



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ciencias (Construcción)

## Mejoramiento del confort de edificaciones a través del diseño de fachadas ventiladas

### Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias (Construcción)

#### Presenta:

Arq. María Fernanda Ramírez Trejo

#### Dirigido por:

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza  
Presidente

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel  
Secretario

M. en I. Rubén Ramírez Jiménez  
Vocal

Dra. Teresa López Lara  
Suplente

M. en C. Cesar Augusto Navarro Rubio  
Suplente

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
2026, Mayo 29

La presente obra está bajo la licencia:  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

### Usted es libre de:

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

### Bajo los siguientes términos:



**Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



**NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



**SinDerivadas** — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

### Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.

## RESUMEN

El diseño de la envolvente en edificaciones desempeña un papel fundamental en el control del confort interior. En este contexto, las fachadas ventiladas se han consolidado como una estrategia pasiva capaz de reducir las ganancias térmicas y mejorar la ventilación; sin embargo, su desarrollo continúa limitado por la falta de metodologías que relacionen parámetros de diseño específicos con mejoras cuantificables en distintas dimensiones de confort.

La presente investigación tiene como objetivo desarrollar un diseño integral de fachadas ventiladas en edificaciones ubicadas en climas cálidos, mediante la evaluación de parámetros geométricos y constructivos, así como del uso de materiales de bajo impacto ambiental, con el fin de mejorar el desempeño térmico, lumínico, acústico y de calidad del aire interior.

La metodología se basa en la integración de modelos analíticos de transferencia de calor, radiación y comportamiento acústico, complementados con simulación del comportamiento de la envolvente mediante modelado digital. Se analizaron diez escenarios comparativos, correspondientes a un caso base y nueve configuraciones de fachada ventilada, que combinan tres materiales (fibrocemento, laminado de alta presión y panel compuesto de aluminio) con tres espesores de cámara de aire (5, 7 y 11 cm).

Los resultados evidencian mejoras simultáneas en las cuatro dimensiones de confort evaluadas, identificando el espesor de la cámara de aire como la variable de mayor incidencia en el desempeño del sistema, independientemente del material utilizado. En particular, los escenarios con cámara de aire de 11 cm cumplen con las metas cuantitativas planteadas, destacando la configuración FV-HPL-11 como la más eficiente.

Se concluye que la adecuada selección de parámetros de diseño en fachadas ventiladas permite mejorar el confort interior sin recurrir a sistemas activos de climatización, constituyendo una estrategia pasiva viable para el diseño arquitectónico sostenible.

**(Palabras clave:** confort ambiental, arquitectura, estrategias pasivas, simulación energética)

## ABSTRACT

Building envelope design plays a fundamental role in controlling interior comfort and energy performance. In this context, ventilated facades have emerged as a consolidated passive strategy capable of reducing thermal gains and improving natural ventilation; however, their development remains limited by the lack of methodologies that link specific design parameters to quantifiable improvements across multiple comfort dimensions simultaneously.

This research aims to develop a comprehensive design approach for ventilated facades in buildings located in warm climates, through the evaluation of geometric and constructive parameters alongside the use of low environmental impact materials, with the purpose of improving thermal, lighting, acoustic and indoor air quality performance.

The methodology is based on the integration of analytical heat transfer, radiation and acoustic models, complemented by envelope performance simulation through digital building modeling. Ten comparative scenarios were analyzed, comprising a baseline case and nine ventilated facade configurations combining three cladding materials (fiber cement, high-pressure laminate and aluminum composite panel) with three air cavity depths (5, 7 and 11 cm).

The results demonstrate simultaneous improvements across all four comfort dimensions evaluated, identifying air cavity depth as the variable with the greatest influence on system performance, regardless of the cladding material used. Configurations with an 11 cm air cavity met all quantitative targets established in the research hypothesis, with the FV-HPL-11 configuration identified as the most efficient overall.

It is concluded that the appropriate selection of design parameters in ventilated facades enables meaningful improvements in interior comfort without relying on active mechanical systems, establishing ventilated facades as a technically and economically viable passive strategy for sustainable architectural design.

**(Keywords:** environmental comfort, architecture, passive strategies, energy simulation)

## DEDICATORIAS

*A mis papas, que eternamente me demuestran que se puede dar un poco más. Gracias.*

*A mi hermano Jorge y mi familia, por la compañía, mantenerse al pendiente, y creer en mí.*

*A la Lic. Monroy Tapia, de quien siempre encuentro algo nuevo que aprender.*

La presente tesis se la dedico a mi yo del pasado, por haber tenido el valor de comenzar;  
a mi yo del presente por la perseverancia y el esfuerzo para no rendirse;  
y a mi yo del futuro, para que nunca olvide todo lo que fue capaz de lograr.

Esta etapa no termina solo con la culminación de una meta académica,  
sino también con el resultado del crecimiento personal y profesional  
alcanzado durante este camino. Gracias vida.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco profundamente a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo otorgado a lo largo de este proceso, el cual hizo posible no solo la realización de este proyecto, sino también la continuidad de mi formación académica

A mis colegas, Ricardo y Marcela, con quienes compartí experiencias, risas y aprendizaje a lo largo de este camino. Su apoyo y amistad transformaron este proceso en una experiencia de crecimiento tanto profesional como personal.

Al Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza, presidente del sínodo, por su tiempo, guía y acompañamiento a lo largo de este proceso. Sus consejos no solo enriquecieron este trabajo, sino que también contribuyeron significativamente a mi desarrollo académico.

Por último, agradezco a la Universidad Autónoma de Querétaro, por brindarme la oportunidad de formar parte de su comunidad. Así como a los honorables miembros de mi sínodo y a todos los maestros quienes impartieron clase durante el programa de maestría.

# TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	II
TABLA DE CONTENIDOS .....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS .....	X
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 SISTEMA DE FACHADAS VENTILADAS .....	1
1.1 JUSTIFICACIÓN .....	3
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	5
1.3 ALCANCES .....	6
<b>2. ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>8</b>
2.1 DESEMPEÑO INTEGRAL DE FACHADAS VENTILADAS .....	8
2.2 DESEMPEÑO TÉRMICO DE FACHADAS VENTILADAS EN CLIMAS CÁLIDOS .....	11
2.3 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS Y CONSTRUCTIVOS EN FACHADAS VENTILADAS .....	12
2.4 MATERIALES DE BAJO IMPACTO AMBIENTAL APLICADOS A FACHADAS VENTILADAS .....	14
2.5 MODELOS CONSTRUCTIVOS MODULARES DE FACHADAS VENTILADAS .....	16
2.6 MÉTODOS DE ANÁLISIS .....	17
2.7 LIMITACIONES Y VACÍOS DE INVESTIGACIÓN.....	20
<b>3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS .....</b>	<b>22</b>
3.1 HIPÓTESIS .....	22
3.2 OBJETIVO GENERAL.....	22
3.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	22
<b>4. MARCO TEORICO .....</b>	<b>23</b>
4.1 FACHADA VENTILADA: COMPONENTES .....	23
4.1.1 <i>Efecto chimenea: fundamento termodinámico.....</i>	<i>24</i>
4.2 TRANSFERENCIA DE CALOR EN LA ENVOLVENTE .....	26
4.2.1 <i>Conducción térmica en materiales de construcción .....</i>	<i>27</i>
4.2.2 <i>Resistencia térmica por convección.....</i>	<i>28</i>
4.2.3 <i>Radiación solar incidente en fachadas .....</i>	<i>28</i>

