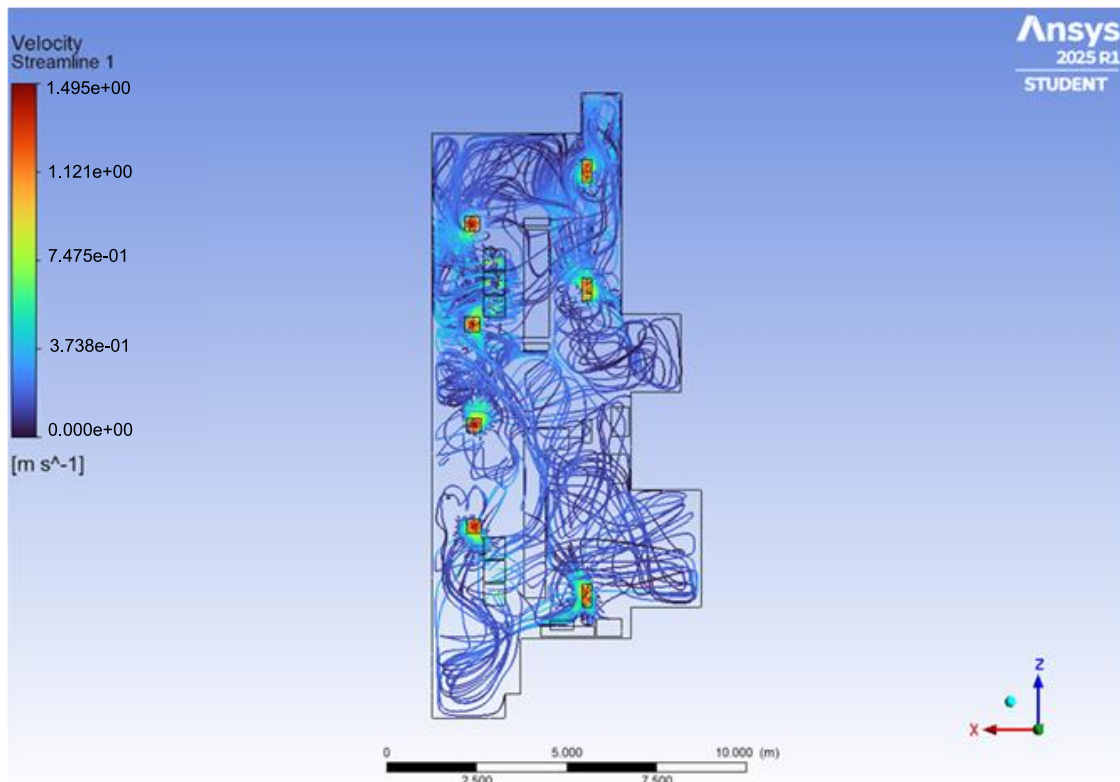


Ilustración 32 - flujo de aire en la sala.

Fuente: Autoría propia.

Se repitió el proceso de simulación con los cubículos, estos contaban con las mismas medidas, por tanto, únicamente se realizó una simulación (Ilustración 33).

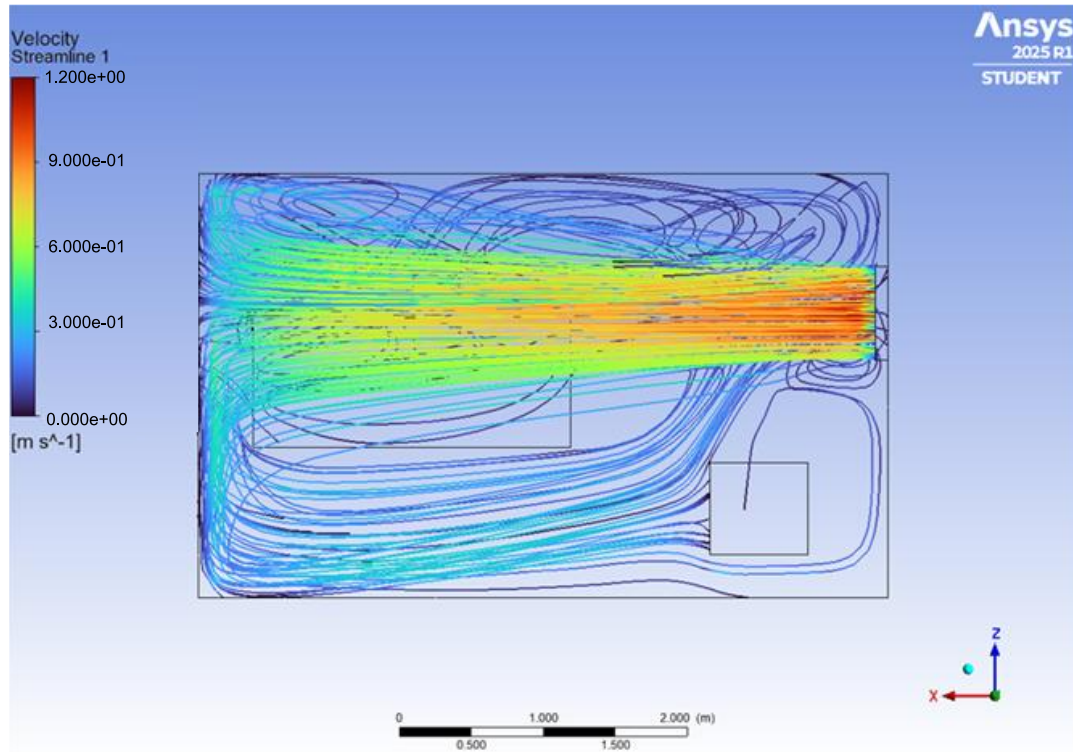


Ilustración 33 - flujo de aire en cubículo.

Fuente: Autoría propia.

Para la selección del espacio de colocación además de la predominancia del flujo de aire, también se tomó en cuenta la disponibilidad de espacio que podría existir entre el prototipo y el personal de atención médica para evitar la exposición a la radiación y evitar interrumpir las labores diarias del personal. En el caso de los cubículos, únicamente se tuvo en cuenta la predominancia del flujo de aire, ya que estos espacios se encontraban inhabilitados temporalmente.

5.2. VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO

5.2.1. DISEÑO DEL PROTOTIPO

5.2.1.1. Modelado y diseño físico

Se diseñó un prototipo funcional con dimensiones de 12 x 14 x 61 cm, modelado a partir de un prisma rectangular alargado cuya sección transversal corresponde a una geometría modificada mediante un biselado triangular invertido que recorre longitudinalmente toda la base del dispositivo (*Ilustración 34*). Esta configuración geométrica fue seleccionada con el objetivo de

optimizar el flujo interno y externo del sistema, así como aportar rigidez estructural sin comprometer la funcionalidad.

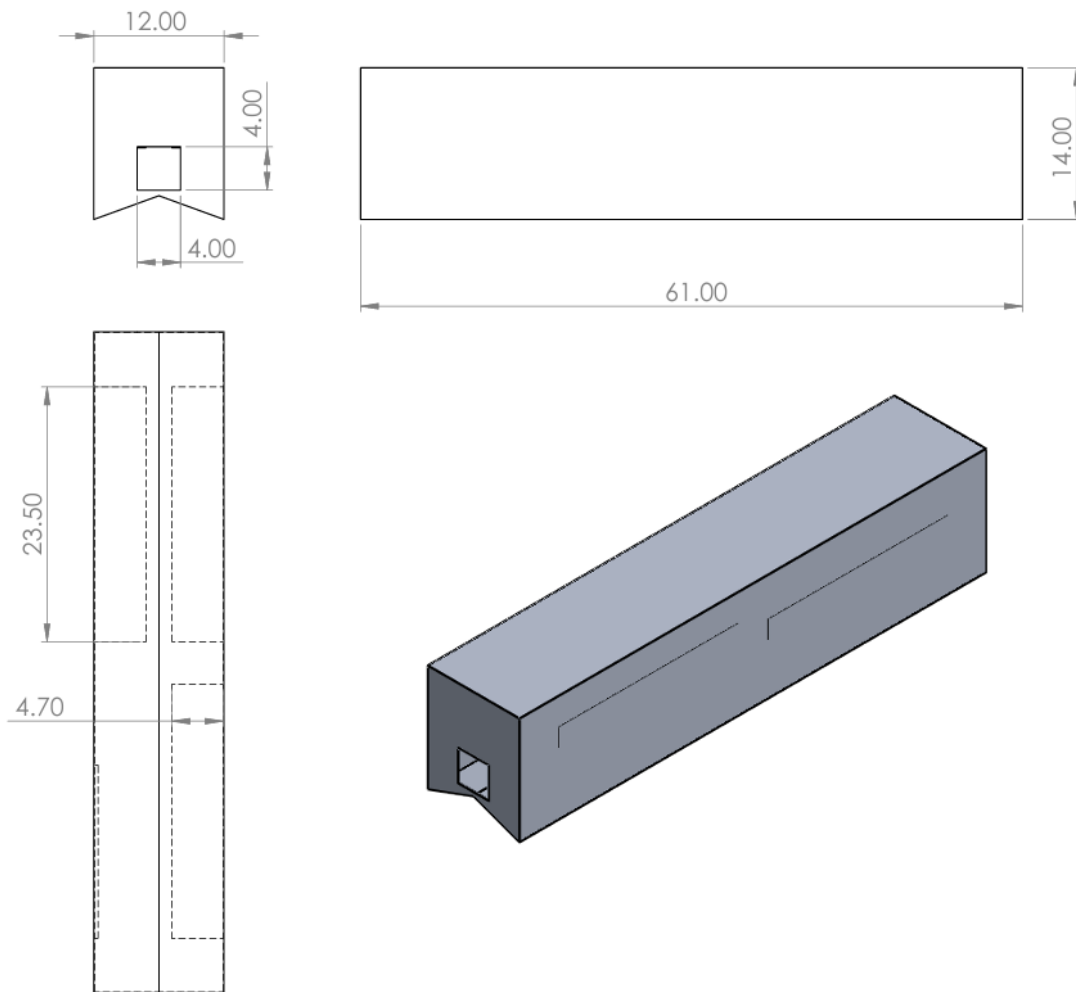


Ilustración 34 - Modelado del prototipo.

Fuente: Autoría propia.

El dispositivo incorpora un sistema de ventilación activa basado en la instalación de dos ventiladores axiales de 40 x 40 mm operando a 5V, cada uno con capacidad de flujo de 6 CFM. La disposición de estos ventiladores sigue una configuración de flujo lineal: uno ubicado en la cara de entrada para inducir el aire al sistema, y el segundo en la cara opuesta, con función de extracción. Esta orientación asegura una circulación forzada continua a través del canal interno del dispositivo.

Internamente, se integran tres lámparas emisoras de radiación ultravioleta. Dos de ellas, enfrentadas en paralelo, corresponden a la banda espectral UV-C, mientras que una tercera, dispuesta de forma independiente en su cara lateral, emite en el espectro UV-A. Complementariamente, se incluyó una placa delgada de acrílico tratada superficialmente con dióxido de titanio (TiO_2), ubicada de forma interna en la sección frente a la lámpara UV-A. Dicha placa funciona como superficie catalítica para procesos fotocatalíticos, particularmente útiles en la descomposición de compuestos orgánicos volátiles (COVs) y agentes microbiológicos en suspensión.

Esta configuración permite una exposición homogénea a distintas longitudes de onda, lo que contribuye a potenciar la acción germicida y favorecer reacciones fotocatalíticas (*Ilustración 35*).

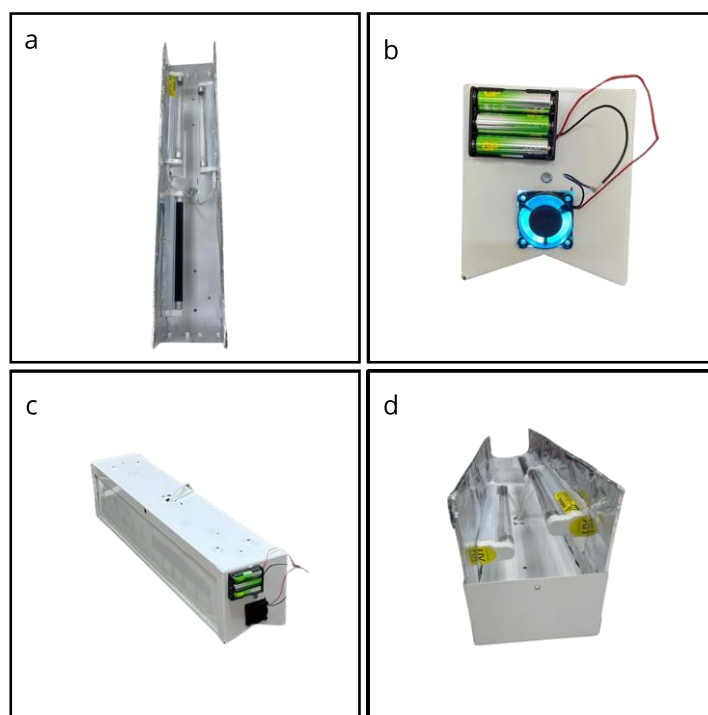


Ilustración 35 - Prototipo.

Fuente: Autoría propia.

Nota*: En la ilustración se observa a) Posición de las lámparas (vista superior del prototipo sin la cubierta superior). b) Vista frontal. Del prototipo c) vista isométrica del prototipo. d) Configuración de las lámparas.

Uno de los aspectos fundamentales considerados en el diseño del prototipo fue la implementación de medidas que garantizaran la bioseguridad del personal hospitalario y de los pacientes. Para minimizar la exposición a radiación ultravioleta dispersa, las paredes laterales del prototipo fueron recubiertas internamente con una capa de aluminio, la cual tuvo doble función: en primer lugar, maximizó la eficiencia del prototipo al dirigir la radiación hacia el flujo de aire deseado, en segundo lugar, actuó como una barrera de contención que reduce la radiación que pudiera escaparse hacia el exterior.

Esta decisión fue tomada con base en recomendaciones de seguridad para el manejo de radiación UV en espacios cerrados, buscando mitigar cualquier riesgo de exposición dérmica u ocular para el personal que interactúa en las cercanías del prototipo. Además, el diseño estructural consideró el confinamiento de manera que no exista contacto directo con las lámparas ni con la radiación emitida. Estas medidas hicieron que el sistema no solo sea eficiente en términos de desinfección, sino también seguro para su operación en entornos clínicos.

Finalmente, el diseño del prototipo desarrollado tiene como propósito principal funcionar en cualquier área. Si bien el prototipo fue validado específicamente en el área de unidad de cuidados intensivos (UCIP), y dos cubículos dentro de este, su diseño modular y portátil permite su implementación en diversos espacios hospitalarios, como quirófanos, salas de espera, cubículos de atención y otros lugares con circulación constante de personal médico y pacientes.

La elección de UCIP como sitio de prueba obedeció a criterios técnicos, específicamente al hecho de que en dicha zona se registró un flujo adecuado de aire, y un diseño de ventilación en base a ductos, lo cual favoreció la evaluación del desempeño del prototipo en condiciones reales de operación. Sin embargo, su diseño adaptable permite instalarlo en otros entornos sin comprometer su eficacia, ya que no depende de una estructura fija ni requiere condiciones particulares para funcionar adecuadamente.

Esto ofrece una gran ventaja para su uso en diferentes contextos, permitiendo que el prototipo se adapte a las diferentes configuraciones de flujo de aire según las necesidades específicas del área donde se desee implementar.

5.2.2. ANÁLISIS DE FUNCIONALIDAD

5.2.2.1. *Análisis de control*

Se elaboró un diagrama de bloques con el objetivo de representar de manera visual y secuencial el funcionamiento interno del prototipo, así como las distintas etapas por las que atraviesa el flujo de aire hasta su completar su proceso de desinfección y limpieza (*Ilustración 36*). El ingreso del aire ambiente al sistema se realiza mediante un ventilador axial alimentado con corriente directa de 5V.

La primera etapa del tratamiento corresponde a la inactivación microbiana, la cual se lleva a cabo a través de la exposición del aire a dos lámparas UV-C, cada una instalada en las caras laterales del prototipo, enfrentándose entre sí.

En una segunda etapa, el flujo de aire atraviesa un módulo donde ocurre el proceso de fotocatalisis, inducido por la irradiación de una lámpara UV-A sobre una superficie recubierta con dióxido de titanio. Este fenómeno permite la degradación de compuestos orgánicos volátiles y otros contaminantes gaseosos presentes en el aire en tratamiento.

Finalmente, el aire desinfectado y limpiado es expulsado hacia el exterior mediante un segundo ventilador, instalado en el extremo opuesto del primer ventilador.

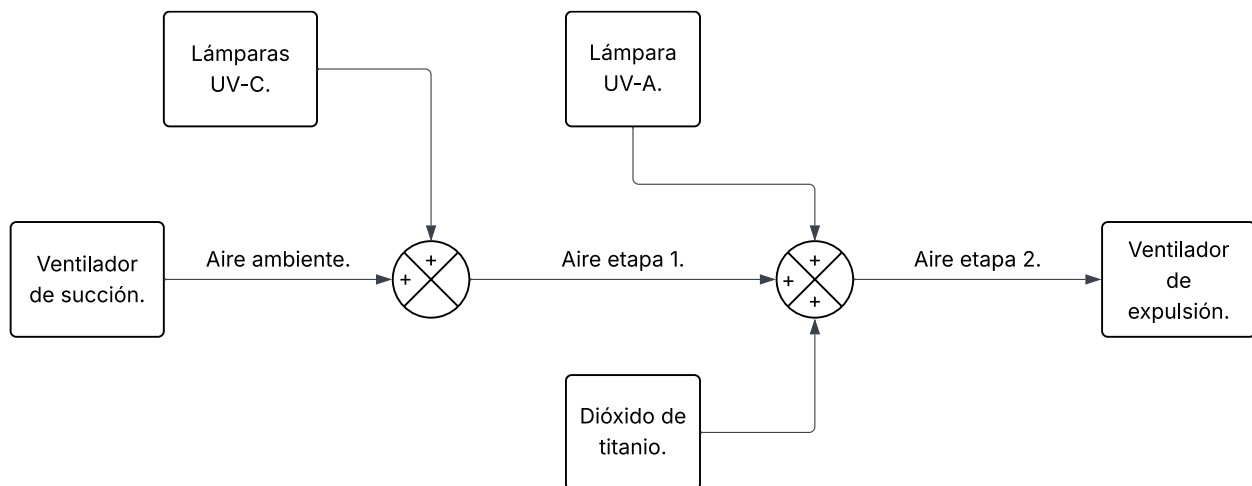


Ilustración 36 - Diagrama de bloques del prototipo.

Fuente: Autoría propia.

5.2.2.2. Análisis de flujo

Se llevo a cabo una simulación computacional de dinámica de fluidos con el fin de observar el comportamiento del flujo dentro del prototipo. Para realizar este proceso se aplicó sobre el modelado mostrado previamente una serie de configuraciones de frontera, entrada y salida de volumen, además de la precisión de la malla (*Ilustración 37*), entre otras configuraciones necesarias para llevar a cabo la simulación. Esta simulación permitió identificar regiones de interés, tales como acumulaciones de velocidad, zonas de estancamientos o posibles irregularidades en el flujo.

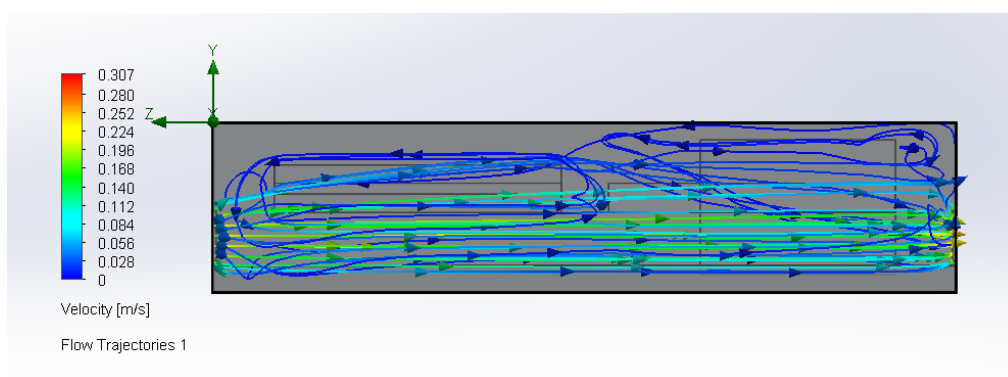


Ilustración 37 - Simulación de flujo en el prototipo.

Fuente: Autoría propia.

Esto dio como resultado flujos con distintas velocidades dentro del prototipo, apreciadas en la escala cromática la cual comprende un rango entre 0 y 0.307 m/s siendo las zonas con mayor velocidad representadas en rojo y las de menor en azul (*Tabla 13*).

Tabla 13 - Velocidades de flujo en el prototipo.

Velocidad (m/s)
0.028
0.056
0.084
0.112
0.140
0.168
0.196
0.224
0.252
0.280

Fuente: Autoría propia.

Como complemento al proceso de simulación, también se realizaron un conjunto de visualizaciones generadas a partir del análisis computacional, con el objetivo de interpretar por medio de un mapa de calor la velocidad existente en todo el modelado del prototipo (Ilustración 38). La representación mediante contornos de velocidad facilitó la evaluación de los distintos tipos de velocidades encontradas a través del ducto del prototipo.

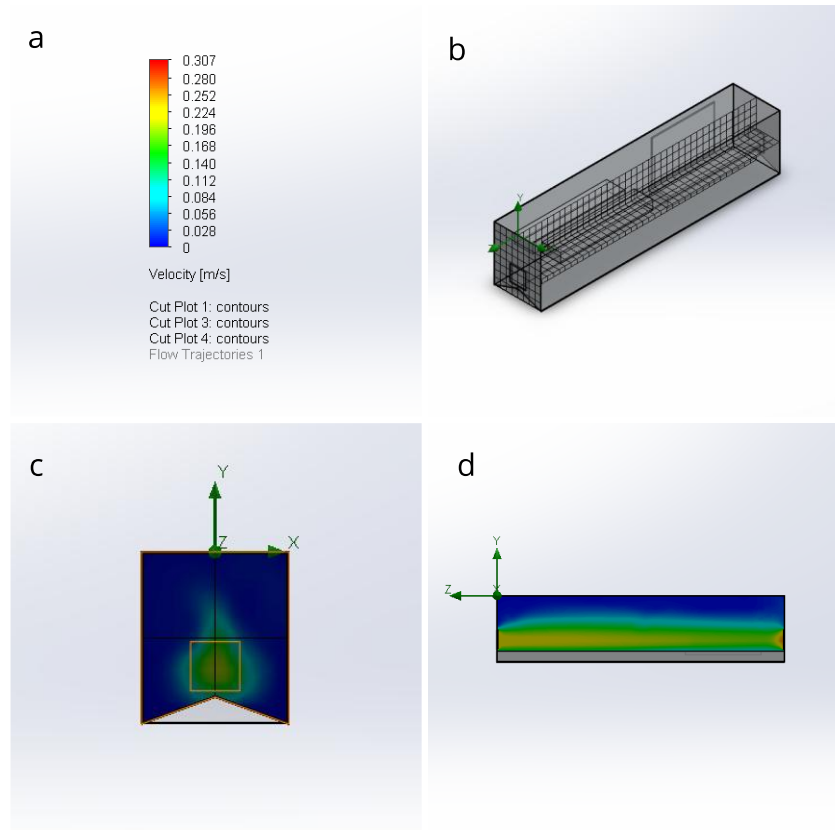


Ilustración 38 - Simulación CFD en el prototipo.