4.2.4	<i>Resistencia térmica total del sistema</i> .....	29
4.3	COMPORTAMIENTO LUMÍNICO: FUNDAMENTO FÍSICO.....	30
4.3.1	<i>Reflectancia, transmitancia y absortancia: balance radiativo</i> .....	31
4.3.2	<i>Ecuaciones de iluminancia y factor de luz diurna (DF)</i> .....	31
4.4	COMPORTAMIENTO ACÚSTICO: FUNDAMENTO FÍSICO .....	32
4.4.1	<i>Ley de masa: pérdida de transmisión sonora en particiones simples</i> .....	32
4.4.2	<i>Índice de reducción sonora (Rw) y pérdida de transmisión (TL)</i> .....	33
4.5	BALANCE INTEGRADO DEL SISTEMA: MODELO MULTICAPA .....	33
4.5.1	<i>Interacción de variables térmicas, lumínicas, acústicas e IAQ</i> .....	34
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>36</b>
5.1	ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN .....	36
5.1.1	<i>Tipo de investigación</i> .....	36
5.2.1	<i>Fundamento de los modelos utilizados</i> .....	37
5.2	CASO DE ESTUDIO .....	39
5.2.1	<i>Características del aula analizada</i> .....	40
5.2.2	<i>Mediciones in situ — caso base</i> .....	41
5.1	VARIABLES DE ESTUDIO.....	42
5.1.1	<i>Variables independientes</i> .....	42
5.2.3	<i>Variables dependientes</i> .....	44
5.2	MODELO MATEMÁTICO DE TRANSFERENCIA TÉRMICA .....	44
5.2.1	<i>Resistencia térmica por conducción</i> .....	45
5.2.2	<i>Resistencia térmica por convección</i> .....	46
5.2.3	<i>Resistencia total del sistema</i> .....	46
5.3	MÉTODOS DE ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO EN FACHADAS VENTILADAS.....	47
5.3.1	<i>Análisis solar del caso de estudio</i> .....	49
5.3.2	<i>Configuración de escenarios en Revit</i> .....	50
5.3.3	<i>Análisis de insolación solar acumulada</i> .....	53
5.3.4	<i>Evaluación lumínica</i> .....	54
5.3.5	<i>Evaluación Sonora</i> .....	55
5.3.6	<i>Evaluación de calidad de aire interior</i> .....	56
<b>6</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>59</b>

6.1	RESULTADOS .....	59
6.1.1	<i>Escenarios comparativos</i> .....	60
6.1.2	<i>Impacto en el confort térmico</i> .....	63
6.2	DISCUSIÓN .....	64
6.2.1	<i>Evaluación de mejora porcentual respecto a la hipótesis</i> .....	64
6.2.2	<i>Lineamientos de diseño replicables para climas cálidos</i> .....	69
6.2.3	<i>Propuesta constructiva del escenario FV-HPL-11</i> .....	70
6.2.4	<i>Comparación del sistema propuesto frente a tecnologías contemporáneas de envolvente</i> .....	71
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>73</b>
7.1	APORTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	73
7.2	LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN .....	74
7.3	RECOMENDACIONES TÉCNICAS Y ACADÉMICAS .....	75
<b>8</b>	<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>77</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Configuración de fachada ventilada .....	2
Figura 1-2 Rol de la envolvente .....	3
Figura 2-1 Interacción de variables de confort.....	10
Figura 5-1 Ubicación de caso de estudio.....	39
Figura 5-2 Fachada caso de estudio.....	40
Figura 5-3 Interior de aula.....	41
Figura 5-4 Vistas del modelo BIM en Autodesk Revit 2024 .....	48
Figura 5-5 Recorrido solar.....	49
Figura 5-6 Representación panel HPL .....	50
Figura 5-7 Representación panel ACP .....	51
Figura 5-8 Representación fibrocemento .....	51
Figura 5-9 Mapa de insolación acumulada anual 2025 .....	53

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Relación de variables de confort .....	11
Tabla 5-1 Proceso metodológico .....	36
Tabla 5-2 Características de aula.....	40
Tabla 5-3 Resultados de mediciones in situ .....	41
Tabla 5-4 Clasificación de espesores de cámara de aire .....	42
Tabla 5-5 Comparativa de materiales de revestimiento exterior .....	43
Tabla 5-6 Variables dependientes.....	44
Tabla 5-7 Condiciones de frontera .....	45
Tabla 5-8 Resistencia térmica por conducción.....	45
Tabla 5-9 Resistencia térmica por convección superficial .....	46
Tabla 5-10 Resistencia total y flujo de calor por escenario.....	47
Tabla 5-11 Matriz de escenarios.....	52
Tabla 5-12 Evaluación lumínica por escenario .....	55
Tabla 5-13 Evaluación acústica por material .....	56
Tabla 5-14 Concentración de CO <sub>2</sub> por espesor de cámara .....	57
Tabla 6-1 Desempeño térmico por escenario .....	60
Tabla 6-2 Desempeño lumínico por escenario .....	61
Tabla 6-3 Evaluación acústica por escenario .....	62
Tabla 6-4 Concentración de CO <sub>2</sub> por espesor de cámara .....	63
Tabla 6-5 Resumen integral de desempeño por escenario .....	68

Tabla 6-6 Comparación de sistemas..... 72

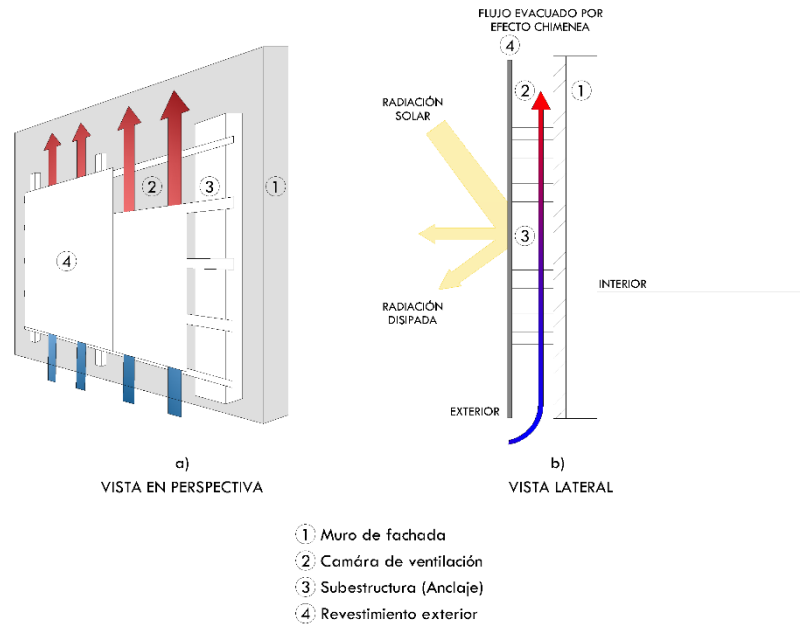
# 1. INTRODUCCIÓN

En sus primeras concepciones la fachada se entendía como un elemento tanto protector como simbólico, sin embargo, el desarrollo tecnológico y las exigencias de sostenibilidad fuerzan una evolución continua. Hoy, la envolvente se entiende como un sistema activo capaz de interactuar con el entorno, por lo que, bajo esta nueva perspectiva, la fachada se consolida como un sistema constructivo que integra estrategias pasivas dentro del diseño energético y adquiere particular urgencia en su aplicación ante la magnitud del impacto ambiental del sector de la construcción a escala global.

## 1.1 Sistema de fachadas ventiladas

Entre las soluciones constructivas con mayor potencial para responder a estas exigencias se encuentran las fachadas ventiladas, definidas como sistemas multicapa, que incorpora una cámara de aire continua entre el cerramiento del edificio y el revestimiento exterior, permitiendo la circulación natural del aire. Su funcionamiento combina los mecanismos de radiación, conducción y convección. La [Figura 1-1(a)], muestra su configuración típica: muro soporte, aislamiento, cámara ventilada y revestimiento exterior.

Cuando la radiación solar incide sobre el revestimiento, el aire de la cámara se calienta, asciende por convección natural y genera el denominado efecto chimenea [Figura 1-1(b)], que extrae el calor y reduce la transferencia hacia el interior. El desempeño del sistema depende críticamente de la geometría de la cámara (espesor, altura, juntas) y de las propiedades térmicas de los materiales (conductividad, emisividad). Este sistema está estrechamente relacionado con el confort interior de las edificaciones.

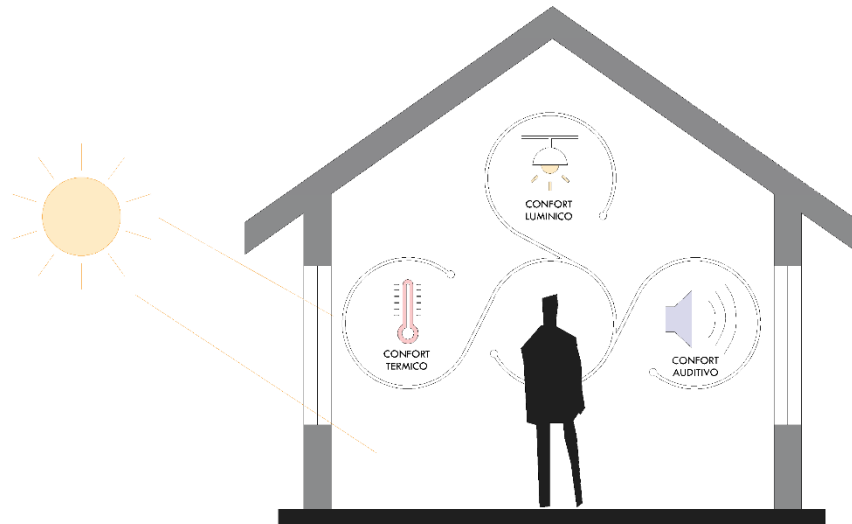


**Figura 1-1 Configuración de fachada ventilada**

El confort ambiental constituye un criterio central del diseño arquitectónico por su influencia directa en el bienestar y el desempeño de los usuarios. No obstante, el confort no es el resultado de una sola variable, sino de la interacción compleja entre condiciones térmicas, lumínicas, acústicas y de calidad del aire (Lin et al., 2025).

Estas dimensiones son interdependientes en el diseño de fachadas ventiladas porque los parámetros del sistema afectan simultáneamente la temperatura interior, la iluminación natural y el aislamiento acústico. Por ejemplo, una superficie muy reflectante reduce las ganancias térmicas, pero puede generar deslumbramiento; una cámara de aire ancha mejora la convección térmica, pero puede disminuir el aislamiento acústico. Por tanto, no es posible intervenir una sola dimensión sin evaluar las demás.

Como se ilustra en la Figura 1-2, el usuario se encuentra en el centro de un sistema donde convergen las tres dimensiones del confort. El diagrama muestra asoleamiento, deslumbramiento y ruido del exterior hacia el interior. Por ello, la envolvente no solo cumple una función de limitación con el ambiente, sino que se convierte en un elemento activo de control externo.



**Figura 1-2 Rol de la envolvente**

En las siguientes secciones de este capítulo se presentan tres apartados: (a) el planteamiento del problema, identificando la brecha que esta investigación busca cerrar. Mientras que (b) la justificación del proyecto, se exponen las razones por las que esta investigación es necesaria. Y (c) los alcances de la investigación.

Los capítulos siguientes desarrollan esta investigación en secuencia: del estado del arte y el marco teórico que fundamentan las decisiones de diseño, a la metodología y los resultados que las validan, hasta las conclusiones y lineamientos que traducen los hallazgos en criterios aplicables

## **1.1 Justificación**

La presente investigación se justifica a partir de tres aspectos principales: las condiciones ambientales del caso de estudio, las limitaciones identificadas en investigaciones previas y la utilidad práctica que pueden tener los resultados obtenidos.

En primer lugar, las edificaciones ubicadas en climas semiáridos, como el de Querétaro, presentan condiciones ambientales que afectan directamente el confort interior de los usuarios. Las mediciones realizadas dentro de las instalaciones de la Universidad Autónoma de Querétaro se efectuaron durante jornadas académicas regulares bajo condiciones habituales de ocupación, registrándose niveles de iluminancia de hasta 1,037

lux, valores superiores a los recomendados por la NOM-025-STPS-2008. De igual forma, se detectaron niveles sonoros de hasta 75.9 dBA y concentraciones estimadas de CO<sub>2</sub> cercanas a 3,375 ppm, superando los límites establecidos por la NOM-081-SEMARNAT-1994 y ASHRAE 62.1, respectivamente.

Estas condiciones influyen en el bienestar y desempeño de los ocupantes, además, evidencian la necesidad de implementar estrategias pasivas que permitan mejorar el ambiente interior sin depender únicamente de sistemas mecánicos de climatización, los cuales incrementan el consumo energético del edificio.

Desde el ámbito académico, gran parte de las investigaciones sobre fachadas ventiladas se enfocan únicamente en una dimensión del confort, ya sea térmica, lumínica o acústica. Sin embargo, en la práctica estas variables no actúan de forma independiente, ya que cualquier modificación en la envolvente puede generar efectos simultáneos sobre distintas condiciones ambientales del espacio interior. Esta situación dificulta comprender el comportamiento integral del sistema y limita la generación de criterios de diseño aplicables a contextos reales.

Es por eso que esta investigación propone una evaluación conjunta de las dimensiones térmica, lumínica, acústica y de calidad del aire interior mediante una metodología que integra modelos físico-matemáticos y herramientas BIM. El propósito es analizar de manera más completa el comportamiento de las fachadas ventiladas bajo condiciones de clima semiárido.

Finalmente, desde el ámbito constructivo, los resultados obtenidos buscan aportar lineamientos de diseño relacionados con el espesor de la cámara de aire y la selección de materiales de revestimiento, con el fin de generar criterios técnicamente fundamentados que puedan ser utilizados en proyectos ubicados en climas similares. La disponibilidad de este tipo de información sigue siendo limitada dentro del contexto mexicano, por lo que la investigación puede contribuir tanto al ámbito académico como a la práctica profesional.

## 1.2 Planteamiento del problema

Las fachadas ventiladas se han utilizado como una estrategia pasiva para reducir las ganancias térmicas en las edificaciones, especialmente en zonas con alta radiación solar y temperaturas elevadas. Su funcionamiento se basa en la incorporación de una cámara de aire que favorece la ventilación natural y ayuda a disminuir la transferencia de calor hacia el interior del edificio. Sin embargo, los resultados reportados en distintas investigaciones muestran que su desempeño puede variar dependiendo de factores como la configuración del sistema, los materiales utilizados y las condiciones climáticas del lugar donde se aplican (Sánchez et al., 2019).

Esta situación responde a la complejidad propia del sistema, cuyo desempeño depende de la interacción simultánea de múltiples parámetros geométricos, constructivos y ambientales. Investigaciones han analizado solo de manera independiente factores como la influencia del espesor de la cámara de aire en los procesos convectivos (Iavorschi et al., 2025)

Por otro lado, se ha estudiado el tipo de aislamiento y su impacto en la transmitancia térmica (Azkorra-Larrinaga et al., 2023), así como las propiedades del revestimiento exterior en relación con la absorción de radiación solar (Fantucci et al., 2020). No obstante, estos estudios suelen abordar una sola variable o una única dimensión del confort (térmica, lumínica o acústica) de forma aislada, sin evaluar cómo interactúan entre sí.

Como consecuencia, la literatura presenta dificultades para establecer relaciones cuantificables entre la configuración de la fachada ventilada y su impacto conjunto en variables de desempeño como la temperatura interior, la carga térmica, los niveles de iluminación y las condiciones acústicas. Dado que estos factores no actúan de manera independiente, sino como parte de un sistema integral, su análisis individual impide evaluar de forma precisa el desempeño real de la envolvente (Gökşen & Ayçam, 2023).

En la práctica, la situación es igualmente problemática. La selección de parámetros como el espesor de la cámara de aire, el tipo de material o la configuración del sistema se basa frecuentemente en criterios constructivos o estéticos, más que en evaluaciones de su impacto en el comportamiento ambiental del edificio. Esto se debe también a la ausencia de

metodologías que permitan a los proyectistas analizar y comparar distintas configuraciones desde las etapas iniciales del diseño (Bianchi et al., 2024).

Adicionalmente, existe una limitada integración entre el diseño del sistema de fachada ventilada y el uso de materiales de bajo impacto ambiental. Son pocos los estudios que abordan de forma conjunta el desempeño térmico, lumínico y acústico con criterios de sostenibilidad, lo que limita el desarrollo de soluciones que no solo mejoren el confort interior, sino que también reduzcan la huella ambiental del sector construcción. (Moghtadernejad et al., 2020)

Bajo esta premisa, la presente investigación se propone responder la siguiente pregunta central: ¿Qué combinación de espesor de cámara de aire y revestimiento exterior en un sistema de fachada ventilada permite maximizar el ahorro energético, manteniendo niveles aceptables de confort integral, en edificaciones ubicadas en clima semiárido?

La pregunta central, por sí sola, resulta demasiado amplia, por lo que es necesario desglosarla en subpreguntas más específicas: La primera indaga ¿cómo varía la temperatura interior y la carga térmica en función del espesor de la cámara de aire de acuerdo a su orientación?