Fuente: Autoría propia.

Nota*: En la ilustración se observa a) Escala cromática de velocidades. b) Malla estructurada del modelado. c) Vista frontal de la simulación. d) Vista lateral de la simulación.

De esta manera se apreció una mayor velocidad de flujo en la zona inferior del prototipo, siendo esto influenciado principalmente por el lugar de colocación de las ventiladoras. Teniendo su pico de velocidad justamente en el extremo opuesto a la entrada del aire exterior. Esta variabilidad influenció en el cálculo de distintas dosis de radiación, cada una de estas dependiendo de la velocidad en las distintas zonas del prototipo.

5.2.2.3. Análisis eléctrico

El prototipo final contó con tres lámparas en total, dos de ellas UV-C y una UV-A. Cada una de las lámparas utilizó su propia conexión AC, lo que puede permitir realizar una sustitución rápida de lámpara en caso de que suceda un evento extraordinario (ilustración 39).

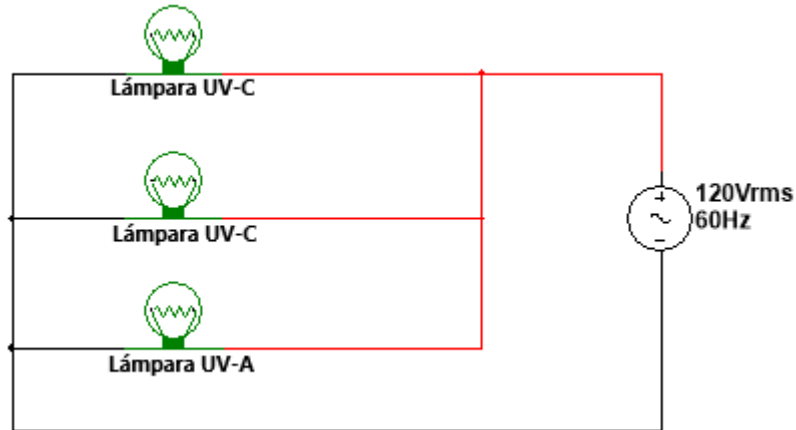


Ilustración 39 - Diagrama eléctrico de las lámparas.

Fuente: Autoría propia.

Para la ventilación del prototipo se utilizaron dos ventiladores de 5V, cada uno de ellos contó con baterías de 1.5V conectadas en serie (ilustración 40).

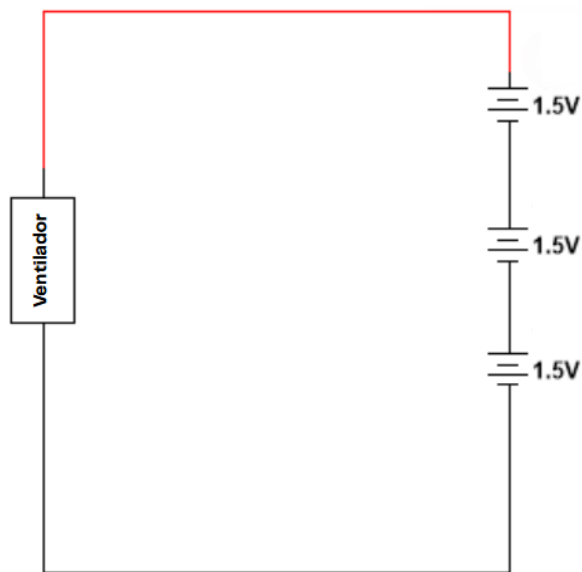


Ilustración 40 - Diagrama eléctrico de los ventiladores.

Fuente: Autoría propia.

5.2.3. VALIDACIÓN MATEMÁTICA

5.2.2.1. Validación del efecto germicida

La validación del efecto germicida consistió en el cálculo matemático de la dosis de radiación UV generada por las lámparas a instalarse (Ecuación 10), el objetivo fue la comparación del valor obtenido con lo establecido por la literatura para así evaluar la capacidad de inactivación de microorganismos por medio de la radiación.

$$Dosis \left(\frac{mJ}{cm^2} \right) = Irradiancia \left(\frac{mW}{cm^2} \right) \times Tiempo \text{ de exposición } (s)$$

Ecuación 10 - Dosis de radiación UV.

De igual manera, previo al cálculo de la dosis es necesario conocer los valores de la irradiancia de la lámpara (Ecuación 11) y del tiempo de exposición de los microorganismos ante esta misma (Ecuación 12). Cabe destacar que para todos los cálculos se tomaron en cuenta las técnicas estadísticas de propagación de errores para obtener valores más cercanos a la realidad.

$$Irradiancia = \frac{Potencia \text{ total } (W)}{Área \text{ cubierta } (cm^2)}$$

Ecuación 11 - Irradiancia.

$$Tiempo \text{ de exposición} = \frac{Longitud \text{ del tramo irradiado } (cm)}{Velocidad \text{ del aire } (cm/s)}$$

Ecuación 12 - Tiempo de exposición.

Las características técnicas de las lámparas con las cuales se realizaron los cálculos fueron extraídas directamente desde el sitio donde se compraron (Tabla 14).

Tabla 14 - Características técnicas de las lámparas.

	Lámpara tipo A	Lámpara tipo B
Tipo de radiación	UV-C	UV-A
Longitud de onda	253.7 nm	365 nm
Potencia	6 W	6 W
Longitud de lámpara	23.50 cm	23.50 cm
Diámetro del bombillo	3.5 cm	3.5 cm
Cantidad de lámparas	2 lámparas	1 lámpara
Irradiancia	257,5 μ W/cm ² a una distancia de 10 pulgadas.	No especificado.

Fuente: COOSPIDER UV (revisado en 2025); Hypool (revisado en 2025).

Las lámparas UV-C se instalaron paralelamente para maximizar la dosis total de radiación mediante la suma de ambas emisiones. Entre la lámpara y la pared opuesta existe una distancia total de 7.30 ± 0.08 cm, debido a la base existe una distancia de 1.2 ± 0.08 cm con la pared más cercana (Tabla 15). Tomando en cuenta que dichas lámparas entregan una irradiancia mínima de $257,5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ a una distancia de 10 pulgadas (25.4 cm), se aplicó la ley del inverso cuadrado (Ecuación 13) la cual es funcional para conocer la irradiancia a distintas distancias de la emisión de luz ultravioleta siempre y cuando sean valores más altos que el diámetro del bombillo.

Tabla 15 - Distancia de la lámpara hacia la pared.

Valor	Medición (cm)	Valor final (cm)
Distancia pared opuesta	7.2	7.3 ± 0.08
	7.3	
	7.3	
	7.4	
Distancia pared cercana	1.1	1.2 ± 0.08
	1.2	
	1.3	
	1.2	

Fuente: Autoría propia.

$$I_2 = I_1 \times \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2$$

Ecuación 13 - Ley del inverso cuadrado.

Donde:

I_2 = Irradiancia 2.

I_1 = Irradiancia 1.

d_1 = Distancia 1.

d_2 = Distancia 2.

Para el cálculo del tiempo de exposición se usaron como referencia los valores de longitud de la lámpara (0.235 metros) y las distintas velocidades del aire dentro del estipulados en la sección anterior lo cual influencia el tiempo de exposición (Se tomaron solamente las velocidades con mayor presencia en la simulación). De esta manera se logró calcular la irradiancia por cada lámpara a distintas distancias, y la dosis de radiación a distintos tiempos de exposición. (Tabla 16).

Tabla 16 - Dosis de radiación UV-C por lámpara.

Velocidad (m/s)	Distancia (cm)	Irradiancia (mW/cm²)	Tiempo de exposición (s)	Dosis (mJ/cm²)
0.028	5	6.645	8.393	55.771
	6	4.615		38.734
	7	3.390		28.452
	7.2	3.205		26.899
0.084	5	6.645	2.798	19.593
	6	4.615		12.913
	7	3.390		9.485
	7.2	3.205		8.968
0.168	5	6.645	1.399	9.296
	6	4.615		6.456
	7	3.390		4.743
	7.2	3.205		4.484
0.224	5	6.645	1.049	6.971
	6	4.615		4.841
	7	3.390		3.556
	7.2	3.205		3.362

Fuente: Autoría propia.

Tomando en cuenta que la posición de las lámparas permite una doble exposición a los valores de irradiancia, se puede considerar que las radiaciones emitidas serán mayores a la calculada ya que solo se calculó la dosis por lámpara. Los resultados demostraron que se pueden obtener valores de radiación relativamente altos (55.771 mJ/cm²) pero a una velocidad de flujo baja (0.028 m/s), sin embargo, la mayor concentración de flujo se encuentra entre las velocidades de 0.168 m/s y 0.224 m/s por lo que se deben considerar como dosis de radiación reales los valores entre 3.362 mJ/cm² y 9.296 mJ/cm² lo que se encuentra dentro de los valores aceptables para la eliminación de microorganismos aéreos según la literatura (1 – 10 mJ/cm²).

En el caso de la lámpara UV-A, aunque su aplicación no es específicamente la de aprovechar su efecto germicida, no se debe desestimar la dosis de radiación generada. En este caso se usaron como velocidades las mismas observadas para el cálculo de dosis UV-C y una potencia efectiva del 30%. (Tabla 17).

Tabla 17 - Dosis de radiación UV-A.

Irradiancia (mW/cm²)	Tiempo de exposición (s)	Dosis (mJ/cm²)
13.12	8.393	111.795
13.12	2.798	37.269
13.12	1.399	18.635
13.12	1.049	13.973

Fuente: Autoría propia.

El cálculo presenta una dosis mayor a la producida por una sola lámpara UV-C. Pero insuficiente para realizar algún efecto germicida por si sola.

5.2.2.1. Validación de la activación del TiO₂

Se realizó una validación teórica basada en el cálculo de la energía del fotón emitido por la lámpara UV-A utilizada (*Ecuación 14*). Posterior, se convirtió la energía a electronvoltio (*Ecuación 15*) con el fin de obtener un valor que se podría comparar con la banda prohibida que tiene como propiedad el dióxido de titanio puro.

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

Ecuación 14 - Energía de un fotón.

Donde:

E = Energía del fotón.

h = Constante de Planck.

c = Velocidad de la luz.

λ = Longitud de onda.

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Ecuación 15 - Conversión energía a electronvoltios.

Se obtuvo como resultado 3.4 eV, lo que supera la banda prohibida de 3.2 eV común en el dióxido de titanio puro. Esto permite concluir que, al menos teóricamente, la lámpara es capaz de activar el recubrimiento fotocatalítico.

5.3. RENDIMIENTO DEL PROTOTIPO

Se realizaron múltiples mediciones (cuatro) por cada escenario experimental y por cada variable de interés medida, tales como TCOV, HCHO y CO₂. Con ayuda del monitor especializado de calidad del aire (*Anexos 1 – 9*), posterior a dicha acción se llevó a cabo el análisis estadístico de los datos recogidos.

5.3.1. MONITOREO DE PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AIRE

5.3.1.1. *Análisis por sala*

Se realizó una representación comparativa de los datos obtenidos posteriormente a la aplicación del protocolo de muestreo para compuestos orgánicos volátiles, dióxido de carbono y HCHO. Se implementó una sección dedicada a la estadística descriptiva de los datos por cada una de las tres salas estudiadas.

Se tomaron en cuenta tres escenarios experimentales: sin intervención, intervención UV-C y la intervención UV-C+ fotocatalisis. A pesar de que se analizaron 3 variables en total (*Anexos 10 – 15*), en esta sección únicamente se verán reflejados los resultados de TCOV.

Debido a la existencia de distintos grupos de interés, se optó por representar los datos de forma visual mediante graficas de caja (*Anexos 16 – 21*). Al aplicar la metodología experimental en la sala de UCIP (*Ilustración 41*) se obtuvo que al no tener intervención de ningún tipo los valores de concentración media de TCOV se mantuvieron más altos ($\bar{x} = 0.71850 \text{ mg/m}^3$), por el contrario, se observó una disminución considerable con la intervención UV-C ($\bar{x} = 0.57800 \text{ mg/m}^3$) teniendo un 19.55% de reducción, sin embargo, los COV se ven disminuidos en una mayor medida cuando se aplicó UV-C+ fotocatalisis, obteniendo ($\bar{x} = 0.09925 \text{ mg/m}^3$) que es equivalente a un 86.19% de reducción de TCOV.

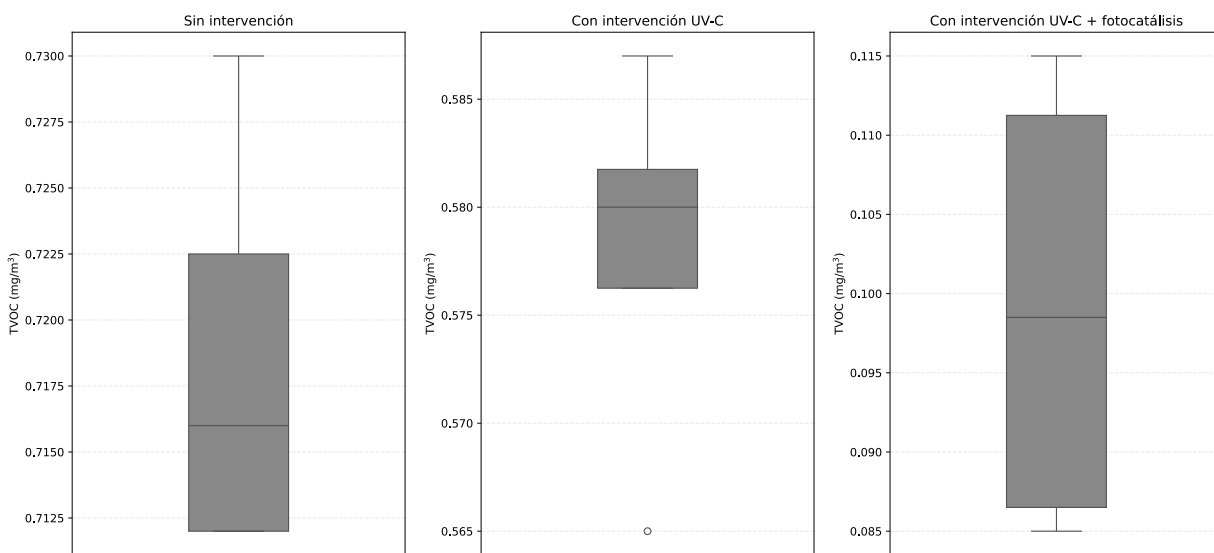


Ilustración 41 – Diagrama de caja (Presencia de TCOV en UCIP).

Fuente: Autoría propia.

La tendencia se mantiene en la evaluación de la mediana y desviación estándar de los datos obtenidos (*tabla 18*). Además, en base al comportamiento de la distribución de los datos se observó un comportamiento de asimetría positiva en el escenario experimental sin intervención (1.04), esto sugiere que existen valores altos más dispersos.

Por otro lado, se obtuvo una asimetría negativa (-1.21) en la intervención UV-C, demostrando que predominan por debajo de la media, lo que conlleva a un contraste en comparación con la intervención UVC + fotocátalisis, obteniendo una curva casi simétrica (0.08), demostrando un sesgo hacia la izquierda de la media en los resultados.

Además, el comportamiento del escenario experimental sin intervención demostró ser casi mesocúrtica (-0.32), lo que sugiere una distribución más normalizada con menos dispersión en los datos, por otra parte, se ratifica que la intervención UV-C tiene un comportamiento inestable en ciertos puntos, siendo leptocúrtica (2.34). se obtuvo que la intervención UV-C + fotocátalisis es platicúrtica (-5.40) lo que implica una distribución más plana de las mediciones.

Después de lo anterior expuesto se procedió a analizar la varianza y coeficiente de variación de los datos obtenidos en el escenario experimental sin intervención ($s^2 = 0.00007$, CV

= 1.19%), con intervención UV-C ($s^2 = 0.00009$, CV = 1.60%), y con intervención UV-C+ fotocatalisis ($s^2 = 0.00024$, CV = 15.57%). Los datos reflejan un incremento de varianza en cada una de las intervenciones, lo que indica que la intervención UV-C + fotocatalisis obtiene mayores fluctuaciones en los datos obtenidos. Sin embargo, el incremento más notorio se da en el coeficiente de variación, a pesar de que se mantiene la tendencia de incremento, la intervención UV-C + fotocatalisis obtiene un porcentaje alejado de las intervenciones anteriores, lo que representa una mayor variabilidad relativa, dando paso a fluctuaciones en las mediciones.

Tabla 18 – Estadística descriptiva UCIP (TCOV).

Tipo de escenario experimental	N	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Varianza	coefVar	Mediana	Asimetría	Curtosis
Sin intervención	4	0.71850	0.00427	0.00854	0.00007	1.19	0.71600	1.04	-0.32
Intervención UV-C	4	0.57800	0.00464	0.00927	0.00009	1.60	0.58000	-1,21	2.34
Intervención UV-C+ fotocatalisis	4	0.09925	0.00773	0.01546	0.00024	15.57	0.09850	0.08	-5.40

Fuente: Autoría propia.

En orden de cumplir con la metodología del estudio, se aplicaron los mismos elementos gráficos de estadística descriptiva en el cubículo 7 (*Ilustración 42*).

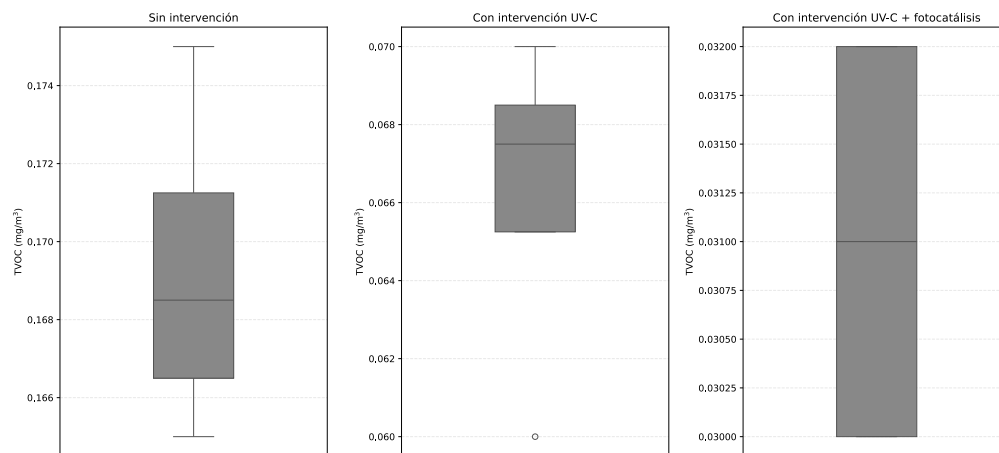


Ilustración 42 – Diagrama de caja (Presencia de TCOV en el cubículo 7).

Fuente: Autoría propia.

Los datos obtenidos demostraron que existe una tendencia consistente entre los distintos escenarios experimentales entre la sala UCIP y el cubículo 7, a pesar de existir un cambio notorio en las mediciones obtenidas. Siendo la media del escenario experimental sin intervención la más alta ($\bar{x} = 0.16925 \text{ mg/m}^3$), seguida de la intervención UV-C ($\bar{x} = 0.06625 \text{ mg/m}^3$), la cual equivale a un 60.86% de reducción, por último, la intervención UV-C + fotocátalisis ($\bar{x} = 0.031000 \text{ mg/m}^3$) es equivalente a un 81.68% de reducción de TCOV. Asimismo, la tendencia se mantuvo en la mediana y desviación estándar (tabla 19).

Tabla 19 - Estadística descriptiva cubículo 7 (TCOV).

Tipo de escenario experimental	N	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Varianza	coefVar	Mediana	Asimetría	Curtosis
Sin intervención	4	0.16925	0.00217	0.00435	0.00002	2.57	0.16850	0.83	-0.04
Intervención UV-C	4	0.06625	0.00217	0.00435	0.00002	6.57	0.06750	-1.50	2.65
Intervención UV-C+ fotocátalisis	4	0.031000	0.00057	0.001155	0.00000	3.72	0.031000	0.00	-6.00

Fuente: Autoría propia.

La distribución de los datos permitió observar de igual forma una asimetría positiva en el escenario experimental sin intervención (0.83), lo que sugiere que los valores de TVOC se mantienen muy similares a la sala UCIP, pero con menores picos de concentración por encima de la media. Por otra parte, se observó una asimetría negativa (-1.50) lo que refuerza el planteamiento de que la UV-C obtiene una mayor concentración de datos por debajo de la media. Los resultados reflejaron una curva simétrica en el escenario experimental UV-C+ fotocátalisis (0.00) lo que indica que no existió sesgo en la distribución. Los datos nuevamente se asemejan bastante a los obtenidos en la sala UCIP, lo que podría ser un indicio del correcto funcionamiento del prototipo.

Además, la intervención UV-C+ fotocátalisis se mantiene como platicúrtica (-1.65), en el caso del escenario experimental sin intervención pasó a ser leptocúrtica (3.17), lo que refleja una mayor concentración de datos alrededor de la media, de igual manera la intervención UV-C con (1.53).

Por último, los cálculos de varianza y coeficiente de variación reflejaron un cambio respecto a la sala anterior, pues no se mantuvo la tendencia de aumento de varianza. Se obtuvieron valores en la intervención UV-C + fotocátalisis que demuestran una mayor estabilidad ($s^2 = 0.000001$, $CV = 3.72\%$), asimismo, los datos obtenidos en los demás escenarios experimentales reflejan una mejor estabilidad, tanto como en la intervención UVC ($s^2 = 0.00002$, $CV = 6.57\%$), como en el escenario sin intervención ($s^2 = 0.00002$, $CV = 2.57\%$), mostrando en general una mayor estabilidad.