La segunda plantea ¿es posible alcanzar mejoras del 10 % en térmica, 15 % en calidad de aire y 10 % en lumínica con materiales de bajo impacto ambiental en conjunto de los parámetros geométricos y constructivos? Y la tercer subpregunta ¿cómo se comparan los resultados obtenidos con los rangos establecidos por las normativas, y qué lineamientos de diseño pueden derivarse para climas semiáridos?

### **1.3 Alcances**

La presente investigación tiene como objetivo analizar el desempeño de sistemas de fachada ventilada en edificaciones de uso educativo. Se toma como caso de estudio el edificio “Parque Biotecnológico” en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, el cual cuenta con cinco niveles. El estudio se desarrolla en un contexto climático

semiárido templado (BSk), caracterizado por temperaturas promedio entre 30 y 35 °C y niveles de radiación solar de aproximadamente 5.5 a 6.0 kWh/m<sup>2</sup>/día sobre la fachada suroeste, condiciones que inciden directamente en la efectividad de las estrategias pasivas.

El alcance contempla la evaluación de variables específicas asociadas al diseño de fachadas ventiladas: el espesor de la cámara de aire, las propiedades térmicas de los materiales de revestimiento y las condiciones climáticas del entorno. Estas variables se evalúan considerando su relación con el comportamiento térmico, lumínico, acústico y con las condiciones de calidad del aire interior. A partir de ello, se busca identificar cómo ciertos parámetros de diseño influyen en el desempeño general de la fachada ventilada bajo condiciones específicas de uso y clima.

La presente investigación se desarrolla mediante un enfoque cuantitativo apoyado en modelos matemáticos y herramientas digitales de simulación. Para ello, se emplea modelado tridimensional en Revit 2024 y a partir del mismo entorno digital se establecen condiciones de frontera del contexto. Con el propósito de obtener escenarios comparables, las simulaciones se concentran en periodos de mayor exigencia ambiental, particularmente aquellos asociados con altas temperaturas y elevada radiación solar.

En cuanto al análisis económico, se limita a una comparación cualitativa entre los materiales propuestos, considerando aspectos relacionados con su viabilidad constructiva, mantenimiento y aplicación dentro del sistema. No se contempla el desarrollo de presupuestos detallados ni análisis de costos unitarios.

Por otra parte, el alcance de la investigación se centra en la comparación de distintas configuraciones de fachada ventilada y en la generación de criterios técnicos aplicables a climas similares al caso de estudio. Los resultados obtenidos corresponden a una evaluación teórica y comparativa del sistema, por lo que no implican una implementación constructiva directa, sino una base de referencia para futuras aplicaciones y estudios posteriores.

## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Desempeño Integral de fachadas ventiladas

El desempeño de las fachadas ventiladas ha sido abordado en distintos estudios, principalmente por su capacidad para reducir las ganancias térmicas en la envolvente de los edificios. Investigaciones como las de Sánchez et al. (2019) y Rahiminejad y Khovalyg (2022), señalan que la incorporación de una cámara ventilada favorece la disipación del calor acumulado mediante la circulación natural del aire, disminuyendo así la transferencia térmica hacia el interior. Debido a ello, este tipo de sistemas ha sido considerado una alternativa pasiva eficiente para mejorar el comportamiento térmico de las edificaciones.

A pesar de estos resultados, las investigaciones también muestran que el desempeño del sistema puede variar de manera importante dependiendo de factores como el espesor de la cavidad, las propiedades de los materiales y las condiciones climáticas del entorno. Esto ha llevado a considerar que las fachadas ventiladas no funcionan de la misma manera en todos los contextos, sino que su comportamiento depende de la relación entre múltiples variables que interactúan simultáneamente.

En los últimos años, el estudio de fachadas ventiladas ha dejado de centrarse únicamente en la reducción de cargas térmicas y ha comenzado a incorporar otras variables asociadas al confort ambiental. Este cambio responde a la necesidad de evaluar el comportamiento del sistema de una forma más amplia, considerando no solo el desempeño térmico, sino también aspectos relacionados con iluminación natural, aislamiento acústico y calidad del aire interior.

En términos térmicos, distintos autores reportan reducciones considerables en la carga térmica del edificio. Fantucci, Serra y Carbonaro (2020) registran disminuciones superiores al 30%, mientras que Gökşen y Ayçam (2023) documentan reducciones cercanas al 60–70% bajo determinadas configuraciones. Estos resultados muestran que la eficiencia térmica del sistema depende en gran medida de las características constructivas y geométricas de la fachada.

Respecto al comportamiento lumínico, algunos estudios indican que la configuración multicapa de las fachadas ventiladas puede disminuir el ingreso de iluminación natural al interior. Sin embargo, también se ha observado que este mismo efecto ayuda a controlar la radiación solar directa y a reducir problemas de deslumbramiento, generando condiciones de iluminación más uniformes dentro del espacio (Barbosa et al., 2025). Esto evidencia que las decisiones orientadas al control térmico pueden influir directamente en el desempeño lumínico del sistema.

En el caso del desempeño acústico, Daza y Zamora (2019) reportan mejoras en el aislamiento sonoro de entre 5 y 7 dB respecto a simplemente la fachada convencional. Los autores relacionan este comportamiento con la composición multicapa de la fachada y la presencia de la cámara de aire. No obstante, también señalan que las aberturas necesarias para permitir la ventilación pueden reducir parcialmente la capacidad de aislamiento acústico, especialmente cuando aumenta la circulación de aire exterior.

Por otra parte, la calidad del aire interior (IAQ, por sus siglas en inglés *Indoor Air Quality*) ha comenzado a incorporarse recientemente dentro de las evaluaciones de desempeño de fachadas ventiladas. Tao et al., (2022) plantean que estos sistemas pueden contribuir a la renovación del aire y favorecer la ventilación natural del espacio interior. Aun así, esta línea de investigación todavía presenta un desarrollo limitado y continúa siendo poco integrada con las demás variables de confort ambiental evaluadas en la envolvente.

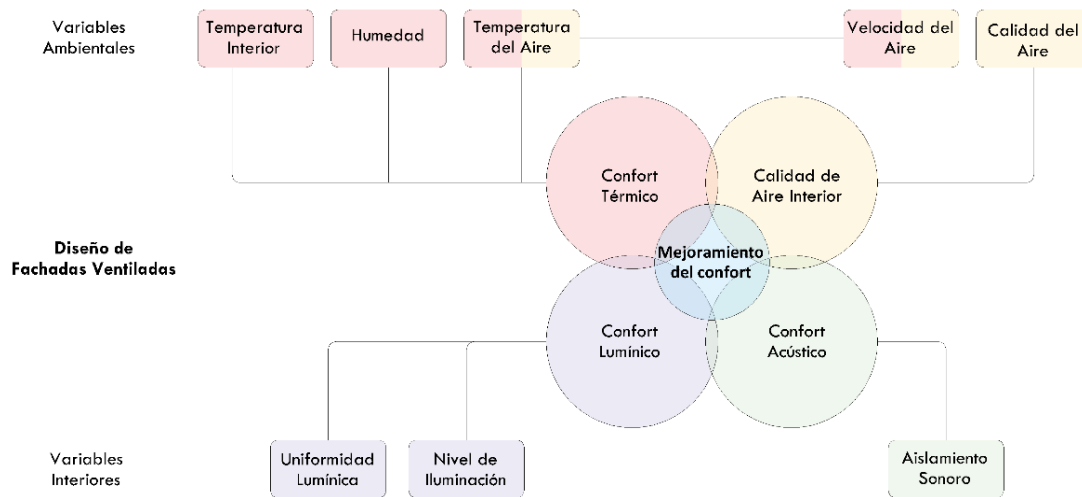
En conjunto, trabajos como los de Lin et al. (2025) y Andreeva et al. (2022) coinciden en que el desempeño de las fachadas ventiladas está determinado por la interacción simultánea entre variables térmicas, lumínicas, acústicas y de ventilación, lo que impide su evaluación mediante enfoques unidimensionales. A pesar de este reconocimiento, la mayoría de los estudios continúa analizando estas variables de manera independiente, lo que limita la comprensión del comportamiento global del sistema.

Para comprender mejor esta cohesión, se muestra la

Figura 2-1, en la parte superior variables ambientales, las cuales actúan como factores de entrada que condicionan el comportamiento del sistema. El elemento central del esquema está constituido por la intersección de cuatro dimensiones del confort: térmico, lumínico,

acústico y calidad del aire interior. Esta superposición gráfica enfatiza que el confort se debe manejar como resultado de la convergencia de múltiples condiciones ambientales.

En la parte inferior se muestran variables interiores asociadas al confort, como la uniformidad lumínica, el nivel de iluminación y el aislamiento sonoro. Estas variables representan los efectos percibidos dentro del espacio habitable como resultado de la interacción entre el entorno exterior y la envolvente arquitectónica.



**Figura 2-1 Interacción de variables de confort**

Esta fragmentación es especialmente crítica en climas cálidos, donde la interacción entre radiación, temperatura y ventilación condiciona el desempeño de la envolvente. En este sentido, se identifica un vacío en la literatura relacionado con la falta de metodologías integrales que permitan evaluar estas variables de manera conjunta.

Por ejemplo, la reducción de la radiación solar incidente puede contribuir a disminuir las ganancias térmicas en el interior del edificio, sin embargo, también puede limitar el ingreso de iluminación natural. De manera similar, un aumento en la ventilación favorece la renovación del aire interior y puede mejorar la calidad ambiental del espacio, aunque al mismo tiempo puede generar pérdidas en el aislamiento acústico debido a una mayor entrada de ruido exterior.

Estas relaciones evidencian que las variables de confort no actúan de manera independiente, sino que presentan efectos simultáneos que deben considerarse durante el proceso de diseño. En el caso de las fachadas ventiladas, esta interacción resulta especialmente relevante, ya que cualquier modificación en la configuración del sistema puede influir de forma directa en el comportamiento térmico, lumínico, acústico y de ventilación. La Tabla 2-1 muestra de manera esquemática algunas de las relaciones identificadas entre las principales variables de confort ambiental y sus posibles efectos asociados.

**Tabla 2-1 Relación de variables de confort**

<b>Variable</b>	<b>Impacto positivo</b>	<b>Posible efecto negativo</b>
Ventilación	↓ temperatura	↓ aislamiento acústico
Protección solar	↓ carga térmica	↓ iluminación natural
Materiales absorbentes	↓ ruido	↑ costo / peso
Aperturas	↑ ventilación	↑ ruido exterior

## **2.2 Desempeño térmico de fachadas ventiladas en climas cálidos**

En contextos urbanos de clima cálido, particularmente en regiones clasificadas como BSk y BSh según la clasificación de Köppen-Geiger, las fachadas ventiladas han sido ampliamente investigadas como una estrategia pasiva para mitigar las ganancias térmicas asociadas a la radiación solar. Estos climas se caracterizan por altas temperaturas, elevada radiación solar y, en muchos casos, una limitada disponibilidad de viento, condiciones que incrementan la carga térmica en la envolvente y dificultan la disipación del calor acumulado.

Bajo estas condiciones, diversos estudios coinciden en que la incorporación de una cámara de aire ventilada permite reducir la temperatura superficial del cerramiento y disminuir el flujo de calor hacia el interior del edificio (Ascione et al., 2021). No obstante, la efectividad de este mecanismo depende en gran medida de la capacidad del sistema para activar y sostener el flujo de aire en la cavidad, lo cual está directamente condicionado por las características climáticas del entorno.

En este contexto, diversos estudios han analizado la relación entre el espesor de la cavidad y la configuración de las aberturas como variables que influyen directamente en la ventilación del sistema. Parte de estas investigaciones se ha enfocado en la proporción entre las áreas de entrada y salida de aire respecto al área total de la fachada, así como en la ubicación de dichas aberturas dentro de la cavidad. Omrani et al. (2021) identifican que configuraciones intermedias, cercanas al 10% de apertura, permiten alcanzar gran parte del flujo de aire esperado, mientras que incrementos mayores no representan mejoras significativas en el comportamiento del sistema.

Sin embargo, el desempeño de la fachada ventilada no depende únicamente de su configuración geométrica. Las condiciones del entorno urbano también pueden modificar su funcionamiento, especialmente en climas cálidos. Factores como la radiación reflejada por edificaciones cercanas, la acumulación de calor en el ambiente exterior o las bajas velocidades de viento pueden disminuir el diferencial térmico necesario para favorecer el movimiento del aire dentro de la cavidad. Bajo estas condiciones, el sistema puede presentar una reducción en su capacidad de disipación térmica, incluso cuando la configuración de la fachada es adecuada (Matour et al., 2021).

En términos generales, la literatura coincide en que las fachadas ventiladas pueden mejorar el desempeño térmico de las edificaciones en climas cálidos, particularmente cuando las condiciones de radiación y ventilación favorecen su funcionamiento. No obstante, los resultados también muestran que su comportamiento puede variar dependiendo del contexto climático y urbano, lo que dificulta aplicar los mismos criterios de diseño a distintos entornos sin realizar evaluaciones específicas.

### **2.3 Parámetros geométricos y constructivos en fachadas ventiladas**

Dentro de los estudios sobre fachadas ventiladas, los parámetros geométricos y constructivos han sido analizados con frecuencia debido a su relación directa con el comportamiento del sistema. A diferencia de las investigaciones enfocadas únicamente en la reducción de cargas térmicas, es por esto que varios autores han centrado su atención en

cómo ciertos aspectos de la configuración física de la fachada modifican su desempeño bajo distintas condiciones climáticas.

Entre los parámetros más estudiados se encuentran el espesor de la cavidad, la proporción y disposición de las aberturas de ventilación, así como las propiedades de los materiales empleados en el sistema (Daza & Zamora, 2019). Tanto en estudios experimentales como en simulaciones numéricas, estos elementos se analizan con el objetivo de identificar configuraciones que permitan mejorar el funcionamiento de la envolvente en diferentes contextos.

En el caso del espesor de la cavidad, varios trabajos reportan comportamientos similares dentro de ciertos rangos de diseño. Ascione et al., (2021) y Stazi et al. (2020) señalan que cavidades comprendidas entre 5 y 15 cm suelen presentar resultados favorables, mientras que espesores cercanos a 7 y 10 cm muestran condiciones más estables en términos de ventilación y disipación térmica. Resultados parecidos son reportados por Gökşen y Ayçam (2023) quienes identifican un mejor desempeño en configuraciones cercanas a los 10 cm bajo condiciones de clima cálido y alta radiación solar. Los autores también observan que aumentar el espesor más allá de ciertos límites no necesariamente produce mejoras proporcionales en el sistema.

Otro aspecto recurrente en la literatura corresponde a las aberturas de ventilación y su relación con el flujo de aire dentro de la cavidad. Omrani et al. (2021) analizaron configuraciones con aperturas equivalentes al 5%, 10% y 15% del área de fachada en cavidades de 10 cm, encontrando que las configuraciones intermedias permiten alcanzar gran parte del flujo de aire esperado sin necesidad de incrementar el tamaño de las aberturas. Los resultados también muestran que aperturas mayores pueden favorecer el ingreso de ruido exterior o contaminantes, especialmente en entornos urbanos.

Asimismo, la posición de las aberturas también ha mostrado influencia en el comportamiento del sistema. Algunos estudios reportan resultados más constantes cuando las entradas y salidas de aire se ubican en la parte inferior y superior de la fachada, favoreciendo la circulación vertical del aire dentro de la cavidad. En cambio, configuraciones

laterales o discontinuas presentan resultados más variables dependiendo de las condiciones del entorno y de la velocidad del viento.

Aunque existe una cantidad importante de investigaciones sobre parámetros geométricos y constructivos, los resultados continúan mostrando diferencias entre estudios. Parte de esta variación se relaciona con las condiciones climáticas, el tipo de edificio y las características específicas de cada sistema evaluado. Por esta razón, varios autores coinciden en que no es posible establecer criterios universales de diseño, ya que el comportamiento de la fachada ventilada depende de la interacción simultánea entre múltiples variables y del contexto donde se aplica.

## **2.4 Materiales de bajo impacto ambiental aplicados a fachadas ventiladas**

La selección de materiales en fachadas ventiladas se ha relacionado tradicionalmente con aspectos técnicos como la resistencia mecánica, la durabilidad y el comportamiento térmico. Sin embargo, en los últimos años este criterio ha comenzado a ampliarse debido al impacto ambiental asociado a la fabricación de varios materiales convencionales, especialmente aquellos que requieren altos consumos de energía durante su producción (Jankovic y Goia, 2021).