Finalmente, se obtuvieron los resultados estadísticos descriptivos del cubículo 8. Nuevamente, el comportamiento de los datos se refleja de forma visual (*Ilustración 43*).

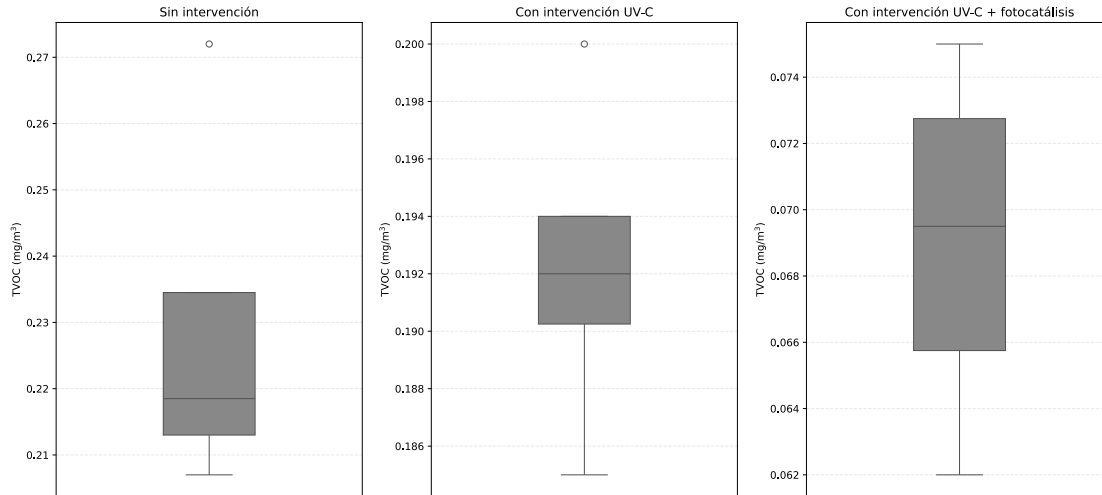


Ilustración 43 – Diagrama de caja (Presencia de TCOV en el cubículo 8).

Fuente: Autoría propia.

Se observó que la tendencia en cuanto a la media se mantuvo constante, siendo los resultados sin intervención los más altos ($\bar{x} = 0.2290 \text{ mg/m}^3$), seguido de la intervención UV-C ($\bar{x} = 0.19225 \text{ mg/m}^3$) equivalente a 16.05% de reducción y por último la intervención UV-C+ fotocátalisis ($\bar{x} = 0.06900 \text{ mg/m}^3$) equivalente a 69.87% de reducción de TCOV. Los datos obtenidos son concordantes con los de las salas previamente analizadas, demostrando una disminución significativa de los TVOC con la aplicación del prototipo. De igual manera, esta tendencia se mantuvo nuevamente con la mediana y la desviación estándar (*tabla 20*).

Tabla 20 - Estadística descriptiva cubículo 8 (TCOV).

Tipo de escenario experimental	N	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Varianza	coefVar	Mediana	Asimetría	Curtosis
Sin intervención	4	0.2290	0.0147	0.0293	0.0009	12.80	0.2185	1.74	3.17
Intervención UV-C	4	0.19225	0.00307	0.00613	0.00004	3.19	0.19200	0.24	1.53
Intervención UV-C+ fotocatalisis	4	0.06900	0.00286	0.00572	0.00003	8.28	0.06950	-0.39	-1.65

Fuente: Autoría propia.

La curva de asimetría se mantuvo positiva en el escenario experimental sin intervención (1.74), lo que indica una distribución sesgada hacia la izquierda. Además, existe un cambio más que notorio en la intervención UV-C (0.24) pasando a ser positiva y más cercana a cero, lo que indica un menor sesgo hacia un lado de la distribución. En cambio, la intervención UV-C+ fotocatalisis demostró tener una distribución sesgada a la derecha (-0.39) en comparación con la sala anterior. En el análisis de la curtosis también se observan cambios, aunque no muy significativos ya que se mantiene la tendencia de las demás salas.

A pesar de existir un aumento en la varianza y el coeficiente de variación, se obtuvieron resultados esperables debido al análisis de las salas anteriores, demostrando que la intervención UVC+ fotocatalisis además de tener altos índices de reducción de TCOV, lo hace de forma aceptablemente estable.

5.3.1.2. Análisis comparativo

Con el objetivo de evaluar de manera cuantitativa la eficacia de las distintas fases del prototipo, se diseñó un esquema comparativo basado en la reducción de compuestos orgánicos volátiles, utilizando como indicador el porcentaje de concentración relativa respecto a una condición del ambiente estudiado sin ningún tipo de intervención (*Ilustración 44*).

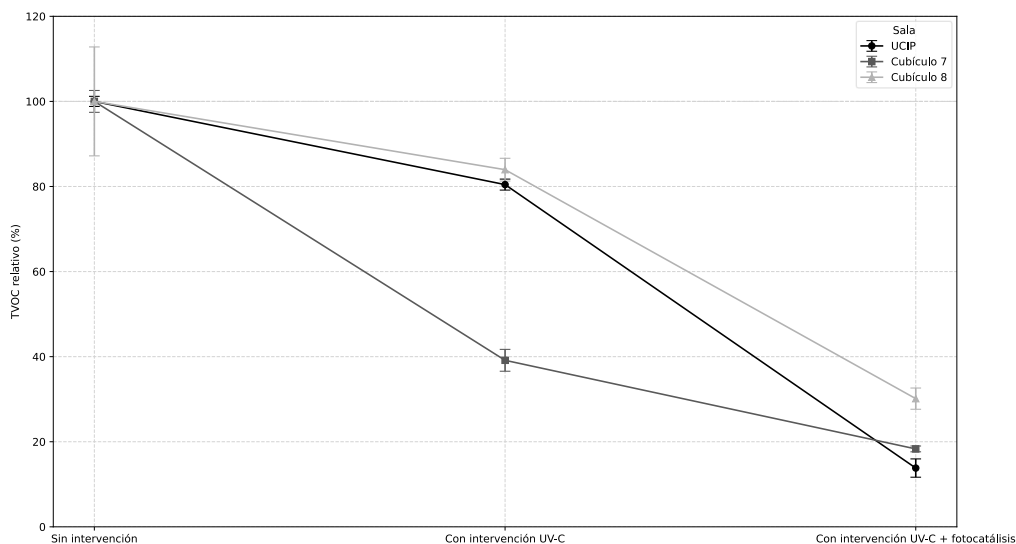


Ilustración 44 - Reducción relativa de TCOV.

Fuente: Autoría propia.

Los resultados mostraron la evolución del TCOV relativo bajo cada una de las condiciones, incluyendo barras de error asociadas a cada punto de medición. Se observó que, para los tres espacios evaluados, la implementación del prototipo induce una disminución significativa en la carga de TVOC. En particular, el uso combinado de UVC y fotocatalisis demostraron ser la intervención más eficaz, alcanzando una reducción del TVOC hasta niveles del 13.81% en la UCIP, 18.32% en el cubículo 7 y 30.13% en el cubículo 8.

De forma complementaria al análisis de TCOV, y en la búsqueda de evaluar la eficacia del prototipo en la reducción de otros compuestos, se estudió la concentración relativa de formaldehído (HCHO) y de dióxido de carbono (CO₂) bajo idénticas condiciones experimentales. Los resultados de la reducción de HCHO (*Ilustración 45*) destacaron nuevamente una tendencia consistente en la reducción conforme se aplica la interacción completa del prototipo (UVC + fotocatalisis). Al igual que en el caso del TCOV, la intervención combinada fue la más eficaz, alcanzando reducciones significativas en todos los espacios evaluados, registrándose presencia solamente del 16.6% en la UCIP, 18.82% en el cubículo 7 y 27.06% en el cubículo 8, respecto a la condición estudiada sin intervención.

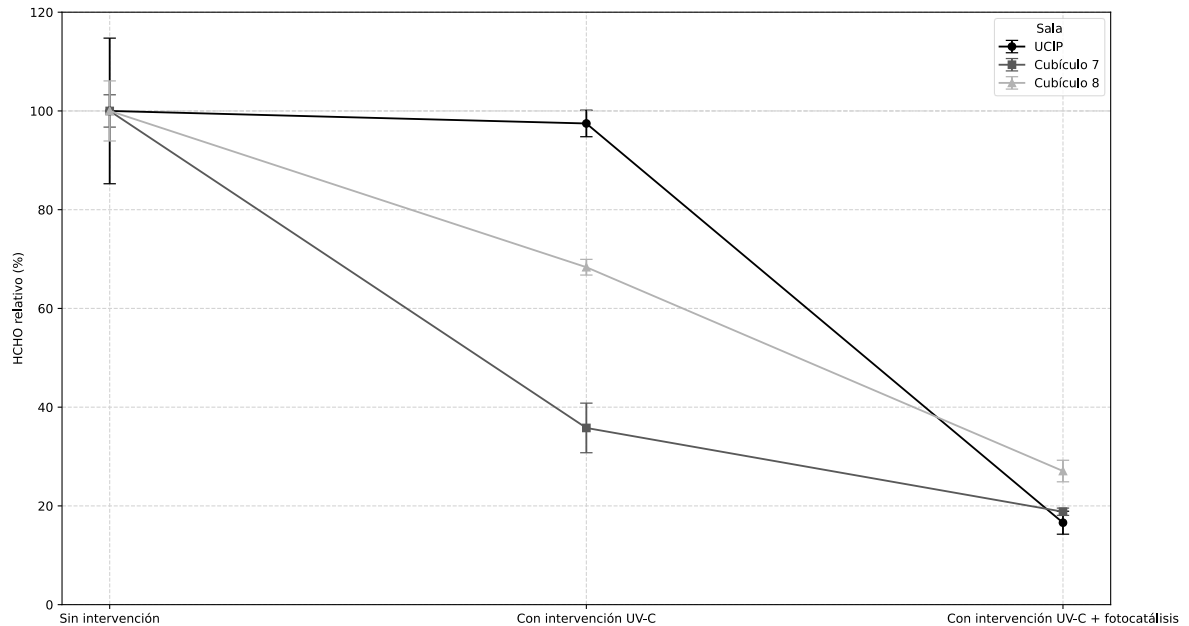


Ilustración 45 - Reducción relativa de HCHO.

Fuente: Autoría propia.

La intervención con solo UV-C mostró un comportamiento más variable entre los espacios. Mientras en el cubículo 7 se logró una reducción considerable (Presencia del 35.79%), en la UCIP el efecto no fue tan deseable (Presencia del 97.46%), lo que sugiere que las características propias del entorno pueden influir en la eficacia de la tecnología aplicada.

Finalmente, se observó en los resultados del análisis de reducción de dióxido de carbono (*Ilustración 46*) que la intervención con UV-C redujo los niveles de CO₂ a 72.65% en el cubículo 7, 89.78% en el cubículo 8 y 84.84% en la UCIP. Sin embargo, fue nuevamente la combinación de UV-C y fotocatalisis que demostró el mayor impacto, disminuyendo el CO₂ relativo a 63.06% en el cubículo 7, 61.96% en el cubículo 8, y 33.19% en la UCIP.

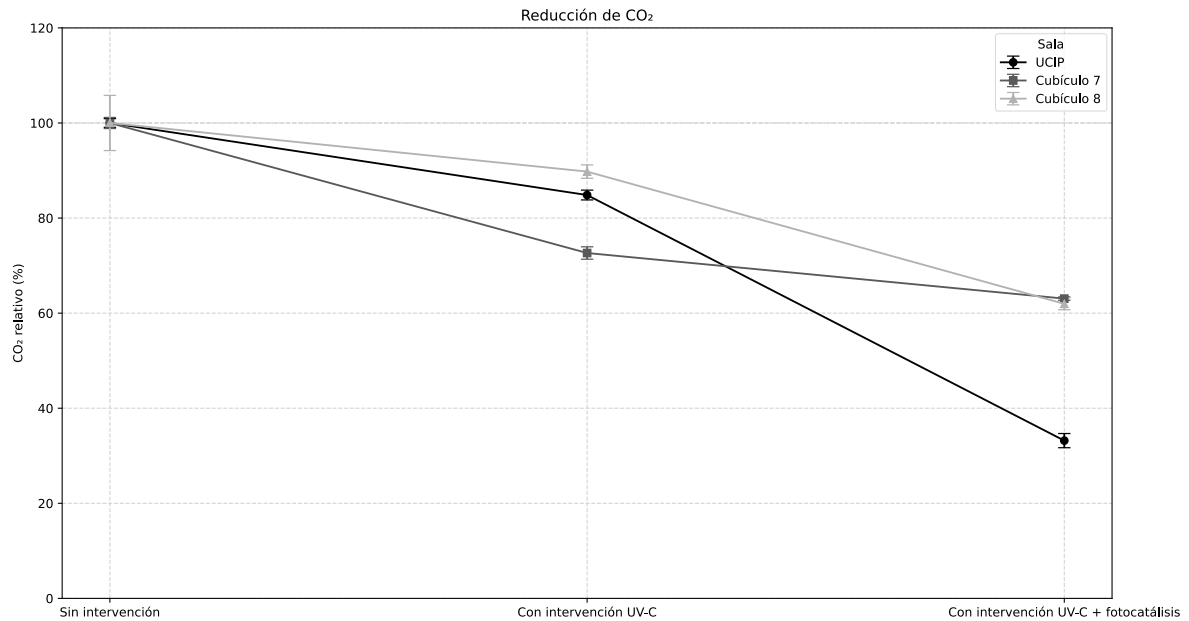


Ilustración 46 - Reducción relativa de CO₂.

Fuente: Autoría propia.

5.3.2. RESULTADOS DE TOMAS DE MUESTRAS

5.3.2.1. *Análisis por sala*

A continuación, se presenta un análisis estadístico descriptivo basado en los datos obtenidos de la toma de muestras bacteriológicas dentro de los mismos tres espacios en los cuales se trabajó en la sección anterior y bajo tres condiciones experimentales: Sin intervención, con intervención UV-C y con intervención UV-C + fotocatalisis. Las variables cuantificadas en cada caso fueron el recuento total de bacterias aeróbicas, el recuento de levaduras y el recuento de mohos, expresadas en unidades formadoras de colonia por metro cubico (UFC/m³).

En la sala UCIP (*Tabla 21*), los resultados mostraron una reducción progresiva de microorganismos al pasar las distintas fases de validación del prototipo. El recuento de bacterias aerobias se obtuvo un conteo inicial de 3 UFC/m³ lo cual se redujo a 0 UFC/m³ al usar el prototipo completo. Un patrón similar se observó para las levaduras (de 5 a 0 UFC/m³). En el caso de mohos no se detectó ninguna unidad.

Tabla 21 - Resultados toma de muestras bacteriológicas: Sala UCIP.

Tipo de escenario experimental	Recuento total bacterias aerobias (UFC/m³)	Recuento levaduras (UFC/m³)	Recuento Mohos (UFC/m³)
Sin intervención	3	5	0
Intervención UV-C	1	1	0
Intervención UV-C+ fotocatalisis	0	0	0

Fuente: Autoría propia.

En el cubículo 7 (*Tabla 22*) no se registró presencia de microorganismos en ninguna de las condiciones. Este resultado podría atribuirse a las condiciones ambientales previamente controladas. A causa de la ausencia de variación, no se pudo establecer un efecto comparativo entre los sistemas evaluados en esta área.

Tabla 22 - Resultados toma de muestras bacteriológicas: cubículo 7.

Tipo de escenario experimental	Recuento total bacterias aerobias (UFC/m³)	Recuento levaduras (UFC/m³)	Recuento Mohos (UFC/m³)
Sin intervención	0	0	0
Intervención UV-C	0	0	0
Intervención UV-C+ fotocatalisis	0	0	0

Fuente: Autoría propia.

En el cubículo 8 (*Tabla 23*) se observaron inicialmente valores elevados de bacterias aerobias (4 UFC/m³) y levaduras (3 UFC/m³) en la condición sin intervención. Al introducir tanto el sistema UV-C, como el sistema completo (UV-C + fotocatalisis), los recuentos cayeron a 0 UFC/m³ en ambas variables, manteniendo también en cero el recuento de mohos. Se destaca que, al igual que en la sala UCIP, el prototipo logró una reducción total de las variables cuantificadas.

Tabla 23 - Resultados toma de muestras bacteriológicas: cubículo 8.

Tipo de escenario experimental	Recuento total bacterias aerobias (UFC/m³)	Recuento levaduras (UFC/m³)	Recuento Mohos (UFC/m³)
Sin intervención	4	3	0
Intervención UV-C	0	0	0
Intervención UV-C+ fotocatalisis	0	0	0

Fuente: Autoría propia.

5.3.2.2. Análisis comparativo

Con base en los resultados experimentales descritos en la sección anterior y su representación visual (*Ilustración 47*), se realizó un análisis comparativo del impacto de los tres tipos de intervenciones sobre la carga microbiana aérea, específicamente el recuento de bacterias aerobias en tres espacios clínicos diferenciados.

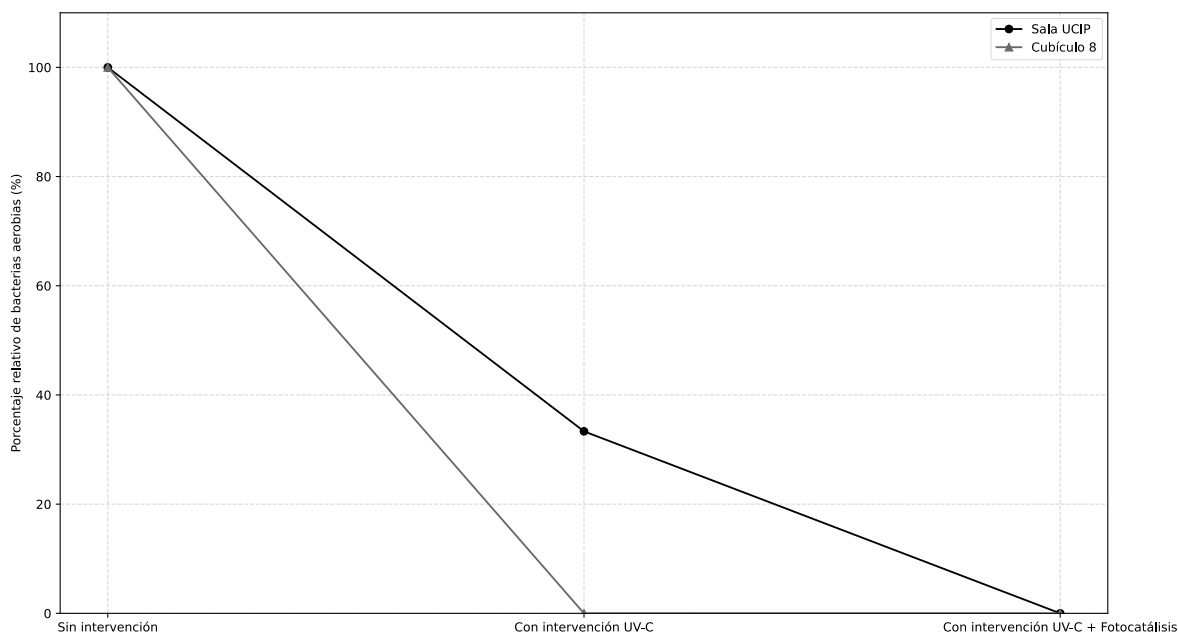


Ilustración 47 - Reducción relativa de bacterias aerobias.

Fuente: Autoría propia.

En términos porcentuales y considerándose como referencia el 100% el recuento de bacterias total de bacterias aerobias sin ningún tipo de intervención, se evidenció una clara tendencia a la reducción progresiva de las unidades formadoras de colonias al aplicar las acciones germicidas del prototipo. En la sala UCIP se observó una disminución del 66.7% con la intervención UV-C, y una eliminación del 100% con la intervención UV-C + fotocatalisis.

En el caso del cubículo 8, se presenta una dinámica similar, con la diferencia que bastó con la intervención UV-C para disminuir completamente (100%) la cantidad total de bacterias aerobias. Por otro lado, el cubículo 7 no presentó carga microbiana inicial bajo ninguna condición, razón por la cual no se observa variabilidad relativa en el gráfico.

De forma complementaria, el análisis del porcentaje relativo de levaduras reafirma la eficacia del sistema (*Ilustración 48*). En la sala UCIP, el valor inicial sin intervención fue del 100%, con la intervención UV-C se redujo al 20%, y finalmente se logró una erradicación total al aplicar la intervención UV-C + fotocatalisis. En el caso del cubículo 8, de manera similar a lo sucedido con las bacterias aerobias, fue suficiente con la intervención UV-C para erradicar el 100% de las levaduras.

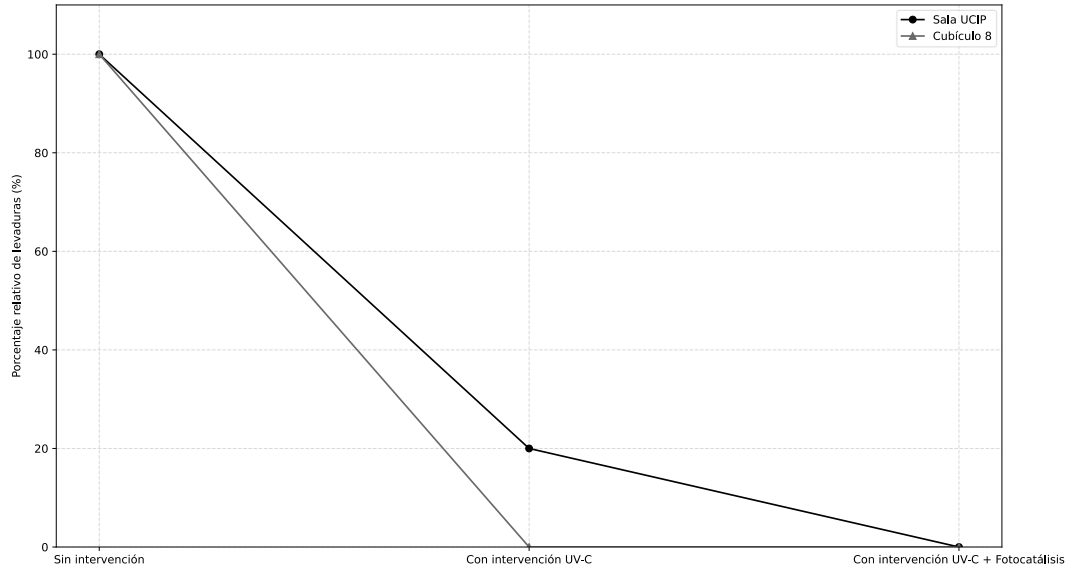


Ilustración 48 - Reducción relativa de levaduras.

Fuente: Autoría propia.

5.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO INFERENCIAL

Para determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre los grupos evaluados en las mediciones de los distintos parámetros de calidad del aire, se aplicaron análisis de varianza utilizando un nivel de confianza del 95%. Previo a la aplicación de las pruebas se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homogeneidad en varianzas ($p > 0.05$). En los casos donde se confirmó la normalidad de los datos y la homogeneidad de las varianzas, se utilizó la prueba ANOVA.

No obstante, cuando se incumplió el supuesto de homogeneidad de varianzas, pero se mantuvo la normalidad, se optó por la prueba ANOVA de Welch, la cual es la adecuada para estos

grupos de datos. Por otro lado, si los datos no mostraron distribución normal, se empleó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis (Tabla 24).

Tabla 24 - Pruebas estadísticas.

Evaluación	Hipótesis	Criterio	Pruebas utilizadas
Normalidad	Los datos tienen una distribución normal (H_0).	$p > 0.05$.	Kolmogorov-Smirnov Kolmogorov-Smirnov (Lilliefors Corr.)
	Los datos no tienen una distribución normal (H_1).	$p < 0.05$.	Shapiro-Wilk Anderson-Darling
Homogeneidad de varianzas	Las varianzas de los grupos son iguales (H_0).	$p > 0.05$.	Levene (Media)
	Las varianzas de los grupos son diferentes (H_1).	$p < 0.05$	Brown-Forsythe (Mediana)
Significancia estadística	No hay diferencia significativa entre los grupos (H_0).	$P > 0.05$.	ANOVA ANOVA de Welch
	Hay al menos una diferencia significativa entre los grupos (H_1).	$p < 0.05$.	Kruskal-Wallis Post-hoc

Fuente: Autoría propia.

5.4.1. ANÁLISIS EN PRUEBAS DE TCOV

Además, se cumplió con la suposición de nivel de medición debido a que la variable independiente (Tipo de intervención) es catalogada como nominal y la variable dependiente (TCOV) es medible. Una vez confirmado el nivel de medición se procedió a corroborar el cumplimiento de la independencia de las mediciones. Debido a la metodología experimental utilizada, ninguna de las mediciones entre los grupos se vio afectada entre sí, dando paso al cumplimiento de la suposición de independencia.

Para la suposición de distribución normalizada se comprobó mediante pruebas de distribución normal de Kolmogorov-Smirnov, Kolmogorov-Smirnov (Lilliefors Corr.), Shapiro-Wilk y Anderson-Darling (*tabla 25*). Se obtuvieron valores que sugieren que los datos no se desvían significativamente de la normalidad ($p > 0.05$).

Tabla 25 - Pruebas de distribución normal (TCOV).

	UCIP (valor p)			Cubículo 7 (valor p)			Cubículo 8 (valor p)		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Kolmogorov-Smirnov	0.839	0.655	0.813	0.989	0.712	0.75	0.624	0.867	0.988
Kolmogorov-Smirnov (Lilliefors Corr.)	0.499	0.143	0.418	1	0.212	0.274	0.115	0.601	1
Shapiro-Wilk	0.25	0.365	0.177	0.764	0.31	0.024	0.132	0.67	0.861
Anderson-Darling	0.235	0.211	0.173	0.633	0.215	0.47	0.106	0.401	0.755

Fuente: Autoría propia.

Nota*: se aplicó la siguiente nomenclatura para los escenarios experimentales: Sin intervención = A, intervención UV-C = B, intervención UV-C + fotocátalisis = C.

A pesar de que las cuatro pruebas estadísticas indican que los datos no se desvían de la distribución normal, se procedió a representar los datos en un diagrama cuantil- cuantil para tener una representación visual de cada uno de los grupos.

En el caso de la sala UCIP, el grupo sin intervención demostró una distribución normal, debido a que los datos observados no se desvían del eje central del diagrama de cuantil-cuantil, lo que corrobora los resultados obtenidos en las pruebas de distribución normal realizadas (*Ilustración 49*).

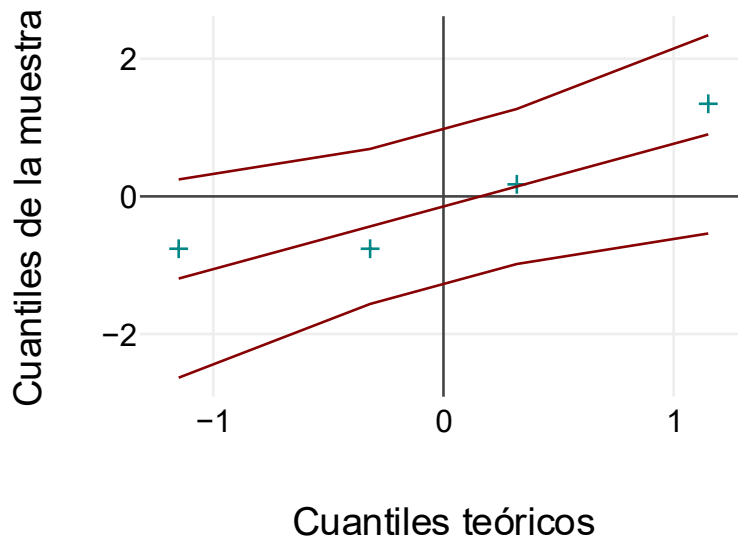


Ilustración 49 - Diagrama cuantil-cuantil UCIP sin intervención (TCOV).

Fuente: Autoría propia.

Se observó un comportamiento similar en el grupo con intervención UV-C, a pesar de que una de las mediciones se desvía del eje central del diagrama, el comportamiento de las otras mediciones se mantiene muy cercanos, esto sumado a los resultados obtenidos en las pruebas de distribución normal, confirma que se puede asumir normalidad de los datos (*Ilustración 50*).

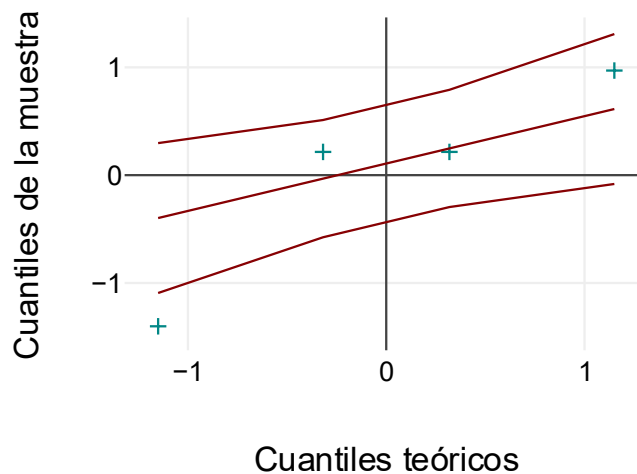


Ilustración 50 - Diagrama cuantil-cuantil UCIP intervención UV-C (TCOV).

Fuente: Autoría propia.

El grupo de intervención UV-C+ fotocátalisis demostró una distribución normal tanto por los valores de p obtenidos en las pruebas de distribución normal como por el comportamiento del diagrama cuantil-cuantil (*Ilustración 51*).

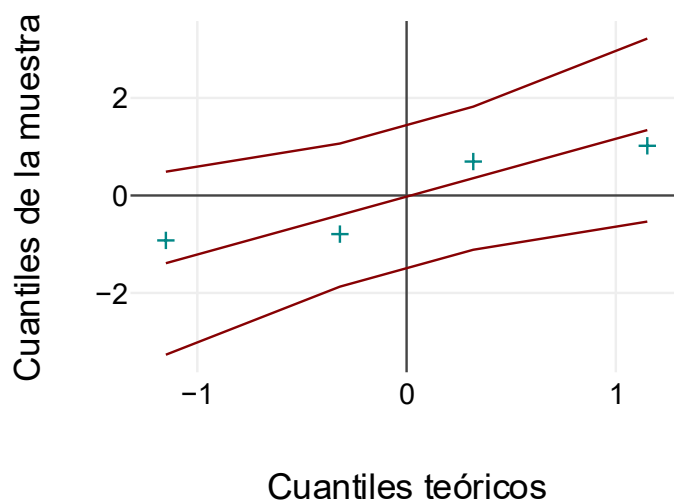


Ilustración 51 - Diagrama cuantil-cuantil UCIP intervención UV-C + fotocátalisis (TCOV).

Fuente: Autoría propia.

Por último, se comprobó la homogeneidad mediante la prueba de Levene y la prueba de Bron-Forsythe ya que permiten evaluar si dos o más grupos tienen varianzas iguales. En ambas pruebas se obtuvieron valores que aceptaban la hipótesis nula ($p > 0.05$). En el caso de la prueba de Levene, el valor de p (0.073) sugiere que no existe evidencias estadísticamente significativas para rechazar la hipótesis nula de varianzas, por lo que se supone que las desviaciones son iguales para los fines del análisis ANOVA. En el caso de la prueba Brown-Forsythe, el valor de p (0.127) sugiere que las varianzas entre los grupos también pueden considerarse iguales.

Una vez realizada la validación de que las suposiciones necesarias para hacer el análisis de varianza, se procedió a analizar si existía una diferencia significativa entre la variable categórica y la variable dependiente. Tomando como variable categórica el tipo de intervención y como variable dependiente los TCOV, HCHO y CO₂. Cabe mencionar que este análisis se repitió tres veces por cada una de las variables dependiente, dado que se aplicó el análisis unidireccional de la varianza.

Manteniendo la variable categórica y seleccionando como variable métrica UCIP, se demostró mediante el análisis unidireccional de la varianza que existió una diferencia significativa entre la variable tipo de intervención y la sala. Dado que se obtuvo un valor $p < 0.001$, se rechazó la hipótesis nula, la cual consistió en que no existe diferencia entre los tres grupos de la variable independiente con respecto a la variable dependiente. Por tanto, se asegura que el prototipo sinérgico multibanda UV ha tenido resultados más que concluyentes en cuanto a la disminución de TCOV en la sala de UCIP. Además, se obtuvo un valor F muy alto (3178.62) lo que indica que hay una gran diferencia en las mediciones obtenidas (Tabla 26).

Tabla 26 - ANOVA UCIP (TCOV).

	Suma de cuadrados	df	Cuadrados medios	F	p
Tipo de intervención	0.84	2	0.42	3178.62	<0.001
Residual	0	9	0		
Total	0.84	11			

Fuente: Autoría propia.

Debido a que se el análisis de varianza encontró diferencias significativas se procedió a realizar pruebas post HOC, específicamente la prueba de Bonferroni. Esto con la intención de poder detectar entre cuales de los grupos se encontraban las diferencias detectadas en el ANOVA. Al comparar los grupos en pares (Sin intervención/UV-C, sin intervención/ UV-C+ fotocátalisis y UV-C/ UV-C+ fotocátalisis), se obtuvo un valor $p < 0.05$ por lo que se demostró que los grupos en pares fueron significativamente diferentes. Sin embargo, para poder comprobar los resultados de la prueba de Bonferroni, también se realizaron las pruebas de Tukey y la prueba de Scheffe, obteniendo los mismos resultados (Tabla 27).

Tabla 27- Pruebas post HOC (TCOV).

Prueba	Relación	Valor F	Valor p
Bonferroni	A ↔ B	N/A	<0.001
	A ↔ C	N/A	<0.001
	B ↔ C	N/A	<0.001
Tukey's Test	A ↔ B	N/A	<0.001
	A ↔ C	N/A	<0.001
	B ↔ C	N/A	<0.001
Scheffe Test	A ↔ B	297.65	N/A
	A ↔ C	5782.17	N/A
	B ↔ C	3456.02	N/A

Continuación de Tabla 27.

Prueba	Relación	Valor F	Valor p
Prueba de la mínima diferencia significativa de Fisher	A ↔ B	N/A	<0.001
	A ↔ C	N/A	<0.001
	B ↔ C	N/A	<0.001

Fuente: Autoría propia.

Nota*: se aplicó la siguiente nomenclatura para los escenarios experimentales: Sin intervención = A, intervención UV-C = B, intervención UV-C + fotocátalisis = C.

Posteriormente, el análisis unidireccional de la varianza se repitió para el cubículo 7, manteniendo la variable independiente como tipo de intervención, sin embargo, para este análisis se utilizó como variable métrica el cubículo 7. El análisis de los valores p de normalidad y la distribución de las gráficas (*Anexo 22 - 24*) mostró una distribución normal entre los datos, manteniéndose una de las condiciones. Por otro lado, las pruebas Levene ($p = 0.222$) y Brown-Forsythe ($p = 0.4$) arrojaron resultados que no suponen el rechazo de la hipótesis nula, por lo tanto, los datos eran válidos para ser analizados por una prueba ANOVA.

Se obtuvo un valor $p < 0.001$, lo que sugiere nuevamente que hubo una diferencia significativa entre la variable independiente y la variable dependiente (*tabla 28*). Dado lo anterior se procedió a rechazar la hipótesis nula, que consistió en que no existe diferencia entre los tres grupos de la variable independiente con respecto a la variable dependiente.

Tabla 28 - ANOVA cubículo 7 (TCOV).

	Suma de cuadrados	df	Cuadrados medios	F	p
Tipo de intervención	0.04	2	0.02	1581.17	<0.001
Residual	0	9	0		
Total	0.04	11			

Fuente: Autoría propia.

Con el fin de mantener la congruencia investigativa, nuevamente se aplicaron las pruebas post HOC para identificar los grupos con diferencias entre sí. Se mantuvieron los mismos grupos pares, dando como resultado un valor $p < 0.05$, lo que implica que los grupos fueron significativamente diferentes por pares (*tabla 29*). Además, los altos valores de $F = 1581.17$ implican nuevamente una gran diferencia entre grupos, lo que sugiere el correcto desempeño del prototipo.

Tabla 29 - Pruebas HOC cubículo 7 (TCOV).

Prueba	Relación	Valor F	Valor <i>p</i>
Bonferroni	A ↔ B	N/A	<0.001
	A ↔ C	N/A	<0.001
	B ↔ C	N/A	<0.001
Tukey's Test	A ↔ B	N/A	<0.001
	A ↔ C	N/A	<0.001
	B ↔ C	N/A	<0.001
Scheffe Test	A ↔ B	1625.21	N/A
	A ↔ C	2927.96	N/A
	B ↔ C	190.35	N/A
Prueba de la mínima diferencia significativa de Fisher	A ↔ B	N/A	<0.001
	A ↔ C	N/A	<0.001
	B ↔ C	N/A	<0.001

Fuente: Autoría propia.

Nota*: se aplicó la siguiente nomenclatura para los escenarios experimentales: Sin intervención = A, intervención UV-C = B, intervención UV-C + fotocatalisis = C.

Finalmente, se concluyó el análisis estadístico inferencial de TCOV con el análisis de varianza, siguiendo la metodología planteada, se mantuvo como variable independiente el tipo de intervención y la dependiente se cambió al cubículo 8. Posterior al análisis de distribución normal (*Anexo 25 - 27*) y al análisis de homogeneidad con las pruebas de Levene ($p = 0.044$) y Brown-Forsythe ($p = 0.322$). Se concluyó que los datos no son explícitamente adecuados para la aplicación de una prueba ANOVA, por lo que se procedió a realizar una prueba ANOVA de Welch.

Puesto que se obtuvo un valor $p < 0.001$, al igual que en los análisis previos, se demostró que hubo una diferencia significativa entre la variable independiente y la variable dependiente, por lo que se aceptó la hipótesis alternativa, la cual establece que existe una diferencia entre los 3 grupos de la variable independiente con respecto a la variable dependiente (*tabla 30*).

Tabla 30 - ANOVA de Welch cubículo 8 (TCOV).

	F	df1	df2	<i>p</i>
Prueba de Welch	406.31	2	5.39	< 0.001

Fuente: Autoría propia.

Mediante la aplicación de pruebas post HOC se demostró que los grupos por pares eran significativamente diferentes, debido a que se obtuvo un valor $p < 0.05$ (*tabla 31*).

Tabla 31-Pruebas HOC cubículo 8 (TCOV).

Prueba	Relación	Valor F	Valor P
Bonferroni	A ↔ B	N/A	<0.001
	A ↔ C	N/A	<0.001
	B ↔ C	N/A	<0.001
Tukey's Test	A ↔ B	N/A	<0.001
	A ↔ C	N/A	<0.001
	B ↔ C	N/A	<0.001
Scheffe Test	A ↔ B	8.72	N/A
	A ↔ C	165.24	N/A
	B ↔ C	98.05	N/A
Prueba de la mínima diferencia significativa de Fisher	A ↔ B	N/A	<0.001
	A ↔ C	N/A	<0.001
	B ↔ C	N/A	<0.001

Fuente: Autoría propia.

Nota*: se aplicó la siguiente nomenclatura para los escenarios experimentales: Sin intervención = A, intervención UV-C = B, intervención UV-C + fotocátalisis = C.

5.4.2. ANÁLISIS EN PRUEBAS DE HCHO.

De igual manera a como se hizo en el análisis de TCOV, se realizaron las pruebas pertinentes para asegurar que los datos conseguidos cumplan los parámetros de normalidad con el fin de ser aptos para la aplicación de pruebas ANOVA (Tabla 32).

Tabla 32 - Pruebas de distribución normal (HCHO).

	UCIP (valor p)			Cubículo 7 (valor p)			Cubículo 8 (valor p)		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Kolmogorov-Smirnov	0.893	0.75	0.752	0.976	0.8	0.315	0.845	0.75	0.663
Kolmogorov-Smirnov (Lilliefors Corr.)	0.72	0.274	0.277	1	0.383	0.006	0.519	0.274	0.15
Shapiro-Wilk	0.715	0.024	0.061	0.798	0.271	0.001	0.241	0.024	0.051
Anderson-Darling	0.52	0.047	0.081	0.691	0.254	0.007	0.226	0.047	0.061

Fuente: Autoría propia.

Nota*: se aplicó la siguiente nomenclatura para los escenarios experimentales: Sin intervención = A, intervención UV-C = B, intervención UV-C + fotocátalisis = C.

Los resultados arrojaron que la mayoría de los valores p superaron la barrera de 0.05, lo que indicó que los valores no se dispersan mucho con respecto a la distribución normal según las pruebas estadísticas realizadas. De igual forma, se realizaron diagramas de cuantil – cuantil para apreciar de manera visual la dispersión de los datos, y analizar aquellas categorías donde los valores p fueron menor a 0.05.

Para los datos extraídos de la sala UCIP. El grupo sin ningún tipo de intervención demostró una distribución normal graficándose sus cuatro puntos dentro de las bandas de normalidad y siguiendo una formación similar al eje central a excepción de un solo punto, esta grafica corrobora los resultados de las pruebas estadísticas aplicadas (*Ilustración 52*).

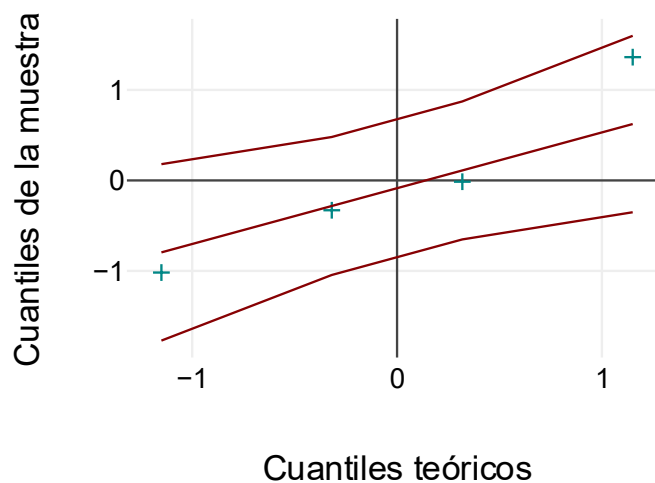


Ilustración 52 - Diagrama cuantil-cuantil UCIP sin intervención (HCHO).

Fuente: Autoría propia.

Con respecto al grupo que pertenece a la intervención con UV-C (*Ilustración 53*) se requirió de un mayor análisis de la gráfica debido a que dos de las cuatro pruebas no aprobaron la prueba de la normalidad ($p < 0.05$). En el grafico se aprecia que los puntos se encuentran distribuidos dentro de las bandas extremas y cerca del eje principal, por lo tanto, se concluyó que estos datos tienen una distribución normal.

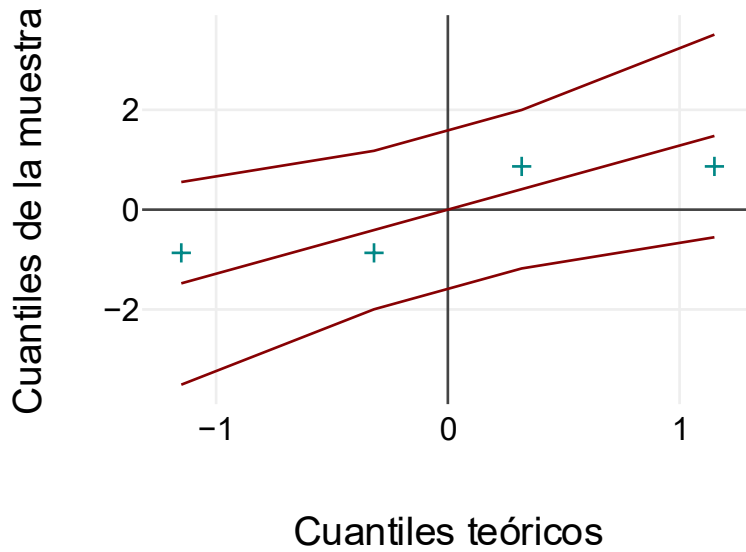


Ilustración 53 - Diagrama cuantil-cuantil UCIP intervención UV-C (HCHO).

Fuente: Autoría propia.

Finalmente, el último grupo de datos mostró una gráfica similar a la vista anteriormente, manteniendo sus puntos dentro de la distribución normal (*Ilustración 54*).

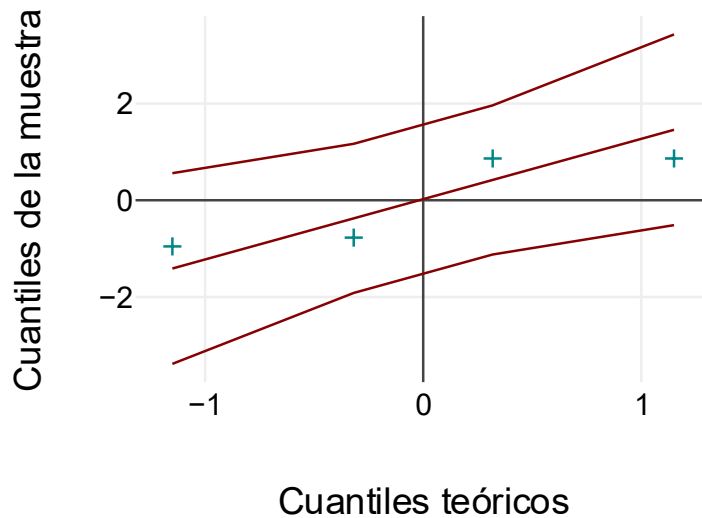


Ilustración 54 - Diagrama cuantil-cuantil UCIP intervención UV-C + fotocátalisis (HCHO).