A partir de ello, diferentes investigaciones han incorporado materiales con menor impacto ambiental dentro del análisis de sistemas de envolvente. Entre las alternativas estudiadas se encuentran materiales reciclados, biocompuestos y paneles híbridos, los cuales buscan reducir la huella ambiental sin comprometer el desempeño técnico del sistema. Aun así, la información disponible sobre estas soluciones continúa siendo más limitada en comparación con la existente para materiales convencionales, particularmente en aplicaciones relacionadas con fachadas ventiladas.

Dentro de los materiales recientes analizados en la literatura se encuentran los paneles compactos de alta presión (HPL), utilizados en algunos sistemas de fachada debido a su estabilidad dimensional y resistencia frente a la intemperie. Parte del interés en este material se relaciona con su composición basada en fibras lignocelulósicas y resinas termoestables, lo

que ha permitido considerarlo como una alternativa con menor impacto ambiental en comparación con otros revestimientos tradicionales. Estudios como el de Stazi et al., (2020) mencionan su uso creciente en fachadas ventiladas, aunque todavía existen diferencias entre investigaciones respecto a su comportamiento térmico y ambiental bajo distintas condiciones climáticas.

Por otra parte, el fibrocemento continúa siendo uno de los materiales más utilizados en este tipo de sistemas debido a su resistencia, estabilidad y facilidad de mantenimiento. Su presencia en el mercado y su costo relativamente accesible han favorecido su aplicación en distintos proyectos. No obstante, algunos autores señalan que el impacto ambiental asociado a la producción del cemento representa una de sus principales desventajas desde el punto de vista de sostenibilidad (Jensen & Alfieri, 2023).

En contraste, el panel compuesto de aluminio (ACP, por sus siglas en inglés *Aluminum Composite Panel*) destaca por su ligereza y facilidad constructiva, además de presentar buena resistencia frente a la humedad y cambios ambientales. Sin embargo, varios estudios coinciden en que la fabricación del aluminio implica un consumo energético elevado, lo que incrementa considerablemente la huella ambiental del material en comparación con otras alternativas utilizadas en envolventes (Jankovic y Goia, 2021).

La comparación entre estos materiales muestra que aún existe una diferencia importante entre desempeño técnico e impacto ambiental. Mientras algunos materiales convencionales presentan un comportamiento más conocido y validado, las alternativas de menor impacto ambiental continúan mostrando resultados variables dependiendo del contexto y del tipo de sistema en el que se aplican, especialmente en climas cálidos.

A pesar del aumento de investigaciones relacionadas con materiales sostenibles, gran parte de los estudios continúa evaluando únicamente aspectos térmicos o constructivos, dejando en segundo plano el impacto ambiental asociado al sistema completo. Esta situación dificulta establecer criterios de selección que consideren simultáneamente desempeño técnico, condiciones climáticas y sostenibilidad.

Por esta razón, todavía existe una cantidad limitada de estudios comparativos que analicen de manera conjunta el comportamiento térmico y el impacto ambiental de los

materiales utilizados en fachadas ventiladas. Esta falta de integración evidencia la necesidad de desarrollar investigaciones que permitan comparar distintas alternativas bajo criterios más amplios y aplicables a contextos específicos de diseño.

## **2.5 Modelos constructivos modulares de fachadas ventiladas**

El desarrollo de sistemas constructivos industrializados ha favorecido la incorporación de soluciones modulares en distintos tipos de envolventes arquitectónicas. En el caso de las fachadas ventiladas, la modularidad ha sido utilizada como una alternativa para simplificar procesos de fabricación, montaje y mantenimiento, además de mejorar el control sobre la ejecución del sistema. Estudios recientes señalan que la prefabricación de componentes permite reducir tiempos de obra y disminuir errores asociados a procesos constructivos tradicionales (Pastori et al., 2021)

Parte del interés por este tipo de sistemas se relaciona con la posibilidad de estandarizar ciertos elementos de la fachada y facilitar su reemplazo o mantenimiento. Bajo este enfoque, la modularidad no solo responde a criterios constructivos, sino también a la búsqueda de sistemas más adaptables y con mayor facilidad de intervención a lo largo de su vida útil.

En distintos países europeos, las fachadas ventiladas con paneles prefabricados de gran formato (como cerámica, piedra natural o paneles compuestos de aluminio) se han consolidado como soluciones ampliamente utilizadas. Aun así, varios de estos sistemas continúan dependiendo de configuraciones relativamente rígidas, con posibilidades limitadas de desmontaje o reutilización una vez instalados.

Frente a ello, algunas investigaciones recientes han comenzado a explorar soluciones modulares desmontables. Evola et al., 2020) por ejemplo, analizan sistemas basados en paneles de madera contralaminada (CLT, por sus siglas en inglés *Cross Laminated Timber*) con cavidad ventilada integrada, destacando ventajas relacionadas con mantenimiento, adaptabilidad y posible reutilización de componentes. Sin embargo, este tipo de propuestas todavía presenta una aplicación limitada y se concentra principalmente en contextos específicos.

Desde el punto de vista económico, la literatura muestra que los sistemas modulares de fachada ventilada suelen presentar costos iniciales superiores a los de soluciones convencionales. No obstante, algunos estudios de costo-beneficio indican que parte de esta inversión puede recuperarse con el tiempo debido a la reducción en el consumo energético del edificio. Stazi et al., (2020) por ejemplo, reportan periodos de retorno cercanos a siete años en ciertos contextos urbanos, asociados principalmente a la disminución de cargas de enfriamiento.

Aun así, los resultados económicos continúan mostrando variaciones importantes dependiendo del contexto de aplicación. En climas cálidos, donde la demanda de refrigeración suele ser mayor, los periodos de recuperación podrían modificarse considerablemente. Sin embargo, la evidencia disponible todavía es limitada y depende de factores como el tipo de edificio, las condiciones climáticas y la configuración específica del sistema.

Aunque la literatura sobre sistemas modulares ha crecido en los últimos años, todavía existen aspectos poco explorados. Entre ellos destacan los costos de mantenimiento a largo plazo, la durabilidad de sistemas desmontables y su comportamiento en diferentes contextos constructivos (Venturelli et al., 2023; Sultan, 2023). Además, varios estudios continúan abordando por separado el análisis técnico y el económico, dificultando una evaluación más completa de la viabilidad de estos sistemas.

En términos generales, los modelos modulares representan una alternativa con potencial para mejorar la eficiencia constructiva y operativa de las fachadas ventiladas. Sin embargo, la información disponible aún presenta limitaciones.

## **2.6 Métodos de análisis**

Dentro de la Universidad Autónoma de Querétaro se han desarrollado investigaciones relacionadas con confort ambiental y estrategias pasivas aplicadas a edificios educativos. Entre ellas destaca la tesis *“Rehabilitación del Edificio I: Aplicación del diseño bioclimático para mejorar el confort y habitabilidad interior”* de Olvera Pérez (2025), en la que se

analizan variables como asoleamiento, ventilación natural y control térmico mediante herramientas de análisis climático y estrategias bioclimáticas.

Aunque esta investigación no se enfoca directamente en fachadas ventiladas, representa un antecedente relevante dentro del contexto institucional debido al uso de metodologías orientadas al análisis ambiental en las aulas. Además, refleja un interés creciente por incorporar herramientas de evaluación dentro del proceso de diseño arquitectónico.

En paralelo, el estudio de fachadas ventiladas ha evolucionado junto con las metodologías utilizadas para analizar su comportamiento. La literatura reciente muestra una variedad de enfoques que buscan evaluar el desempeño del sistema bajo diferentes configuraciones y condiciones climáticas. Entre los métodos más utilizados destacan los ensayos experimentales, la simulación energética y la modelación computacional.

El enfoque experimental ha sido empleado mediante prototipos y monitoreo en condiciones reales, permitiendo registrar variables relacionadas con temperatura, transferencia térmica y comportamiento de la envolvente. Investigaciones como las de Stazi et al. (2020) y Sánchez et al. (2019) destacan la utilidad de este tipo de estudios para validar configuraciones específicas de fachada. Sin embargo, varios autores señalan que este tipo de análisis puede implicar tiempos prolongados de implementación y mayores costos, especialmente cuando se requiere evaluar múltiples escenarios de diseño.