Fuente: Autoría propia.

Como última condición, fue necesario comprobar la homogeneidad mediante la prueba de Levene y de Brown-forsythe. En ambas pruebas se obtuvieron valores favorables para la aplicación de la prueba ANOVA (Levene = 0.101, Brown-Forsythe = 0.132). Por lo tanto, se procedió a realizar estas pruebas para cada grupo de datos extraídos.

La prueba ANOVA realizada en el grupo de datos extraídos de la sala UCIP dio un resultado positivo en la búsqueda de demostrar las diferencias significativas de los parámetros medidos en base al tipo de intervención aplicada ($p < 0.001$). Consecuentemente, se rechazó la hipótesis nula y se logró asegurar que el prototipo sigue teniendo resultados concluyentes de manera similar a lo visto en el análisis anterior (Tabla 33).

Tabla 33- ANOVA UCIP (HCHO).

	Suma de cuadrados	df	Cuadrados medios	F	p
Tipo de intervención	0.1	2	0.05	117.37	<0.001
Residual	0	9	0		
Total	0.1	11			

Fuente: Autoría propia.

Siguiendo la metodología planteada con respecto a la corroboración de las diferencias entre pares. Se logró apreciar diferencias significativas en los pares respecto a los grupos con intervención UV-C + fotocátalisis versus los otros dos grupos establecidos. Sin embargo, no existen diferencias significativas entre el grupo de datos extraídos sin intervención con los datos extraídos únicamente con intervención UV-C. Este hecho destaca la influencia del prototipo funcionando en su totalidad para obtener resultados favorables (Tabla 34).

Tabla 34 - Pruebas Post Hoc UCIP (HCHO).

Prueba	Relación	Valor F	Valor p
Bonferroni	A ↔ B	N/A	1
	A ↔ C	N/A	<0.001
	B ↔ C	N/A	<0.001
Tukey's Test	A ↔ B	N/A	0.913
	A ↔ C	N/A	<0.001
	B ↔ C	N/A	<0.001
Scheffe Test	A ↔ B	0.17	N/A
	A ↔ C	181.4	N/A
	B ↔ C	170.53	N/A
Prueba de la mínima diferencia significativa de Fisher	A ↔ B	N/A	0.692

Continuación de Tabla 34.

Prueba	Relación	Valor F	Valor p
Prueba de la mínima diferencia significativa de Fisher	A ↔ C	N/A	<0.001
	B ↔ C	N/A	<0.001

Fuente: Autoría propia.

Nota*: se aplicó la siguiente nomenclatura para los escenarios experimentales: Sin intervención = A, intervención UV-C = B, intervención UV-C + fotocatalisis = C.

Previo a la realización de la prueba ANOVA de los datos extraídos de cada escenario experimental, se analizaron las gráficas para complementar la corroboración de normalidad de los datos (*Anexo 28 - 30*). Los resultados demostraron que existían grupos de datos que no mostraban una distribución normal, además los valores p de las pruebas de Levene (0.014) y Brown-Forsythe (0.027) ofrecieron evidencia estadísticamente significativa para rechazar la hipótesis nula de varianzas iguales. Con base a estos resultados se aplicaron pruebas no paramétricas a este conjunto de datos con el fin de observar la existencia de diferencias significativas entre ellos (*Tabla 35*).

Tabla 35 – Prueba de Kruskal – Wallis Cubículo 7 (HCHO).

	Chi2	df	p
Tipo de intervención	10.02	2	0.007

Fuente: Autoría propia.

La prueba de Kruskal-Wallis ha mostrado que existía una diferencia significativa por lo menos entre dos grupos, de los tres existentes (Sin intervención, con intervención UV-C, con intervención UV-C + fotocatalisis). Por lo tanto, la hipótesis nula es rechazada, siendo esto favorable para la evaluación del rendimiento del prototipo. De igual manera, se aplicó una prueba Dunn – Bonferroni para evaluar la diferencia entre pares (*Tabla 36*).

Tabla 36 - Prueba Post hoc cubículo 7 (HCHO).

Prueba	Relación	Valor F	Valor p ajustado
Bonferroni	A ↔ B	N/A	0.34
	A ↔ C	N/A	0.005
	B ↔ C	N/A	0.34

Fuente: Autoría propia.

Nota*: se aplicó la siguiente nomenclatura para los escenarios experimentales: Sin intervención = A, intervención UV-C = B, intervención UV-C + fotocatalisis = C.

La prueba de Dunn-Boferroni ha mostrado que la comparación de grupos por pares fue significativamente diferente solo entre la comparación hecha entre el escenario experimental sin intervención con los datos extraídos al usar el prototipo en su completa funcionalidad.

De igual manera, se evaluaron las representaciones graficas de los datos extraídos del cubículo 8, tomando en cuenta los valores p dados para corroborar su distribución normal (*Anexo 31 - 33*). Estos resultados indicaron que los datos se manejan de manera favorable para la aplicación de una prueba ANOVA. Con respecto a la segunda condición, los valores p obtenido como resultado de las pruebas Levene (0.066) y Brown-Forsythe (0.141) superan el umbral de 0.05, por lo tanto, también se consideró una varianza homogénea. Con base a estos datos se procedió a realizar la prueba ANOVA (*Tabla 37*).

Tabla 37 - ANOVA cubículo 8 (HCHO).

	Suma de cuadrados	df	Cuadrados medios	F	p
Tipo de intervención	0.01	2	0.01	362.11	<0.001
Residual	0	9	0		
Total	0.01	11			

Fuente: Autoría propia.

El análisis de varianza mostró que había diferencias significativas entre las variables relacionadas al tipo de intervención con respecto a los valores de HCHO medidos. Para corroborar entre que pares existían diferencias significativas se llevaron a cabo las pruebas post hoc (*Tabla 38*).

Tabla 38 - Pruebas Post hoc C8 (HCHO)

Prueba	Relación	Valor F	Valor p
Bonferroni	A ↔ B	N/A	<0.001
	A ↔ C	N/A	<0.001
	B ↔ C	N/A	<0.001
Tukey's Test	A ↔ B	N/A	<0.001
	A ↔ C	N/A	<0.001
	B ↔ C	N/A	<0.001
Scheffe Test	A ↔ B	135,6	N/A
	A ↔ C	720.03	N/A
	B ↔ C	230.7	N/A

Continuación de Tabla 38.

Prueba	Relación	Valor F	Valor p
Prueba de la mínima diferencia significativa de Fisher	A ↔ B	N/A	<0.001
	A ↔ C	N/A	<0.001
	B ↔ C	N/A	<0.001

Fuente: Autoría propia.

Nota*: se aplicó la siguiente nomenclatura para los escenarios experimentales: Sin intervención = A, intervención UV-C = B, intervención UV-C + fotocatalisis = C.

Los resultados demostraron que convenientemente existía una diferencia significativa entre los tres grupos de pares.

5.4.3. ANÁLISIS DE PRUEBAS DE CO₂

Finalmente, con el último grupo de datos, similar a los dos grupos anteriores, se aplicaron pruebas de distribución de normalidad para garantizar que las suposiciones necesarias para realizar el análisis de varianza se cumplieran (Tabla 39).

Tabla 39 - Pruebas de distribución normal (CO₂).

	UCIP (valor p)			Cubículo 7 (valor p)			Cubículo 8 (valor p)		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Kolmogorov-Smirnov	0.456	0.834	0.934	0.977	0.788	0.792	0.961	0.906	0.983
Kolmogorov-Smirnov (Lilliefors Corr.)	0.029	0.482	0.93	1	0.354	0.365	1	0.79	1
Shapiro-Wilk	0.01	0.658	0.633	0.823	0.097	0.262	0.564	0.683	0.836
Anderson-Darling	0.021	0.445	0.539	0.656	0.101	0.246	0.481	0.41	0.729

Fuente: Autoría propia.

Nota*: se aplicó la siguiente nomenclatura para los escenarios experimentales: Sin intervención = A, intervención UV-C = B, intervención UV-C + fotocatalisis = C.

Se realizó un análisis de varianza unidireccional, tomando como variable dependiente la presencia de CO₂ y como variables independientes el tipo de intervención aplicada, se mantuvieron los mismos grupos, equivalentes a cada uno de los escenarios experimentales. Las pruebas de Levene (P = 0.316) y Brown-Forsythe (0.369) demostraron que existía homogeneidad

entre la varianza de los grupos de datos. Sin embargo, se encontró un grupo de datos que no cumplía los valores de distribución normal, por lo que se analizaron sus representaciones visuales pertinentes.

Para el primer grupo de datos se observó una gráfica la cual no cumplía los requisitos de distribución normal, teniendo un punto que se salía dentro del rango permitido, sumándole a los resultados obtenidos a través de las pruebas estadísticas, se concluyó que los datos no forman una distribución normal (*Ilustración 55*).

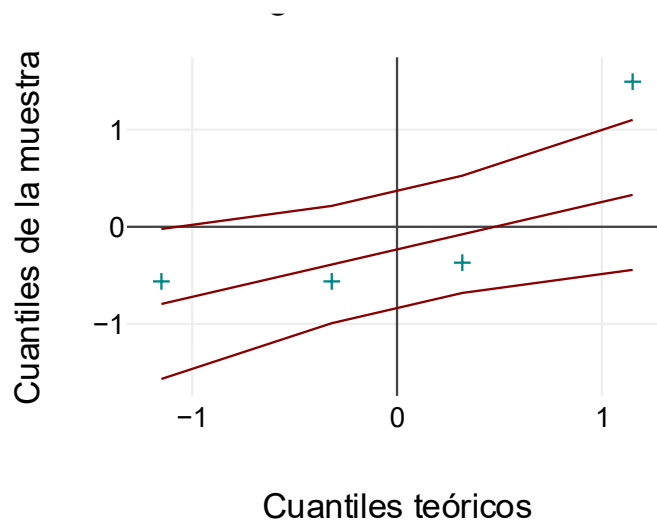


Ilustración 55 - Diagrama cuantil-cuantil UCIP sin intervención (CO₂).

Fuente: Autoría propia.

En el segundo grupo de datos se observó una forma no tan cercana al eje principal, sin embargo, sus puntos se mantienen dentro del rango que se permite apreciado en el diagrama cuantil-cuantil. Se concluyó que sus datos si cumplen una distribución normal (*Ilustración 56*).

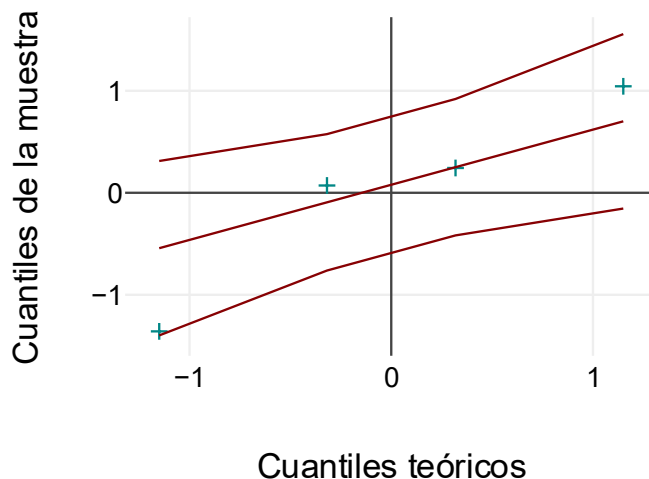


Ilustración 56 - Diagrama cuantil-cuantil UCIP intervención UV-C (CO₂).

Fuente: Autoría propia.

Finalmente, en el último conjunto de datos se apreciaron puntos mucho más cercanos al eje normal (Ilustración 57), añadiéndole a esta apreciación que sus pruebas estadísticas superaron la barrera de manera positiva ($p > 0.005$). Por lo tanto, se concluyó que los datos cumplían una distribución normal.

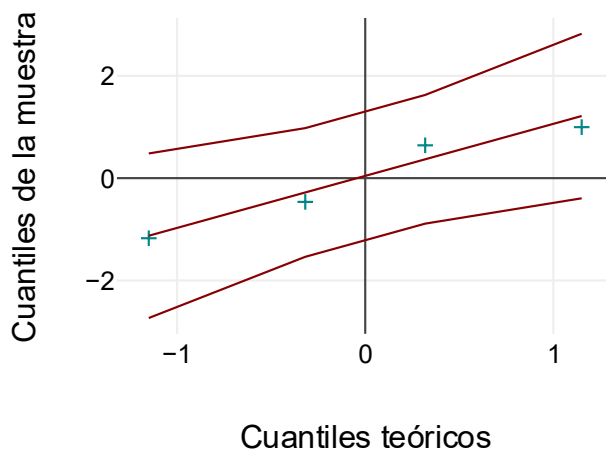


Ilustración 57 - Diagrama cuantil-cuantil UCIP intervención UV-C + fotocatalisis (CO₂).

Fuente: Autoría propia.

Debido a que no todos los grupos de datos cumplen una distribución normal, se procedió a realizar una prueba no paramétrica, específicamente la de Kruskal-Wallis (*Tabla 40*).

Tabla 40 - Prueba de Kruskal - Wallis UCIP (CO₂).

	Chi2	df	p
Tipo de intervención	9.88	2	0.007

Fuente: Autoría propia.

De igual manera a lo observado en las pruebas realizadas en el cubículo 7 de la sección anterior, se obtuvo un resultado que respalda que puede existir una diferencia significativa al menos entre dos grupos. Para verificar esta diferencia se aplicó una prueba Dunn – Bonferroni (*Tabla 41*).

Tabla 41 - Prueba Post hoc UCIP (CO₂).

Prueba	Relación	Valor F	Valor p ajustado
Bonferroni	A ↔ B	N/A	0.348
	A ↔ C	N/A	0.005
	B ↔ C	N/A	0.348

Fuente: Autoría propia.

Nota*: se aplicó la siguiente nomenclatura para los escenarios experimentales: Sin intervención = A, intervención UV-C = B, intervención UV-C + fotocátalisis = C.

Los resultados de una comparación entre los distintos pares de conjunto de datos mostraron que existe una diferencia significativa entre los datos recogidos cuando se existía ninguna intervención versus cuando se aplicó la intervención completa que es capaz de ofrecer el prototipo (UV-C + fotocátalisis).

Para corroborar la clase de prueba que se puede aplicar al siguiente conjunto de datos se analizaron sus resultados estadísticos, y la gráfica cuantil-cuantil de cada grupo (*Anexo 34 - 36*), esto dio como resultado que los datos formaban una distribución normal. Por otro lado, las pruebas de Levene ($p = 0.27$) y Brown-Forsythe (0.468) corroboraron la homogeneidad de los datos, por lo tanto, se aplicó una prueba ANOVA.

Una vez comprobado los resultados de la prueba ANOVA unidireccional en la sala UCIP, se procedió a repetir la misma secuencia lógica con el cubículo 7. Obteniendo como resultado un

valor $p < 0.001$. Nuevamente, se rechazó la hipótesis nula. Además, se obtuvo un valor f de 1377.95, lo que ratifica que se alcanzaron diferentes valores entre los grupos (*tabla 42*).

Tabla 42- ANOVA cubículo 7 (CO₂).

	Suma de cuadrados	df	Cuadrados medios	F	p
Tipo de intervención	139249.5	2	69624.75	1377.95	<0.001
Residual	454.75	9	50.53		
Total	139704.25	11			

Fuente: Autoría propia.

Se aplicaron pruebas post HOC, obteniendo resultados que comprueban que los grupos por pares son diferentes entre sí, lo que sugiere que el prototipo tiene un impacto significativo en la mejora de la calidad del aire interior (*tabla 43*).

Tabla 43- Pruebas Post hoc cubículo 7 CO₂

Prueba	Relación	Valor F	Valor p
Bonferroni	A ↔ B	N/A	<0.001
	A ↔ C	N/A	<0.001
	B ↔ C	N/A	<0.001
Tukey's Test	A ↔ B	N/A	<0.001
	A ↔ C	N/A	<0.001
	B ↔ C	N/A	<0.001
Scheffe Test	A ↔ B	1402.72	N/A
	A ↔ C	2558.71	N/A
	B ↔ C	172.42	N/A
Prueba de la mínima diferencia significativa de Fisher	A ↔ B	N/A	<0.001
	A ↔ C	N/A	<0.001
	B ↔ C	N/A	<0.001

Fuente: Autoría propia.

Por último, el análisis de normalidad (*Anexo 37 - 39*) dieron como resultados valores positivos para indicar que existe una distribución normal de los datos. Sin embargo, aunque la prueba de Brown-Forsythe ($p = 0.064$) dio un valor superior a 0.05, la prueba de Levene ($p = 0.04$) no, por lo que no se logró confirmar que exista homogeneidad entre los datos, por lo que en este caso se consideró aplicar una prueba ANOVA de Welch (*Tabla 44*).

Tabla 44 - Prueba ANOVA de Welch C8 (CO₂).

	F	df1	df2	p
Prueba de Welch	425.1	2	5.397	< 0.001

Fuente: Autoría propia.

La prueba demostró que existía diferencias significativas entre los tres conjuntos de datos. Sin embargo, con la intención de corroborar esta significancia evaluando los distintos grupos de pares, se realizaron las cuatro pruebas Post hoc convencionales (Tabla 45).

Tabla 45- Pruebas HOC cubículo 8 (CO₂).

Prueba	Relación	Valor F	Valor p
Bonferroni	A ↔ B	N/A	0.008
	A ↔ C	N/A	<0.001
	B ↔ C	N/A	<0.001
Tukey's Test	A ↔ B	N/A	<0.007
	A ↔ C	N/A	<0.001
	B ↔ C	N/A	<0.001
Scheffe Test	A ↔ B	16.87	N/A
	A ↔ C	233.58	N/A
	B ↔ C	124.89	N/A
Prueba de la mínima diferencia significativa de Fisher	A ↔ B	N/A	0.003
	A ↔ C	N/A	<0.001
	B ↔ C	N/A	<0.001

Fuente: Autoría propia.

Nota*: se aplicó la siguiente nomenclatura para los escenarios experimentales: Sin intervención = A, intervención UV-C = B, intervención UV-C + fotocatalisis = C.

Los resultados reflejan diferencias significativas entre todos los grupos de pares, observándose solamente un resultado no concordante con los demás. A pesar de esto, se aprecia una clara diferencia entre los datos tomados sin ningún tipo de intervención con respecto a los datos que se tomaron con el prototipo completo.

VI. DISCUSIÓN

A diferencia de trabajos como los de Nunayon et al. (2020), Abidi et al. (2025) o Abdelkader et al. (2025), en los que las pruebas se realizaron exclusivamente en entornos simulados o cámaras controladas, este estudio logró evaluar el prototipo directamente en un entorno hospitalario real. Esta aplicación en campo brinda una mayor validez externa a los resultados y permite evaluar el comportamiento del sistema en situaciones auténticas ante presencia de personas y dinámica clínica.

Se abordaron limitaciones presentes en estudios previos, como los de de Souza et al. (2022) o Qiao et al. (2021), quienes no realizaron pruebas biológicas directas. En este estudio, además de medir contaminantes gaseosos (TCOV, HCHO y CO₂), se efectuó un recuento microbiológico mediante placas de Petri, permitiendo evaluar la eficacia del prototipo tanto en aspectos químicos como biológicos. También se tomó en cuenta la limitante señalada por Lee et al. (2021) al utilizar lámparas UV-C libres de ozono, lo que favorece una posible aplicación a gran escala. Sin embargo, persisten limitaciones técnicas similares a las reportadas por Biasin et al. (2021), relacionadas con el tipo y concentración de cultivos utilizados.

El proyecto enfrentó limitaciones tanto en el diseño e implementación como en la toma de muestras y mediciones clave. Aunque se intentó tener un espacio controlado lo suficientemente grande, no se replicaron completamente las condiciones reales de flujo y carga microbiana que podrían presentarse en un ducto de ventilación. Además, la prueba fue de corta duración, lo que impide evaluar el desempeño a largo plazo, y no se consideraron factores ambientales como la variabilidad de la temperatura y humedad, lo que podría afectar su eficacia en aplicaciones de largo plazo.

Finalmente, y con respecto a la cantidad de datos recogidos, la toma de muestra microbiológica se vio comprometida debido al alto costo monetario que estas influyen. Cabe destacar que estas no fueron las únicas limitantes o adversidades que se dieron a través del proceso que significó el proyecto, sin embargo, fueron las que más influyeron o afectaron directamente a los resultados.

VII. CONCLUSIONES

- Se desarrolló un prototipo con una configuración basada en flujos que recorren a velocidades de 0.168 m/s y 0.224 m/s irradiados por dos lámparas UV-C de 6 watts a distancias cortas (5cm, 6cm, y 7cm), permitiendo suficiente dosis de radiación para eliminar microorganismos aéreos (1 – 10 mJ/cm²). Asimismo, se incluyó la instalación de una lámpara UV-A con una longitud de onda de 365 nm la cual emite una energía de 3.4 eV por fotón, lo que es suficiente para superar la banda prohibida del dióxido de titanio, y así, generar el efecto de la fotocatalisis, encargado de degradar los COV. De esta manera se logró un efecto sinérgico multi-banda UV.
- Se obtuvieron diferencias significativas ($p < 0.001$) entre los pares de datos obtenidos a través de la intervención únicamente con las lámparas UV-C en comparación con la intervención del prototipo completo (UV – C + fotocatalisis) en el tratamiento de los TCOV. Apreciándose una presencia mayor en el primer sistema descrito ($\bar{x} = 0.57800, 0.06625, 0.19225$) con respecto al segundo ($\bar{x} = 0.09925, 0.031000, 0.06900$) en las salas UCIP, cubículo 7 y cubículo 8 respectivamente.
- Al aplicar la intervención completa (Irradiación UV-C + fotocatalisis) se observaron reducciones del 86.19%, 81.68% y 69.87% totales de TCOV, en las tres salas evaluadas. Esta diferencia significativa se comprobó, además, por medio de distintas pruebas de estadística inferencial aplicadas a cada sala analizada ($p < 0.001$). Asimismo, con la variable HCHO, se observaron reducciones del 83.40%, 81.18% y 72.94% al aplicarse el prototipo. De igual manera, se corroboró que existía diferencias significativas de los datos ($p < 0.005$).
- Se obtuvo una reducción del 66.67% y 100% de la presencia de bacterias aerobias en la sala UCIP, y cubículo 8 respectivamente, al aplicar únicamente la intervención de las lámparas UV-C. Por otro lado, con la intervención del sistema en su totalidad se vio una reducción del 100% en ambas salas. En el recuento de levaduras se vio

un patrón similar, con la intervención UV-C hubo una reducción del 80% y 100% en las salas UCIP y cubículo 8 respectivamente. Y al aplicarse la intervención UV-C + fotocátalisis se dio una reducción del 100% en ambas salas.

VIII. RECOMENDACIONES

Con la intención de exponer las limitaciones identificadas en este proyecto, en primer lugar, se recomienda la adquisición de un equipo especializado para la medición precisa de la irradiancia UV, esto se considera fundamental debido a que es una variable que afecta directamente a la dosis de radiación UV que recibe el flujo en tratamiento, por lo que contar con un equipo así mejoraría considerablemente las estimaciones realizadas y permitiría una mejor configuración, ya sea en el número, la colocación o la potencia de las lámparas adquiridas.

Además, el uso de materiales alternativos para la fotocátalisis también podría suponer un tema de interés a abordar, comparando así la efectividad entre distintos materiales, o incluso, comparar combinaciones de dióxido de titanio dopado, que permitan así, mejorar la eficiencia bajo diferentes longitudes de onda UV.

Con respecto a la logística, se sugiere ampliar el número de muestras y salas evaluadas, de esta manera se permitiría obtener resultados más representativos y robustos, fortaleciendo la validez del prototipo. Sería especialmente útil realizar ensayos en entornos hospitalarios con distintas condiciones de calidad del aire, incluyendo aquellos donde los estándares de limpieza y esterilización pueden ser más variables, ya que esto permitirá evaluar el desempeño del sistema en escenarios más exigentes o desafiantes.

Finalmente, en cuanto a las configuraciones técnicas, se recomienda llevar a cabo la instalación del prototipo en un ducto de ventilación real dentro de un entorno hospitalario. Esto permitiría obtener un análisis más representativo y aplicado sobre el desempeño de un sistema basado en irradiación UV-C combinada con fotocátalisis, evaluando su efectividad en la mejora de la calidad de aire interior a escala de sala o incluso todo un entorno hospitalario.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelkader, M., Assadi, A. A., Guiza, M., Elfalleh, W., Khezami, L., Tahraoui, H., Baaloudj, O., Mouni, L., Zhang, J., & Amrane, A. (2025). Photocatalytic Degradation of Pollutants in Air Streams Using Luminous Textiles Under Ultraviolet Light Illumination: A Pilot-Scale Remediation Study. *Catalysts*, 15(3), 262. <https://doi.org/10.3390/catal15030262>
- Abidi, M., Assadi, A. A., Aouida, S., Tahraoui, H., Khezami, L., Zhang, J., Amrane, A., & Hajjaji, A. (2025). Photocatalytic Activity of Cu₂O-Loaded TiO₂ Heterojunction Composites for the Simultaneous Removal of Organic Pollutants and Bacteria in Indoor Air. *Catalysts*, 15(4), 360. <https://doi.org/10.3390/catal15040360>
- Al Hallak, M., Verdier, T., Bertron, A., Castelló Lux, K., El Atti, O., Fajerweg, K., Fau, P., Hot, J., Roques, C., & Bailly, J.-D. (2023). Comparison of Photocatalytic Biocidal Activity of TiO₂, ZnO and Au/ZnO on Escherichia coli and on Aspergillus niger under Light Intensity Close to Real-Life Conditions. *Catalysts*, 13(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/catal13071139>
- Alhussain, H., Ghani, S., & Eltai, N. O. (2024). Breathing Clean Air: Navigating Indoor Air Purification Techniques and Finding the Ideal Solution. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 21(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/ijerph21081107>
- Almaie, S., Vatanpour, V., Rasoulifard, M. H., & Koyuncu, I. (2022). Volatile organic compounds (VOCs) removal by photocatalysts: A review. *Chemosphere*, 306, 135655. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135655>

- Al-Rawi, M., Lazonby, A., & Smith, C. (2022). Prototyping a low-cost residential air quality device using ultraviolet germicidal irradiation (UVGI) light. *HardwareX*, *11*, e00251.
<https://doi.org/10.1016/j.ohx.2021.e00251>
- Al-Rikabi, I. J., Karam, J., Alsaad, H., Ghali, K., Ghaddar, N., & Voelker, C. (2024). The impact of mechanical and natural ventilation modes on the spread of indoor airborne contaminants: A review. *Journal of Building Engineering*, *85*, 108715.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108715>
- ANSYS. (s/f). *Ansys Fluent | Fluid Simulation Software*. Recuperado el 1 de mayo de 2025, de <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>
- Bai, Y., Zhao, Y., Li, Y., Xu, J., Fu, X., Gao, X., Mao, X., & Li, Z. (2020). UV-shielding alginate films crosslinked with Fe³⁺ containing EDTA. *Carbohydrate Polymers*, *239*, 115480.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115480>
- Biasin, M., Bianco, A., Pareschi, G., Cavalleri, A., Cavatorta, C., Fenizia, C., Galli, P., Lessio, L., Lualdi, M., Tombetti, E., Ambrosi, A., Redaelli, E. M. A., Saulle, I., Trabattoni, D., Zanutta, A., & Clerici, M. (2021). UV-C irradiation is highly effective in inactivating SARS-CoV-2 replication. *Scientific Reports*, *11*(1), 6260. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85425-w>
- Bonadonna, L., Briancesco, R., Coccia, A. M., Meloni, P., Rosa, G. L., & Moscato, U. (2021). Microbial Air Quality in Healthcare Facilities. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/ijerph18126226>
- Bono, N., Ponti, F., Punta, C., & Candiani, G. (2021). Effect of UV Irradiation and TiO₂-Photocatalysis on Airborne Bacteria and Viruses: An Overview. *Materials*, *14*(5), 1075.
<https://doi.org/10.3390/ma14051075>

- Braggion, A., Dugerdil, A., Wilson, O., Hovagemyan, F., & Flahault, A. (2023). Indoor Air Quality and COVID-19: A Scoping Review. *Public Health Reviews, 44*, 1605803.
<https://doi.org/10.3389/phrs.2023.1605803>
- Cattai, F., D’Orazio, A., & Sbardella, G. (2023). A Systematic Review on the Application of Ultraviolet Germicidal Irradiation to HVAC Systems. *Energies, 16*(22), Article 22.
<https://doi.org/10.3390/en16227569>
- Chakravorty, A., & Roy, S. (2024). A review of photocatalysis, basic principles, processes, and materials. *Sustainable Chemistry for the Environment, 8*, 100155.
<https://doi.org/10.1016/j.scenv.2024.100155>
- COOSPIDER UV. (s/f). *Amazon.com: Coospider—Lámpara desinfectante de 6 W sin ozono, 253.7 nm con cable y enchufe, lámpara UVC para zapatos/armario/gabinete/baño 110V CTUV-6: Productos para Animales*. Recuperado el 1 de mayo de 2025, de
<https://www.amazon.com/COOSPIDER-UV-Lamp-lamp-Ozone/dp/B0B5CV9PB5?th=1>
- da Costa Filho, B. M., & Vilar, V. J. P. (2020). Strategies for the intensification of photocatalytic oxidation processes towards air streams decontamination: A review. *Chemical Engineering Journal, 391*, 123531. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123531>
- de Souza, S. O., Cardoso, A. A., Sarmento, A. S. C., & d’Errico, F. (2022). Effectiveness of a UVC air disinfection system for the HVAC of an ICU. *European Physical Journal Plus, 137*(1), 37.
<https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-02240-y>
- do Nascimento, J. P. M., dos Santos, R., dos Santos Silva, M. S., de Araújo, M. A., Anhezini, L., dos Santos, D. É., & da Silva-Filho, E. A. (2023). Indoor Air Contamination by Yeasts in

Healthcare Facilities: Risks of Invasive Fungal Infection. *Aerobiology*, 1(1), Article 1.

<https://doi.org/10.3390/aerobiology1010002>

Greco, E., De Spirt, A., Miani, A., Piscitelli, P., Trombin, R., Barbieri, P., & Marin, E. (2025).

Nanomaterials in Photocatalysis: An In-Depth Analysis of Their Role in Enhancing Indoor Air Quality. *Applied Sciences*, 15(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/app15031629>

Hernández-Sampieri, & Mendoza. (2018). *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta.*

Herrmann, S., Hirschwald, L. T., Heidmann, K. H., Linkhorst, J., & Wessling, M. (2024). Lab-scale tubular LED UV reactor for continuous photocatalysis. *HardwareX*, 17, e00506.

<https://doi.org/10.1016/j.ohx.2023.e00506>

Hypool. (s/f). *Amazon.com: Hypool Luz negra de 365nm para resina que cura el accesorio de tira con el bulbo de T5 6W, enchufe e interruptor F6T5 tubos fluorescentes de la lámpara:*

Herramientas y Mejoras del Hogar. Recuperado el 1 de mayo de 2025, de

[https://www.amazon.com/Hypool-Curing-Fixture-Switch-](https://www.amazon.com/Hypool-Curing-Fixture-Switch-Fluorescent/dp/B0BX5KL4Q8/ref=sr_1_13_sspa?crd=IBF9BAMPZXLK&dib=eyJ2IjojMSJ9.Pq0X6QfxmXcUzLKZVvfOrM2YmePrteUxc2FBacCwgy69Vd4oro9SINuZDyz653_j5g80gl54S)

[Fluorescent/dp/B0BX5KL4Q8/ref=sr_1_13_sspa?crd=IBF9BAMPZXLK&dib=eyJ2IjojMSJ9.](https://www.amazon.com/Hypool-Curing-Fixture-Switch-Fluorescent/dp/B0BX5KL4Q8/ref=sr_1_13_sspa?crd=IBF9BAMPZXLK&dib=eyJ2IjojMSJ9.Pq0X6QfxmXcUzLKZVvfOrM2YmePrteUxc2FBacCwgy69Vd4oro9SINuZDyz653_j5g80gl54S)

[Pq0X6QfxmXcUzLKZVvfOrM2YmePrteUxc2FBacCwgy69Vd4oro9SINuZDyz653_j5g80gl54S](https://www.amazon.com/Hypool-Curing-Fixture-Switch-Fluorescent/dp/B0BX5KL4Q8/ref=sr_1_13_sspa?crd=IBF9BAMPZXLK&dib=eyJ2IjojMSJ9.Pq0X6QfxmXcUzLKZVvfOrM2YmePrteUxc2FBacCwgy69Vd4oro9SINuZDyz653_j5g80gl54S)

[F-8JZZQaT6V-RMeeUjCXo8hUWyfcsaNFXFAnAS46cZDyilAA-zMHXI-2nB2-](https://www.amazon.com/Hypool-Curing-Fixture-Switch-Fluorescent/dp/B0BX5KL4Q8/ref=sr_1_13_sspa?crd=IBF9BAMPZXLK&dib=eyJ2IjojMSJ9.Pq0X6QfxmXcUzLKZVvfOrM2YmePrteUxc2FBacCwgy69Vd4oro9SINuZDyz653_j5g80gl54S)

[f1A8MP9neTa29izo2TPr9kUmt7Le-](https://www.amazon.com/Hypool-Curing-Fixture-Switch-Fluorescent/dp/B0BX5KL4Q8/ref=sr_1_13_sspa?crd=IBF9BAMPZXLK&dib=eyJ2IjojMSJ9.Pq0X6QfxmXcUzLKZVvfOrM2YmePrteUxc2FBacCwgy69Vd4oro9SINuZDyz653_j5g80gl54S)

[guuf6g2byhvaDdc1psCsBBxRTgVfcCsaGa0k0Gvl6XQ1HGQe-](https://www.amazon.com/Hypool-Curing-Fixture-Switch-Fluorescent/dp/B0BX5KL4Q8/ref=sr_1_13_sspa?crd=IBF9BAMPZXLK&dib=eyJ2IjojMSJ9.Pq0X6QfxmXcUzLKZVvfOrM2YmePrteUxc2FBacCwgy69Vd4oro9SINuZDyz653_j5g80gl54S)

[IEUD0qsiPQKiaH4x3J2fOCWOaqSGYqRG2_-63Kd8p91I_df_WMCMtPU2uwSttvi4duz-OW-](https://www.amazon.com/Hypool-Curing-Fixture-Switch-Fluorescent/dp/B0BX5KL4Q8/ref=sr_1_13_sspa?crd=IBF9BAMPZXLK&dib=eyJ2IjojMSJ9.Pq0X6QfxmXcUzLKZVvfOrM2YmePrteUxc2FBacCwgy69Vd4oro9SINuZDyz653_j5g80gl54S)

[6jeJ71ld-8QV07FYQ.Hprx71HeYEw-HWUf608_ad-](https://www.amazon.com/Hypool-Curing-Fixture-Switch-Fluorescent/dp/B0BX5KL4Q8/ref=sr_1_13_sspa?crd=IBF9BAMPZXLK&dib=eyJ2IjojMSJ9.Pq0X6QfxmXcUzLKZVvfOrM2YmePrteUxc2FBacCwgy69Vd4oro9SINuZDyz653_j5g80gl54S)

[kLsWfFdKEFQaY3_Jwdjw&dib_tag=se&keywords=365%2Bnm%2Buv%2Blight&qid=1746](https://www.amazon.com/Hypool-Curing-Fixture-Switch-Fluorescent/dp/B0BX5KL4Q8/ref=sr_1_13_sspa?crd=IBF9BAMPZXLK&dib=eyJ2IjojMSJ9.Pq0X6QfxmXcUzLKZVvfOrM2YmePrteUxc2FBacCwgy69Vd4oro9SINuZDyz653_j5g80gl54S)

126831&sprefix=365%2Bnm%2B%2Caps%2C150&sr=8-13-
spons&sp_csd=d2lkZ2V0TmFtZT1zcF9tdGY&th=1

Kayani, Z. N., Intizar, T., Riaz, S., & Naseem, S. (2021). Antibacterial, magnetic and dielectric properties of nano-structured V doped TiO₂ thin films deposited by dip coating technique. *Materials Chemistry and Physics*, 267, 124659.

<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124659>

Kisand, V., Visnapuu, M., Rosenberg, M., Danilian, D., Vlassov, S., Kook, M., Lange, S., Pärna, R., & Ivask, A. (2022). Antimicrobial Activity of Commercial Photocatalytic SaniTise™ Window Glass. *Catalysts*, 12(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/catal12020197>

Lai, P.-Y., Liu, H., Ng, R. J. H., Wint Hnin Thet, B., Chu, H.-S., Teo, J. W. R., Ong, Q., Liu, Y., & Png, C. E. (2021). Investigation of SARS-CoV-2 inactivation using UV-C LEDs in public environments via ray-tracing simulation. *Scientific Reports*, 11(1), 22612.

<https://doi.org/10.1038/s41598-021-02156-8>

Lapedes, D. N. (1981). *Diccionario de términos científicos y técnicos* McGraw-Hill. Marcombo.

Lee, M., Koziel, J. A., Murphy, W., Jenks, W. S., Chen, B., Li, P., & Banik, C. (2021). Evaluation of TiO₂ Based Photocatalytic Treatment of Odor and Gaseous Emissions from Swine Manure with UV-A and UV-C. *Animals*, 11(5), Article 5.

<https://doi.org/10.3390/ani11051289>

Li, J., Li, X., Wang, Y., Liu, J., Hu, B., Zhang, Y., Zhang, S., & Li, B. (2024). Dip-assembling of robust photocatalytic superamphiphobic coatings for multiple self-cleaning and anti-fouling.

Chemical Engineering Journal, 501, 157635. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.157635>

- Li, Y., Chen, X., Wang, Y., & Zhang, Y. (2024). Effects of environmental factors, measurement and modeling for germicidal efficiency of in-duct ultraviolet germicidal irradiation system. *Energy and Built Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2024.03.006>
- Luo, H., & Zhong, L. (2021). Ultraviolet germicidal irradiation (UVGI) for in-duct airborne bioaerosol disinfection: Review and analysis of design factors. *Building and Environment*, 197, 107852. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107852>
- Luo, H., & Zhong, L. (2024). Investigating the effects of particle size and relative humidity on bioaerosol disinfection in an in-duct ultraviolet germicidal irradiation system. *Building and Environment*, 261, 111752. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111752>
- Luo, J., Fan, J., Song, B., Wen, Y., Wang, X., Zhang, L., Yao, Y., Xiang, X., Zhu, X., & Shi, Y. (2025). 4D Printing of Reconfigurable Acoustic Metamaterials with Multiband Low-Frequency Absorption. *Additive Manufacturing Frontiers*, 4(1), 200183. <https://doi.org/10.1016/j.amf.2024.200183>
- Ma, T., Wang, X., He, W., Zhang, G., Shan, T., Song, X., Yang, X., Ma, J., Chen, L., Niu, P., & Chen, T. (2024). Expose to volatile organic compounds is associated with increased risk of depression: A cross-sectional study. *Journal of Affective Disorders*, 363, 239–248. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2024.07.028>
- Maggos, T., Binas, V., Panagopoulos, P., Skliri, E., Theodorou, K., Nikolakopoulos, A., Kiriakidis, G., Giama, E., Chantzis, G., & Papadopoulos, A. (2024). Improvement of Buildings' Air Quality and Energy Consumption Using Air Purifying Paints. *Applied Sciences*, 14(14), Article 14. <https://doi.org/10.3390/app14145997>

- Negishi, N., Yamano, R., Hori, T., Koura, S., Maekawa, Y., & Sato, T. (2023). Development of a high-speed bioaerosol elimination system for treatment of indoor air. *Building and Environment*, 227, 109800. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109800>
- Novra Gabriela, R., Heryanto, H., & Tahir, D. (2025). Nanocomposite TiO₂/ZnO/chitosan by method sol-gel for self-cleaning application. *International Journal of Biological Macromolecules*, 298, 140076. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.140076>
- Nunayon, S. S., Zhang, H. H., & Lai, A. C. K. (2020a). A novel upper-room UVC-LED irradiation system for disinfection of indoor bioaerosols under different operating and airflow conditions. *Journal of Hazardous Materials*, 396, 122715. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122715>
- Nunayon, S. S., Zhang, H., & Lai, A. C. K. (2020b). Comparison of disinfection performance of UVC-LED and conventional upper-room UVGI systems. *Indoor Air*, 30(1), 180–191. <https://doi.org/10.1111/ina.12619>
- Nyembwe, J.-P. K. B., Munanga, J. K., Simões, N., & da Silva, M. G. (2024). Ventilation Strategies to Mitigate Air Pollution Impact on Hospital Professionals in Intensive Care Units in the Democratic Republic of Congo. *Buildings*, 14(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/buildings14071996>
- Pantai. (s/f). *Amazon.com: Dióxido de titanio TiO₂ (PTR-620) de 0.5 lb/8 oz.: Arte y Manualidades*. Recuperado el 1 de mayo de 2025, de [https://www.amazon.com/-/es/Di%C3%B3xido-titanio-TiO₂-PTR-620-0-5/dp/B015OS95U8/ref=sr_1_3?__mk_es_US=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crd=18LSJM2VXYV1S&dib=eyJ2IjojMSJ9.IvVG9R9I4hu1Voiam3DQO4x6jirAboHSb7R](https://www.amazon.com/-/es/Di%C3%B3xido-titanio-TiO2-PTR-620-0-5/dp/B015OS95U8/ref=sr_1_3?__mk_es_US=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crd=18LSJM2VXYV1S&dib=eyJ2IjojMSJ9.IvVG9R9I4hu1Voiam3DQO4x6jirAboHSb7R)

_jrU_6mUo3QFmbX3BcbfJj3kcief4H8H2LImRZTz4PS2ihfUUHoQ_OLiQIyQDDOzEL8JCmyr
m-l6xPE9TJRWxbASoNvYgCuxTLVMiET_WCg7NBJ-hG8UTYudSXQEDmm-
XgWvSPZvWdvMqSLtfEaGxRk6xIhBqXYft-pnHBIhuEa0PK03Es5g37oZmeZp1S8-
fzEX_Nz8Ofhz2AjKm_aPMJ9fle516GqBfIXcdRCPVa-
XK3TF9IyDNmOOq4YcN5vr2InczrM.9glBchZZy2na6jEbdJykQOx65_t71cZcwPbKzPn10Mo
&dib_tag=se&keywords=TIO2&qid=1746139643&sprefix=tio2%2Caps%2C566&sr=8-
3&th=1

Pedraza-Soto, A. M., Lucena, R., & Cárdenas, S. (2025). Silica microparticles as guiding substrates for the fabrication of polyamide-coated stainless-steel sheets by dip-coating technique: Application to the determination of opioids in saliva samples by direct infusion mass spectrometry. *Analytica Chimica Acta*, 1348, 343814.

<https://doi.org/10.1016/j.aca.2025.343814>

Qiao, Y., Yang, M., Marabella, I. A., McGee, D. A. J., Aboubakr, H., Goyal, S., Hogan, C. J., Olson, B. A., & Torremorell, M. (2021). Greater than 3-Log Reduction in Viable Coronavirus Aerosol Concentration in Ducted Ultraviolet-C (UV-C) Systems. *Environmental Science & Technology*, 55(7), 4174–4182. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05763>

Qiu, Z., Xu, Z., Chen, W., Ma, X., Qin, Q., Wu, L., Wang, S., Hong, Q., & Li, L. (2025). High-performance TiO₂ UV photodetectors with improved response time achieved through sol-gel synthesis and PDMS surface passivation. *Optical Materials*, 162, 116905.