Por otra parte, la simulación energética se ha consolidado como una de las herramientas más utilizadas para analizar el desempeño térmico de fachadas ventiladas. Este tipo de técnicas permite comparar distintas configuraciones sin necesidad de construir prototipos físicos, facilitando la evaluación de escenarios bajo condiciones climáticas variables (Lucchino et al., 2022). Aun así, gran parte de estas investigaciones continúa enfocándose principalmente en el comportamiento térmico, dejando en segundo plano otras variables relacionadas con el confort ambiental.

De manera complementaria, algunos estudios han incorporado herramientas de dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés *Computational Fluid Dynamics*) para analizar el movimiento del aire dentro de la cavidad ventilada y su relación

con parámetros geométricos y ambientales (Pastori et al., 2021). Este tipo de análisis ha permitido estudiar con mayor detalle el comportamiento del flujo de aire en el sistema; sin embargo, su aplicación suele desarrollarse de manera aislada respecto a otras variables de desempeño del edificio.

Más recientemente, algunas investigaciones han comenzado a combinar simulación energética y validación experimental con el propósito de mejorar la precisión de los resultados. Rahiminejad y Khovalyg (2022) por ejemplo, integran datos experimentales con modelación energética para evaluar el comportamiento de fachadas ventiladas bajo distintas condiciones de operación. Este tipo de aproximaciones busca reducir las diferencias entre resultados teóricos y condiciones reales de funcionamiento.

En general, la literatura muestra que cada metodología aporta información distinta sobre el sistema. Los ensayos experimentales permiten validar comportamientos reales, la simulación facilita la comparación de configuraciones y la modelación computacional contribuye al análisis del flujo de aire dentro de la cavidad. No obstante, todavía son limitados los estudios que integran estos enfoques dentro de una misma metodología de análisis.

Esta situación también dificulta la comparación directa entre investigaciones, ya que muchos estudios utilizan distintas escalas, condiciones climáticas o parámetros de modelado. Como resultado, los datos reportados no siempre pueden compararse entre sí ni utilizarse para establecer criterios generales de diseño.

A partir de ello, distintos autores coinciden en la necesidad de desarrollar metodologías más integrales que permitan relacionar simulación, modelación digital y validación experimental, especialmente en climas cálidos, donde las condiciones de radiación y ventilación modifican considerablemente el comportamiento de la envolvente. Bajo este contexto, la presente investigación plantea una metodología basada en modelado BIM, análisis matemático y evaluación comparativa de escenarios para estudiar el desempeño de fachadas ventiladas desde una perspectiva más integrada y aplicada al contexto climático analizado.

## 2.7 Limitaciones y vacíos de investigación

Aunque el estudio de fachadas ventiladas ha crecido de manera considerable en los últimos años, todavía existen varias limitaciones en torno a la forma en que se analiza su desempeño. Una de los principales puntos se relaciona con el enfoque utilizado en muchas investigaciones, donde el análisis suele concentrarse únicamente en el comportamiento térmico o, en algunos casos, en una sola variable adicional. Esto ha dejado en segundo plano la relación que existe entre variables como iluminación natural, calidad del aire interior y desempeño acústico, aun cuando todas forman parte del confort ambiental dentro del edificio.

Debido a ello, gran parte de la literatura continúa abordando las variables de desempeño de manera independiente, lo que dificulta entender cómo responden conjuntamente dentro de un mismo sistema. En las fachadas ventiladas, una modificación en la geometría, en el tipo de material o en las condiciones de ventilación puede afectar simultáneamente distintas condiciones ambientales, por lo que evaluar cada variable por separado limita la comprensión integral del sistema.

Otra limitación identificada corresponde al análisis de los parámetros geométricos. Aunque variables como el espesor de la cavidad y la configuración de las aberturas han sido estudiadas de manera recurrente, la mayoría de los trabajos las evalúa bajo un único criterio de desempeño, principalmente térmico. Como resultado, todavía son escasas las investigaciones que relacionan estos parámetros con múltiples variables ambientales de manera simultánea.

En cuanto a los materiales utilizados, también se observa una cantidad limitada de estudios enfocados en materiales de bajo impacto ambiental, especialmente en aplicaciones desarrolladas en climas cálidos. Gran parte de la evidencia disponible proviene de investigaciones realizadas en climas templados, donde las condiciones de radiación solar, temperatura y ventilación difieren considerablemente de las presentes en regiones cálidas. Esto dificulta conocer con mayor precisión el comportamiento de estos materiales bajo condiciones más exigentes de operación.

Por otra parte, los distintos componentes del sistema (parámetros geométricos, materiales y soluciones modulares) suelen analizarse de forma separada. Aunque existen investigaciones sobre cada uno de estos aspectos, todavía son pocos los estudios que los integran dentro de una misma propuesta constructiva evaluada de manera conjunta. En consecuencia, aún existe una falta de modelos modulares optimizados que combinen criterios geométricos, constructivos y ambientales dentro de un mismo sistema de análisis.

Por ende, no se han desarrollado propuestas que articulen estos elementos dentro de un mismo modelo constructivo, evaluado de forma conjunta mediante herramientas de simulación o análisis comparativo. A lo anterior se suma la inexistencia de un modelo constructivo modular optimizado que integre dichos elementos y sea validado mediante simulación.

A nivel metodológico también persisten diferencias importantes entre investigaciones. Algunos estudios utilizan monitoreo experimental, otros recurren a simulación energética o modelación computacional, pero en la mayoría de los casos estas herramientas se emplean por separado. Esta situación complica la comparación directa entre resultados y reduce la posibilidad de validar los modelos mediante distintos métodos de análisis.

Finalmente, varios autores coinciden en que todavía existe una cantidad limitada de lineamientos de diseño aplicables a la práctica profesional. Muchos estudios se desarrollan bajo condiciones muy específicas y no siempre establecen relaciones claras con normativas o criterios comparables entre distintos contextos. Como consecuencia, parte de los resultados obtenidos permanece a nivel experimental y no logra traducirse en herramientas útiles para la toma de decisiones durante el diseño de envolventes arquitectónicas.

### **3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS**

#### **3.1 Hipótesis**

La optimización conjunta de los parámetros geométricos y constructivos en fachadas ventiladas, empleando materiales de bajo impacto ambiental, mejorará el 10% en desempeño térmico, 15% en calidad de aire y 10% en control lumínico en espacios en climas cálidos.

#### **3.2 Objetivo general**

Optimizar el diseño de fachadas ventiladas en edificaciones urbanas, mediante la evaluación de parámetros geométricos, constructivos y el uso de materiales de bajo impacto ambiental, con el fin de mejorar el desempeño térmico, confort ambiental, lumínico y acústico.

#### **3.3 Objetivos específicos**

1. Analizar el desempeño térmico de sistemas de fachada ventilada a través de una revisión documental y simulaciones energéticas, con el fin de identificar variables críticas que inciden en su eficiencia en contextos urbanos de clima cálido.
2. Evaluar el impacto de parámetros geométricos y constructivos, como el espesor de la cámara de aire, la proporción y ubicación de las aberturas, y el tipo de materiales, sobre el comportamiento térmico del sistema.
3. Desarrollar un modelo constructivo optimizado de fachada ventilada modular, que utilice materiales de bajo impacto ambiental y que sea viable técnica y económicamente para su aplicación.
4. Comparar los resultados obtenidos con normativas vigentes y estudios previos, con el propósito de proponer lineamientos de diseño técnico replicables que permitan mejorar el confort térmico sin elevar los costos de construcción y mantenimiento.

## 4. MARCO TEORICO

### 4.1 Fachada ventilada: componentes

La fachada ventilada funciona como un sistema compuesto por distintas capas que interactúan entre sí frente a las condiciones exteriores. A diferencia de una fachada tradicional donde el intercambio térmico ocurre principalmente a través de materiales sólidos, este tipo de sistema incorpora una cavidad de aire que modifica el comportamiento de la envolvente al permitir la circulación natural del aire entre el revestimiento exterior y el cerramiento interior.

El sistema se conforma generalmente por un muro soporte, una capa de aislamiento, una cámara ventilada, una subestructura de fijación y un revestimiento exterior. Cada uno de estos elementos participa de manera distinta en el desempeño de la fachada, ya sea controlando la transferencia de calor, regulando la exposición a la radiación solar o favoreciendo el movimiento del aire dentro de la cavidad.