<https://doi.org/10.1016/j.optmat.2025.116905>

Raymond-Lezman, J. R., & Riskin, S. I. (2023). Benefits and Risks of Sun Exposure to Maintain Adequate Vitamin D Levels. *Cureus*, 15(5), e38578. <https://doi.org/10.7759/cureus.38578>

- Rokicka-Konieczna, P., & Morawski, A. W. (2024). Photocatalytic Bacterial Destruction and Mineralization by TiO₂-Based Photocatalysts: A Mini Review. *Molecules*, 29(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/molecules29102221>
- Ruwan Jayakantha, D. N. P., Bandara, H. M. N., Gunawardana, N. M., Jayantha Rajapakse, R. P. V., Thilakarathne, D. S., Comini, E., Gunawardhana, N., & Karunarathne, S. M. M. L. (2022). Design and construction of a low cost air purifier for killing harmful airborne microorganisms using a combination of a strong multi-directional electric-field and an ultra violet light. *HardwareX*, 11, e00279. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00279>
- Saffell, J., & Nehr, S. (2023). Improving Indoor Air Quality through Standardization. *Standards*, 3(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/standards3030019>
- Sakellaris, I., Saraga, D., Mandin, C., de Kluizenaar, Y., Fossati, S., Spinazzè, A., Cattaneo, A., Mihucz, V., Szigeti, T., de Oliveira Fernandes, E., Kalimeri, K., Mabilia, R., Carrer, P., & Bartzis, J. (2021). Association of subjective health symptoms with indoor air quality in European office buildings: The OFFICAIR project. *Indoor Air*, 31(2), 426–439. <https://doi.org/10.1111/ina.12749>
- Sandri, A., Tessari, A., Giannetti, D., Cetti, A., Lleo, M. M., & Boschi, F. (2023). UV-A Radiation: Safe Human Exposure and Antibacterial Activity. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/ijms24098331>
- Sankurantripati, S., & Duchaine, F. (2024). Indoor Air Quality Control for Airborne Diseases: A Review on Portable UV Air Purifiers. *Fluids*, 9(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/fluids9120281>

- Sliney, D. H., & Stuck, B. E. (2021). A Need to Revise Human Exposure Limits for Ultraviolet UV-C Radiation†. *Photochemistry and Photobiology*, 97(3), 485–492.
<https://doi.org/10.1111/php.13402>
- Song, Y.-W., Kim, S.-E., Yoo, M.-S., & Park, J.-C. (2023). Indoor Air Pollutant (Toluene) Reduction Based on Ultraviolet-A Irradiance and Changes in the Reactor Volume in a TiO₂ Photocatalyst Reactor. *Materials*, 16(19), Article 19. <https://doi.org/10.3390/ma16196399>
- Tang, X., Yang, T., Yu, D., Xiong, H., & Zhang, S. (2024). Current insights and future perspectives of ultraviolet radiation (UV) exposure: Friends and foes to the skin and beyond the skin. *Environment International*, 185, 108535. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108535>
- Tapia-Brito, E., Riffat, J., Wang, Y., Wang, Y., Ghaemmaghami, A. M., Coleman, C. M., Erdinç, M. T., & Riffat, S. (2023). Experimental study of the purification performance of a MopFan-based photocatalytic air cleaning system. *Building and Environment*, 240, 110422.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110422>
- Tran, V. V., Park, D., & Lee, Y.-C. (2020). Indoor Air Pollution, Related Human Diseases, and Recent Trends in the Control and Improvement of Indoor Air Quality. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(8), Article 8.
<https://doi.org/10.3390/ijerph17082927>
- Vardoulakis, S., Giagloglou, E., Steinle, S., Davis, A., Smeuwenhoek, A., Galea, K. S., Dixon, K., & Crawford, J. O. (2020). Indoor Exposure to Selected Air Pollutants in the Home Environment: A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(23), Article 23. <https://doi.org/10.3390/ijerph17238972>

- Wongaree, M., Bootwong, A., Lubphoo, Y., & Khunphonoi, R. (2022). Evaluation of wastewater treatment using CNT/TiO₂ coating on a glass slide by a dip-coating method. *Desalination and Water Treatment*, 245, 217–225.
<https://doi.org/10.5004/dwt.2022.27983>
- Xie, R., Suo, Z., Guo, K., Feng, F., Lan, B., Zhang, T., Li, G., & Huang, H. (2023). Promoting multiple reactive oxygen species generation for deep oxidation of VOCs by UV/persulfate/permanganate. *Separation and Purification Technology*, 325, 124770.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124770>
- Ye, J., Ai, Z., Liu, F., & Wargocki, P. (2025). A critical review of in-duct ultraviolet germicidal irradiation systems: Mechanisms, challenges, and future directions. *Process Safety and Environmental Protection*, 195, 106840. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.106840>
- Yu, W., Liu, S., Sun, H., Wang, J., Yang, Y., & Shen, X. (2025). Multiband adjustment engineering strategy for broadband range in photonic crystals. *Results in Physics*, 68, 108104.
<https://doi.org/10.1016/j.rinp.2024.108104>
- Yu, Z.-W., Zheng, M., Fan, H.-Y., Liang, X.-H., & Tang, Y.-L. (2024). Ultraviolet (UV) radiation: A double-edged sword in cancer development and therapy. *Molecular Biomedicine*, 5(1), 49. <https://doi.org/10.1186/s43556-024-00209-8>
- Yuqi, S., Mamat, M., Baikeli, Y., & Xiaerding, F. (2024). Effects of doping of Sm, Y, Ce and La on crystal structure, phase and photocatalytic performance of TiO₂ powders prepared by sol-gel method. *Physics Letters A*, 525, 129929.
<https://doi.org/10.1016/j.physleta.2024.129929>

Zhang, Y., Wang, Y., Xie, R., Huang, H., Leung, M. K. H., Li, J., & Leung, D. Y. C. (2022).

Photocatalytic Oxidation for Volatile Organic Compounds Elimination: From Fundamental Research to Practical Applications. *Environmental Science & Technology*, 56(23), 16582–16601. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c05444>

ANEXOS

Anexo 1 - Presencia de TVOC en UCIP.

Tipo de escenario experimental	TVOC (mg/m³)
Ninguno	0.712
	0.730
	0.712
	0.720
UV-C	0.587
	0.580
	0.565
	0.580
Prototipo funcional	0.110
	0.115
	0.087
	0.085

Fuente: Autoría propia.

Anexo 2 - Presencia de TVOC en el cubículo 7.

Tipo de escenario experimental	TVOC (mg/m³)
Ninguno	0.175
	0.165
	0.167
	0.170
UV-C	0.060
	0.070
	0.068
	0.067
Prototipo funcional	0.032
	0.030
	0.030
	0.032

Fuente: Autoría propia.

Anexo 3 - Presencia de TVOC en el cubículo 8.

Tipo de escenario experimental	TVOC (mg/m³)
Ninguno	0.272
	0.222
	0.207
	0.215
UV-C	0.185
	0.200
	0.192
	0.192
Prototipo funcional	0.062
	0.072
	0.067
	0.075

Fuente: Autoría propia.

Anexo 4 - Presencia de HCHO en UCIP.

Tipo de escenario experimental	HCHO (mg/m³)
Ninguno	0.225
	0.201
	0.284
	0.236
UV-C	0.236
	0.236
	0.225
	0.225
Prototipo funcional	0.044
	0.044
	0.034
	0.035

Fuente: Autoría propia.

Anexo 5 - Presencia de HCHO en el cubículo 7.

Tipo de escenario experimental	HCHO (mg/m³)
Ninguno	0.069
	0.070
	0.065
	0.067
UV-C	0.020
	0.027
	0.027
	0.023
Prototipo funcional	0.013
	0.013
	0.012
	0.013

Fuente: Autoría propia.

Anexo 6 - Presencia de HCHO en el cubículo 8.

Tipo de escenario experimental	HCHO (mg/m³)
Ninguno	0.118
	0.104
	0.104
	0.110
UV-C	0.073
	0.073
	0.076
	0.076
Prototipo funcional	0.031
	0.031
	0.026
	0.030

Fuente: Autoría propia.

Anexo 7 - Presencia de CO₂ en UCIP.

Tipo de escenario experimental	CO₂ (PPM)
Ninguno	1687
	1719
	1687
	1690
UV-C	1457
	1443
	1415
	1440
Prototipo funcional	579
	588
	533
	551

Fuente: Autoría propia.

Anexo 8 - Presencia de CO₂ en el cubículo 7.

Tipo de escenario experimental	CO₂ (PPM)
Ninguno	699
	680
	685
	689
UV-C	501
	506
	487
	506
Prototipo funcional	437
	432
	432
	435

Fuente: Autoría propia.

Anexo 9 - Presencia de CO₂ en el cubículo 8.

Tipo de escenario experimental	CO ₂ (PPM)
Ninguno	878
	772
	786
	821
UV-C	717
	745
	731
	731
Prototipo funcional	492
	510
	501
	515

Fuente: Autoría propia.

Anexo 10 - Estadística descriptiva UCIP (HCHO).

Tipo de escenario experimental	N	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Varianza	coefVar	Mediana	Asimetría	Curtosis
Sin intervención	4	0.2365	0.0174	0.0349	0.0012	14.75	0.2305	0.96	1.59
Intervención UV-C	4	0.23050	0.00318	0.00635	0.00004	2.76	0.23050	0.00	-6.00
Intervención UV-C+ fotocatalisis	4	0.03925	0.00275	0.00550	0.00003	14.01	0.03950	-0.03	-5.84

Fuente: Autoría propia

Anexo 11 - Estadística descriptiva cubículo 7 (HCHO).

Tipo de escenario experimental	N	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Varianza	coefVar	Mediana	Asimetría	Curtosis
Sin intervención	4	0.06775	0.00111	0.00222	0.00000	3.27	0.06800	-0.48	-1.70
Intervención UV-C	4	0.02425	0.00170	0.00340	0.00001	14.03	0.02500	-0.63	4.00
Intervención UV-C+ fotocatalisis	4	0.012750	0.000250	0.000500	0.000000	3.92	0.013000	-2.00	-5.84

Fuente: Autoría propia

Anexo 12 - Estadística descriptiva cubículo 8 (HCHO).

Tipo de escenario experimental	N	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Varianza	coefVar	Mediana	Asimetría	Curtosis
Sin intervención	4	0.10900	0.00332	0.00663	0.00004	6.09	0.10700	1.10	-0.05
Intervención UV-C	4	0.074500	0.000866	0.001732	0.000003	2.32	0.074500	0.00	-6.00
Intervención UV-C+ fotocatalisis	4	0.02950	0.00119	0.00238	0.00001	8.07	0.03050	-1.78	3.13

Fuente: Autoría propia

Anexo 13 - Estadística descriptiva UCIP (CO₂).

Tipo de escenario experimental	N	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Varianza	coefVar	Mediana	Asimetría	Curtosis
Sin intervención	4	0.2290	7.78	15.6	242.3	0.92	1688.5	1.95	3.83
Intervención UV-C	4	0.19225	8.74	17.5	305.6	1.22	1441.5	-0.90	1.83
Intervención UV-C+ fotocatalisis	4	0.06900	12.7	25.3	641.6	4.50	565.0	-0.31	-3.15

Fuente: Autoría propia.

Anexo 14 - Estadística descriptiva cubículo 7 (CO₂).

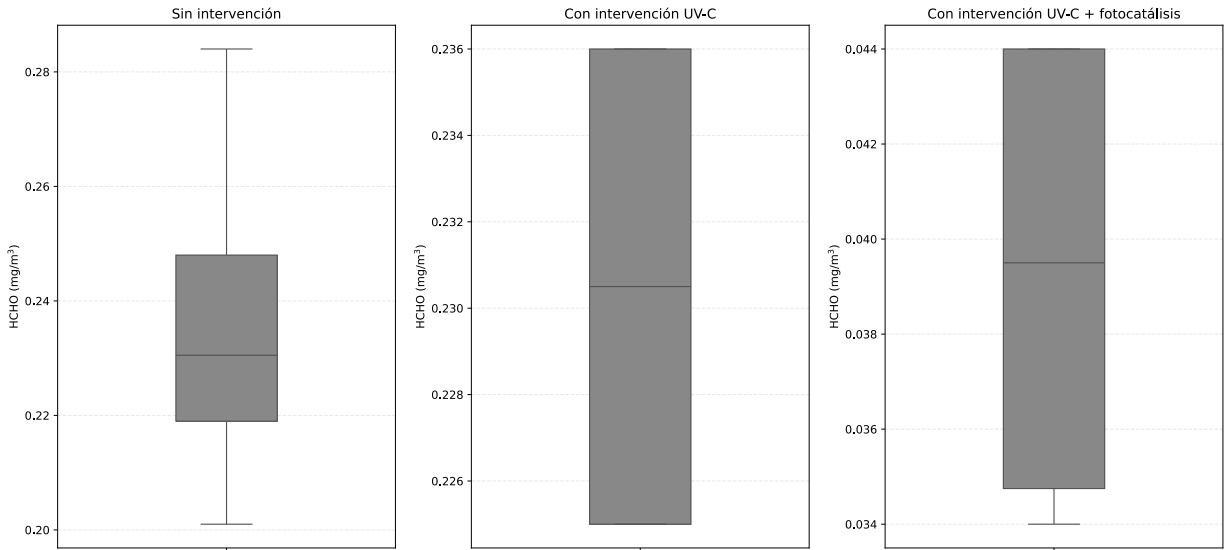
Tipo de escenario experimental	N	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Varianza	coefVar	Mediana	Asimetría	Curtosis
Sin intervención	4	688.25	4.03	8.06	64.92	1.17	687.00	0.82	0.82
Intervención UV-C	4	500.00	4.49	8.98	80.67	1.80	503.50	-1.62	2.46
Intervención UV-C+ fotocatalisis	4	434.00	1.22	2.45	6.00	0.56	433.50	0.54	--2.94

Fuente: Autoría propia

Anexo 15 - Estadística descriptiva cubículo 8 (CO₂).

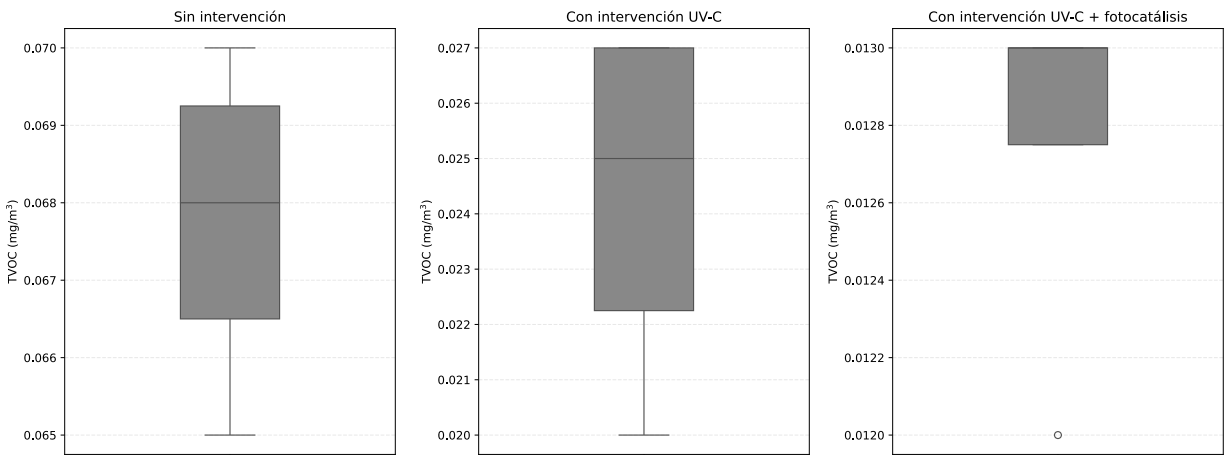
Tipo de escenario experimental	N	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Varianza	coefVar	Mediana	Asimetría	Curtosis
Sin intervención	4	814.3	23.6	47.2	2230.9	5.80	803.5	1.02	0.12
Intervención UV-C	4	731.00	5.72	11.43	130.67	1.56	731.00	0.00	1.50
Intervención UV-C+ fotocatalisis	4	504.50	5.07	10.15	103.00	2.01	505.50	-0.43	-1.68

Fuente: Autoría propia



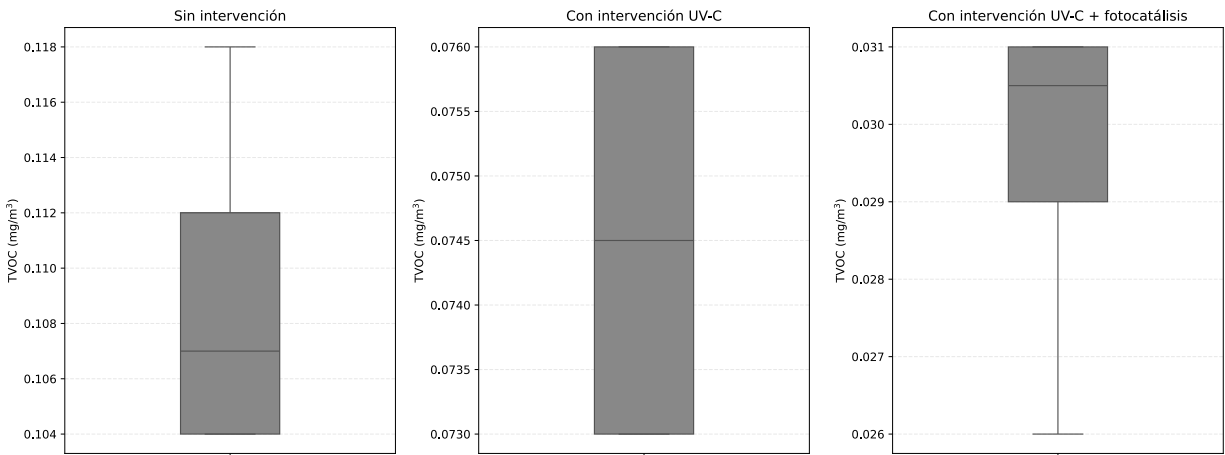
Anexo 16 – Diagrama de caja (Presencia de HCHO en UCIP).

Fuente: Autoría propia.



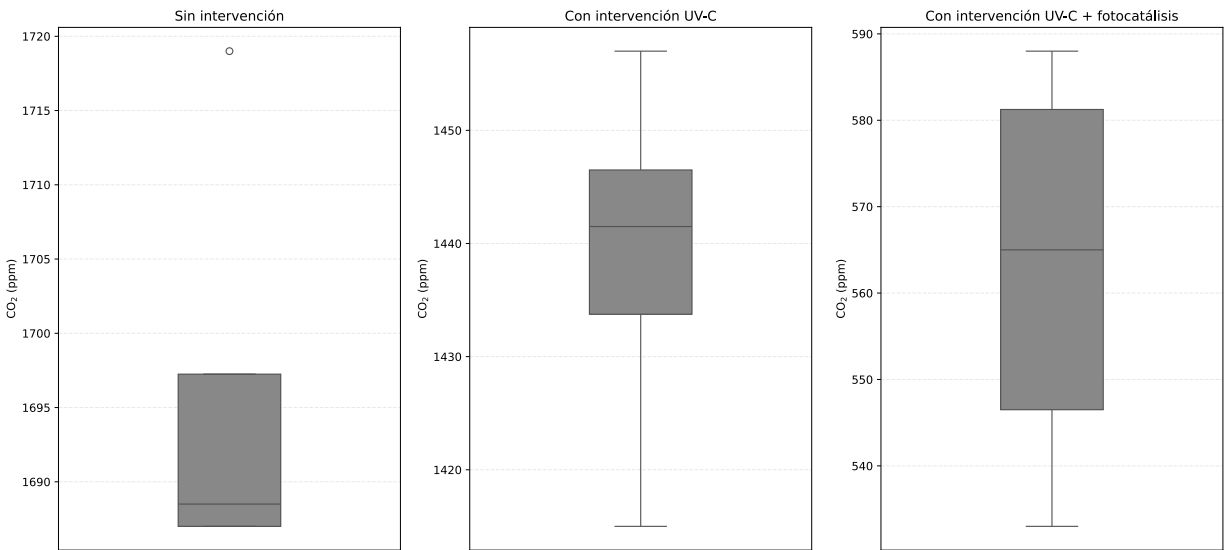
Anexo 17 – Diagrama de caja (Presencia de HCHO en el cubículo 7).

Fuente: Autoría propia.



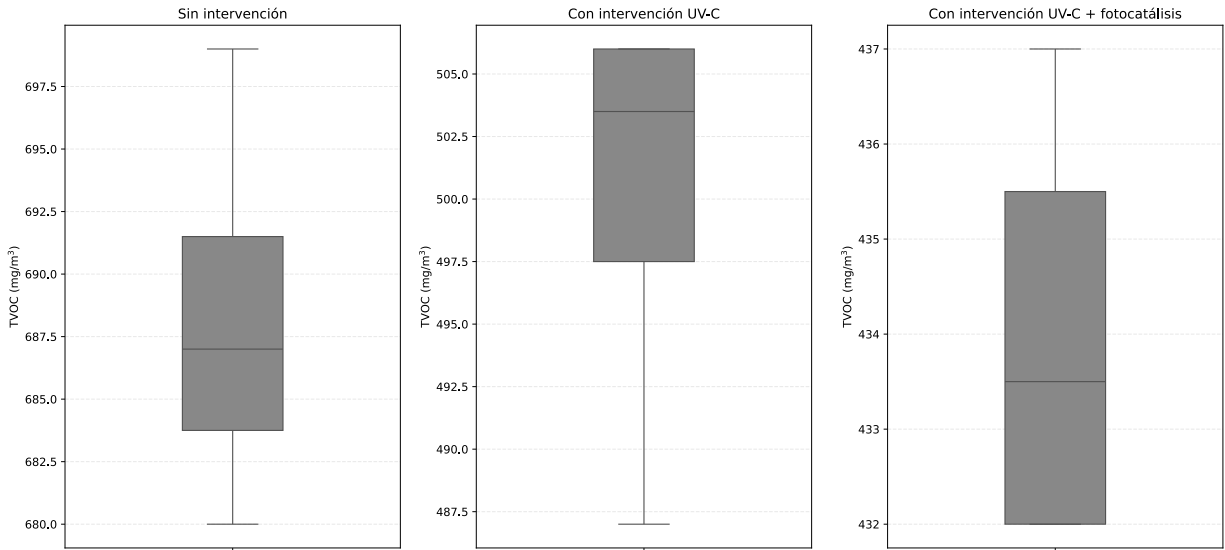
Anexo 18 – Diagrama de caja (Presencia de HCHO en el cubículo 8).

Fuente: Autoría propia.



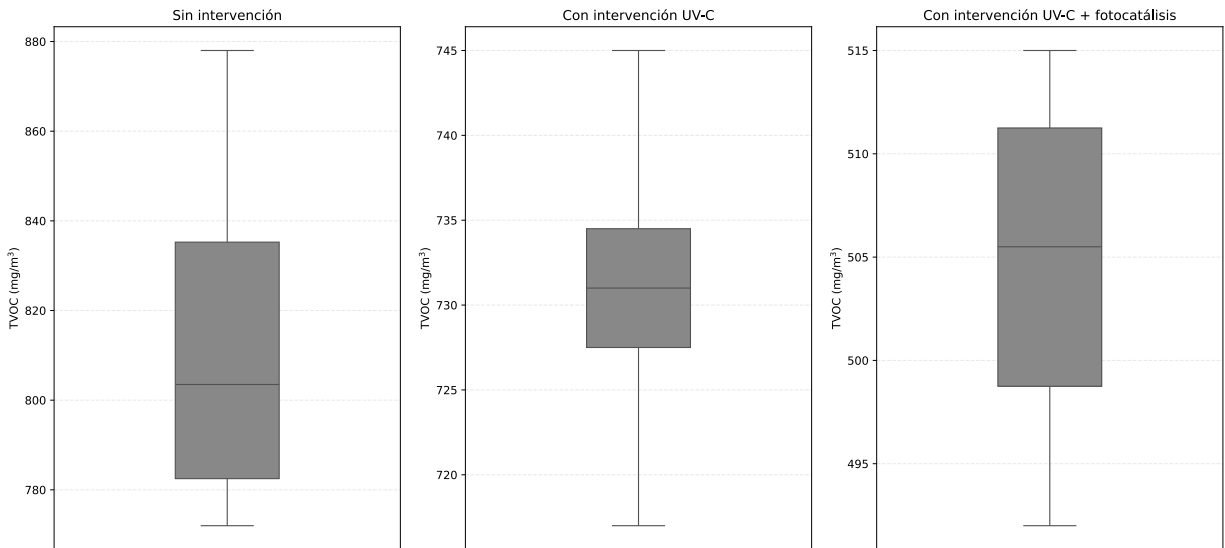
Anexo 19 – Diagrama de caja (Presencia de CO₂ en UCIP).

Fuente: Autoría propia.



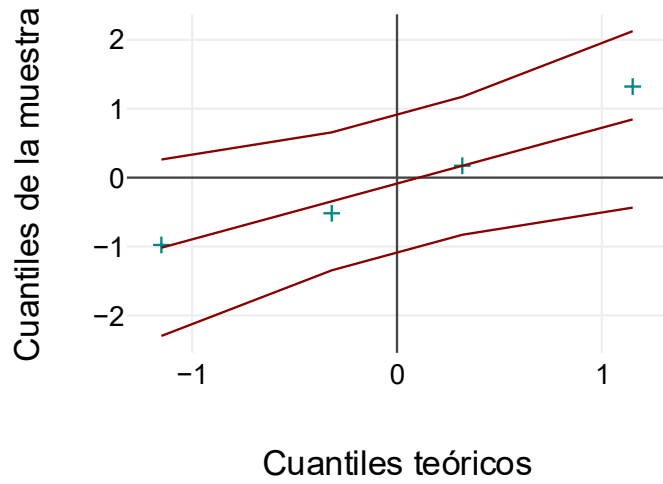
Anexo 20 – Diagrama de caja (Presencia de CO₂ en el cubículo 7).

Fuente: Autoría propia.



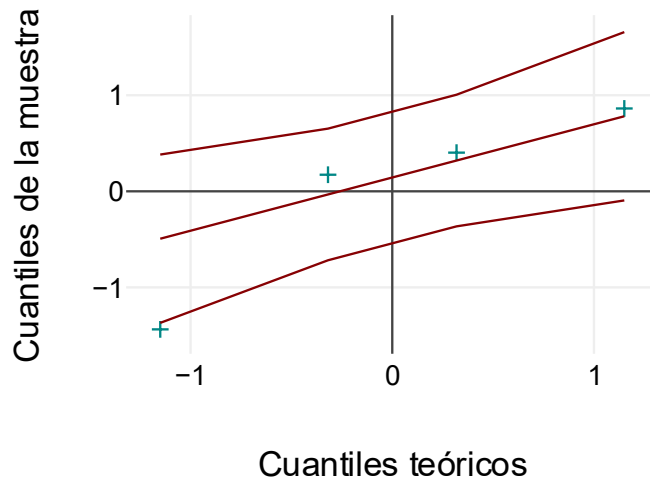
Anexo 21 – Diagrama de caja (Presencia de CO₂ en el cubículo 8).

Fuente: Autoría propia.



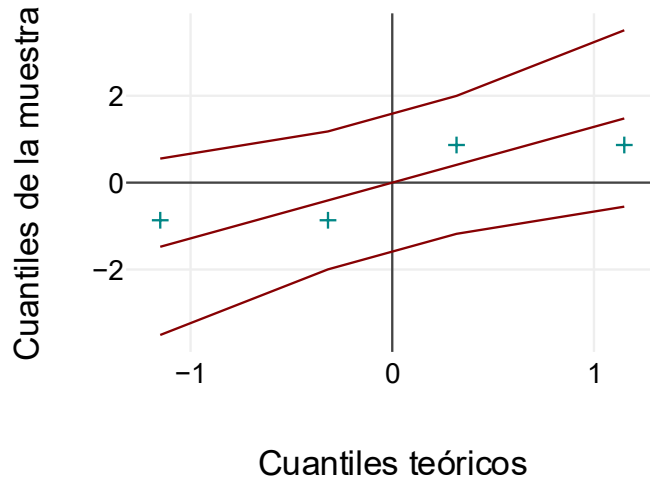
Anexo 22 - Diagrama cuantil-cuantil C7 sin intervención (TCOV).

Fuente: Autoría propia.



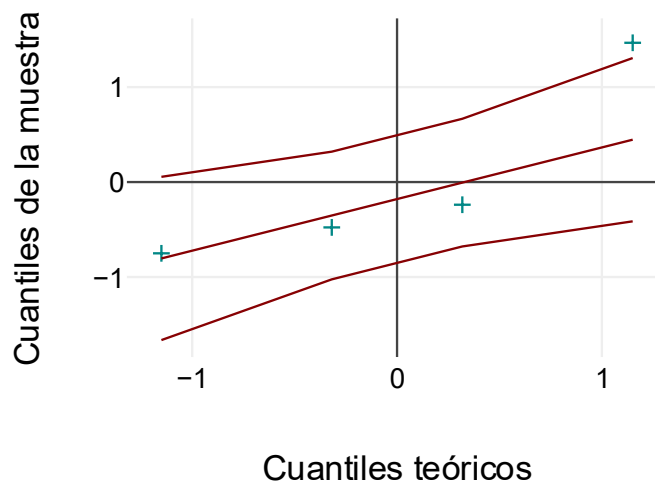
Anexo 23 - Diagrama cuantil-cuantil C7 intervención UV-C (TCOV).

Fuente: Autoría propia.



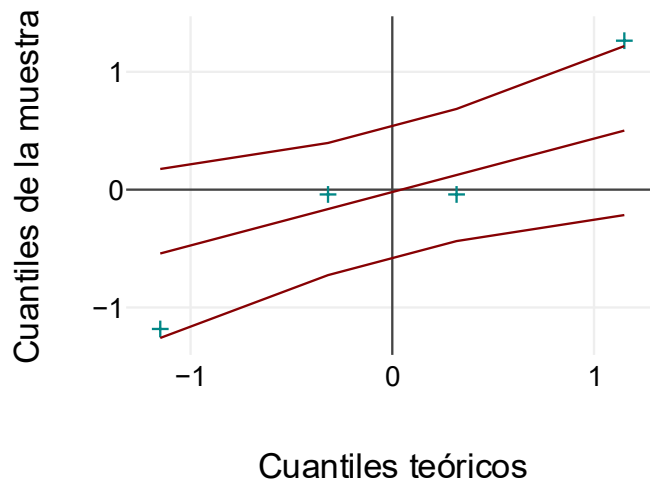
Anexo 24 - Diagrama cuantil-cuantil C7 intervención UV-C+ fotocatalisis (TCOV).

Fuente: Autoría propia.



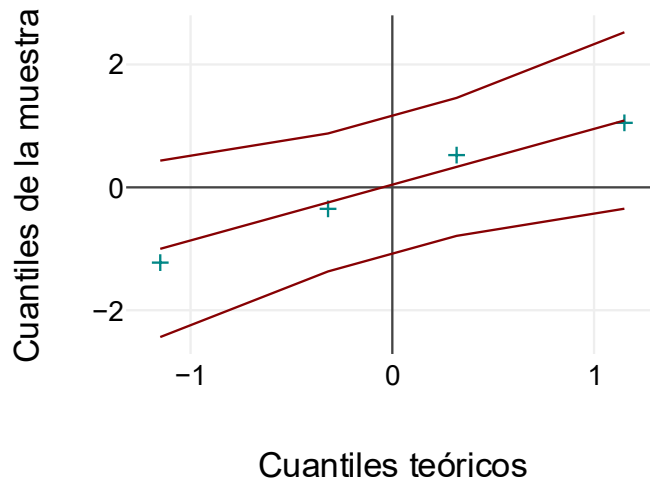
Anexo 25 - Diagrama cuantil-cuantil C8 sin intervención (TCOV).

Fuente: Autoría propia.



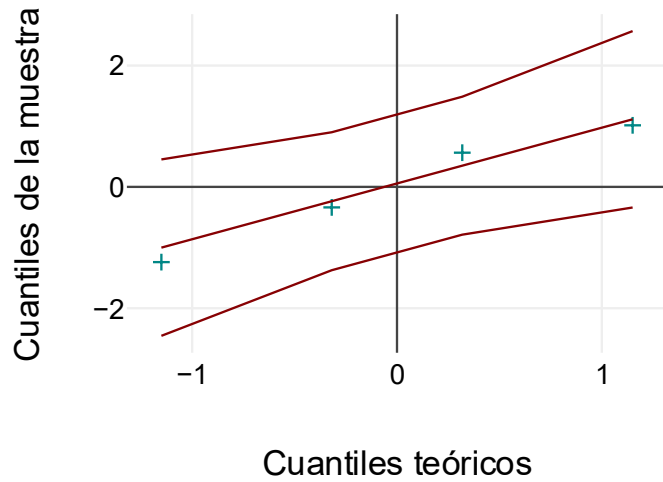
Anexo 26 - Diagrama cuantil-cuantil C8 intervención UV-C (TCOV).

Fuente: Autoría propia.



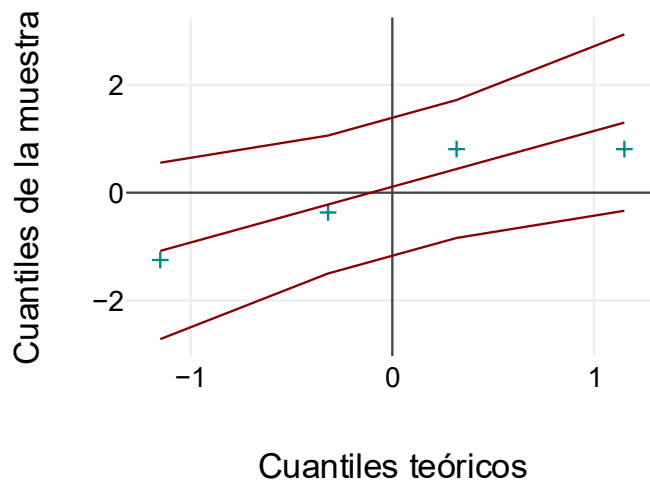
Anexo 27 - Diagrama cuantil-cuantil C8 intervención UV-C+ fotocatalisis (TCOV).

Fuente: Autoría propia.



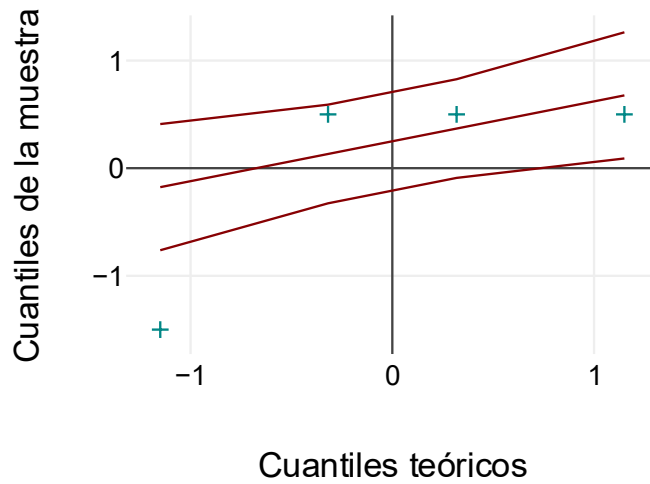
Anexo 28 - Diagrama cuantil-cuantil C7 sin intervención (HCHO).

Fuente: Autoría propia.



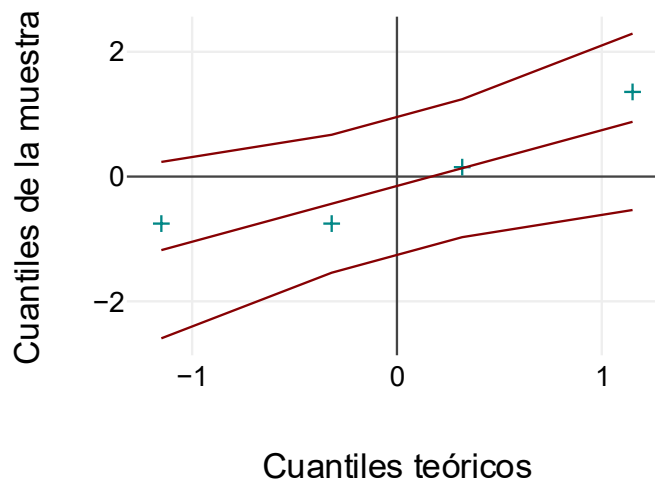
Anexo 29 - Diagrama cuantil-cuantil C7 intervención UV-C (HCHO).

Fuente: Autoría propia.



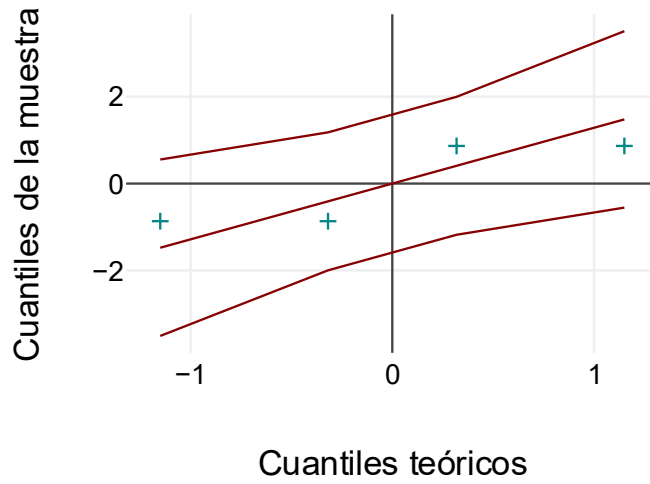
Anexo 30 - Diagrama cuantil-cuantil C7 intervención UV-C+ fotocatalisis (HCHO).

Fuente: Autoría propia.



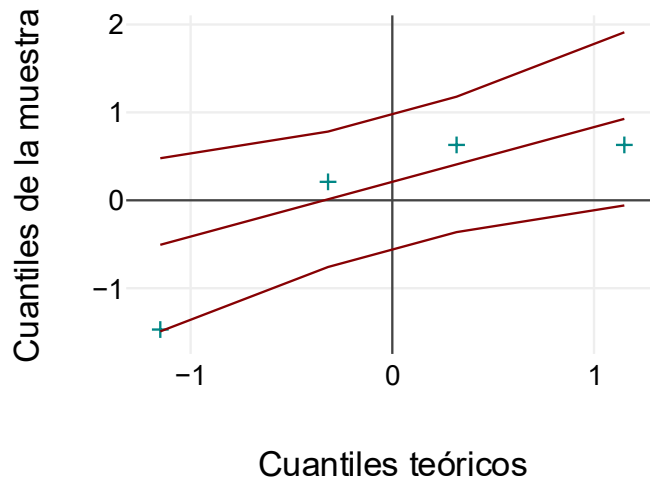
Anexo 31 - Diagrama cuantil-cuantil C8 sin intervención (HCHO).

Fuente: Autoría propia.



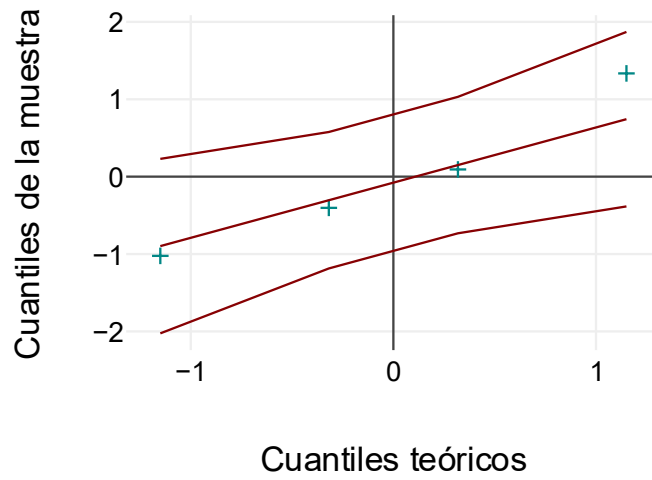
Anexo 32 - Diagrama cuantil-cuantil C8 intervención UV-C (HCHO).

Fuente: Autoría propia.



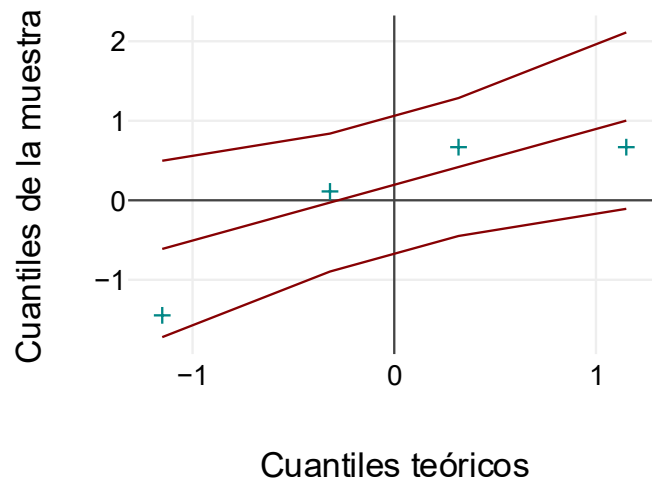
Anexo 33 - Diagrama cuantil-cuantil C8 intervención UV-C+ fotocatalisis (HCHO).

Fuente: Autoría propia.



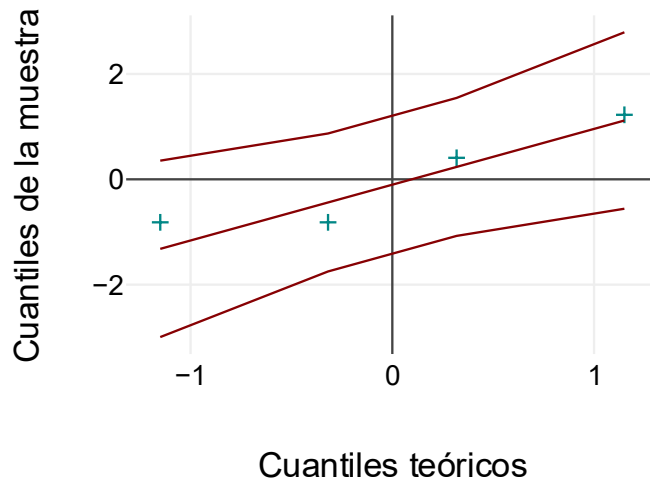
Anexo 34 - Diagrama cuantil-cuantil C7 sin intervención (CO₂).

Fuente: Autoría propia.



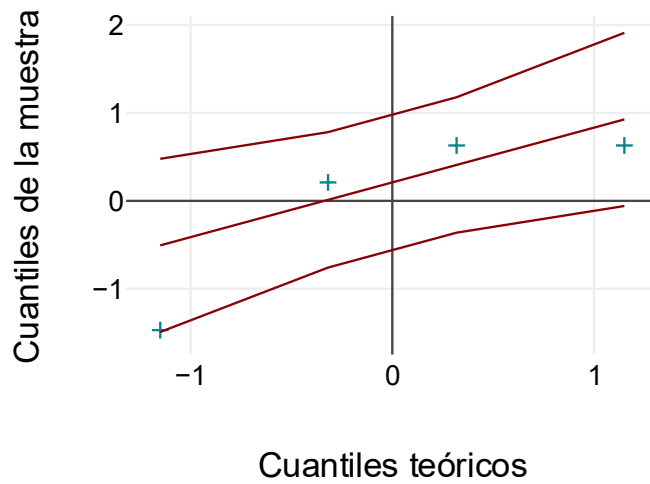
Anexo 35 - Diagrama cuantil-cuantil C7 intervención UV-C (CO₂).

Fuente: Autoría propia.



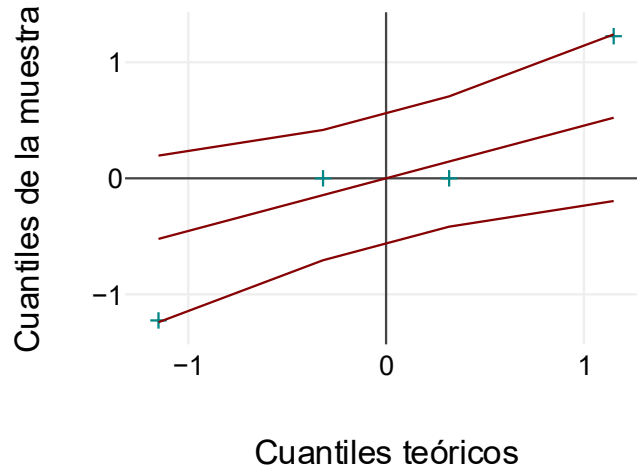
Anexo 36 - Diagrama cuantil-cuantil C7 intervención UV-C + fotocátalisis (CO₂).

Fuente: Autoría propia.



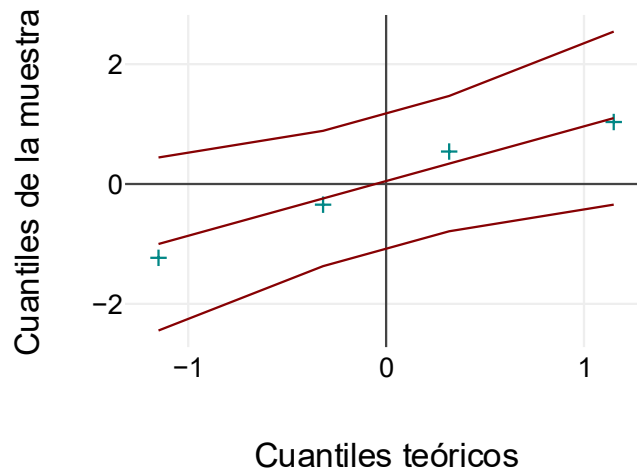
Anexo 37 - Diagrama cuantil-cuantil C8 sin intervención (CO₂).

Fuente: Autoría propia.



Anexo 38 - Diagrama cuantil-cuantil C8 intervención UV-C (CO₂).

Fuente: Autoría propia.



Anexo 39 - Diagrama cuantil-cuantil C8 intervención UV-C+ fotocatalisis (CO₂).

Fuente: Autoría propia.