La presencia de la cámara ventilada representa una de las principales diferencias respecto a otros sistemas de fachada. Su funcionamiento permite evacuar parte del calor acumulado en el revestimiento exterior antes de que éste sea transferido hacia el interior del edificio. Debido a ello, el comportamiento térmico de la fachada depende no solo de las propiedades de los materiales, sino también de factores relacionados con la geometría de la cavidad y las condiciones de ventilación.

Además del comportamiento térmico, las propiedades superficiales de los materiales influyen en otros aspectos del desempeño de la envolvente. Características como color, reflectancia, textura o densidad pueden modificar la absorción de radiación solar, la reflexión de luz natural y el aislamiento acústico del sistema. Por esta razón, el análisis de fachadas ventiladas requiere considerar la interacción entre distintos fenómenos físicos y no únicamente la resistencia térmica de sus componentes.

A partir de ello, el estudio de este tipo de envolventes requiere integrar conceptos relacionados con transferencia de calor, movimiento del aire y propiedades físicas de los materiales. Estos principios sirven como base para analizar posteriormente la influencia de

variables como el espesor de la cavidad, la configuración del sistema y la selección de materiales dentro de la metodología de investigación.

La ecuación (4-1) establece que el desempeño térmico de la envolvente depende directamente de la resistencia que ofrecen sus capas al paso del calor, se expresa mediante:

$$q_{total} = q_{cond} + q_{conv} + q_{rad} \quad (4-1)$$

Donde:

$q_{total}$	flujo de calor (W/m <sup>2</sup> )
$q_{cond}$	conducción
$q_{conv}$	convección
$q_{rad}$	radiación

La presencia de la cavidad ventilada genera un acoplamiento entre el transporte de energía y el transporte de masa (el aire en movimiento transporta calor desde la zona baja hacia la zona alta de la cavidad), lo que distingue a este sistema de las fachadas convencionales y justifica su análisis como un sistema dinámico. Este acoplamiento se rige por la ecuación (4-2) de continuidad para flujo estacionario:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (4-2)$$

Donde:

$\rho$	densidad del aire (kg/m <sup>3</sup> )
$\vec{v}$	vector velocidad del aire (m/s)
$\nabla$	operador divergencia

#### 4.1.1 Efecto chimenea: fundamento termodinámico

El elemento que distingue a la fachada ventilada de cualquier otro sistema de envolvente multicapa es la cámara de aire. A diferencia del aire estático en una cámara sellada, el aire en una cavidad abierta superior e inferiormente se mueve. Este movimiento surge espontáneamente cuando existe una diferencia de temperatura entre el aire de la cavidad y el exterior, generando una diferencia de densidad que produce una fuerza de

flotación. Este fenómeno es el efecto chimenea: el mecanismo pasivo central de la fachada ventilada.

La comprensión de la fuerza que lo impulsa es indispensable para anticipar cómo la geometría de la cavidad (su altura y espesor) afecta la capacidad del sistema para evacuar el calor acumulado en el revestimiento, se expresa en la ecuación (4-3):

$$\Delta P = \rho g H \left( \frac{T_i - T_e}{T_i} \right) \quad (4-3)$$

Donde:

$\Delta P$	diferencia de presión (Pa)
$\rho$	densidad del aire (kg/m <sup>3</sup> )
$g$	aceleración gravitacional (9.81 m/s <sup>2</sup> )
$H$	altura de la cavidad (m)
$T_i$	temperatura del aire en la cavidad (K)
$T_e$	temperatura exterior (K)

Esta diferencia de presión impulsa el flujo de aire. El caudal volumétrico resultante determina la capacidad real del sistema para evacuar calor y renovar el aire en la cavidad:

$$Q = C_d A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (4-4)$$

Donde:

$Q$	caudal de aire (m <sup>3</sup> /s)
$C_d$	coeficiente de descarga (adimensional)
$A$	área de abertura (m <sup>2</sup> )
$\Delta P$	diferencia de presión (Pa)
$\rho$	densidad del aire (kg/m <sup>3</sup> )

La velocidad del flujo en la cavidad relaciona el caudal con el área disponible y es el parámetro clave en la evaluación convectiva, puede estimarse como:

$$v = \frac{Q}{A} \quad (4-5)$$

Donde:

v	velocidad del aire (m/s)
Q	caudal de aire (m <sup>3</sup> /s)
A	área de la sección transversal de la cavidad (m <sup>2</sup> )

El análisis del flujo en la cavidad en esta investigación se aborda mediante la tasa de renovación de aire (ACH), adoptando valores de referencia derivados de la literatura para cada espesor de cámara evaluado (Bansal, 1994), dado que la resolución numérica detallada de estas ecuaciones excede el alcance del estudio. Las ecuaciones (4-3), (4-4) y (4-5) establecen el fundamento físico que justifica la relación entre espesor de cámara y caudal de ventilación, relación que sustenta directamente los valores de ACH adoptados en la sección metodológica

## 4.2 Transferencia de calor en la envolvente

Para que el efecto chimenea cumpla su función, debe haber calor que evacuar. Ese calor llega al sistema a través de los materiales sólidos del revestimiento y se acumula en la superficie exterior antes de transferirse hacia el interior. La velocidad a la que esto ocurre depende de las propiedades conductivas de cada material y de su espesor. Esta relación, establecida por la ley de Fourier (4-6), es el fundamento que permite explicar por qué la selección del material de revestimiento afecta el desempeño térmico del sistema y es expresada como:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (4-6)$$

Donde:

$q$	flujo de calor (W/m <sup>2</sup> )
$\lambda$	conductividad térmica del material (W/m·K)
$dT/dx$	gradiente de temperatura (K/m)

#### 4.2.1 Conducción térmica en materiales de construcción

En una fachada ventilada, el revestimiento exterior es la primera capa que recibe la radiación solar. Su capacidad para resistir la conducción de calor hacia la cavidad depende exclusivamente de dos características del material: su espesor y su conductividad térmica. Materiales con baja conductividad presentan mayor resistencia al paso del calor, reduciendo la temperatura del aire en la cavidad y, en consecuencia, la carga térmica sobre el muro soporte. Esta ecuación (4-7) es la que justifica la evaluación comparativa de materiales con conductividades distintas:

$$R = \frac{e}{k} \quad (4-7)$$

Donde:

$R$	resistencia térmica del material (m <sup>2</sup> ·K/W)
$e$	espesor del material (m)
$k$	conductividad térmica (W/m·K)

En la envolvente arquitectónica, la conducción determina la cantidad de calor que atraviesa los materiales hacia el interior del edificio, siendo fundamental en el análisis del desempeño térmico.

#### 4.2.2 Resistencia térmica por convección

El calor no solo se transfiere a través de los sólidos, también se intercambia entre las superficies del sistema y el aire que las rodea. En el exterior, el viento favorece este intercambio; es decir, en el interior de la cavidad, el movimiento generado por el efecto chimenea lo intensifica. La resistencia a este intercambio varía según las condiciones del entorno: mayor velocidad de aire implica menor resistencia y mayor transferencia.

En el análisis de fachadas ventiladas, las superficies con las que el aire intercambia calor son la interior del revestimiento final, la exterior del muro soporte, y la superficie exterior del revestimiento en contacto con el ambiente:

$$R = \frac{1}{h} \quad (4-8)$$

Donde:

R	resistencia térmica por convección (m <sup>2</sup> ·K/W)
h	coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m <sup>2</sup> ·K)

En fachadas ventiladas, este proceso está asociado al efecto chimenea. Este parámetro permite evaluar la capacidad del flujo para transportar calor dentro de la cámara de aire.

#### 4.2.3 Radiación solar incidente en fachadas

La radiación solar no se comporta igual frente a todos los materiales. Cuando incide sobre el revestimiento exterior, una fracción es reflejada, otra es absorbida y, si el material es translúcido, otra es transmitida. La fracción absorbida es la que eleva la temperatura del revestimiento y desencadena el proceso convectivo en la cavidad. Esta relación entre la absorción del material y la carga térmica que ingresa al sistema explica por qué la selección del revestimiento exterior no es únicamente una decisión estética, es una decisión de desempeño ambiental que condiciona la magnitud del efecto chimenea.

Esta ecuación (4-9) indica que el comportamiento térmico del revestimiento depende directamente de sus propiedades ópticas, se expresa como:

$$q_{solar} = \alpha \cdot G \quad (4-9)$$

Donde:

$q_{solar}$	flujo de calor absorbido por el revestimiento
$\alpha$	absortancia del material (adimensional)
$G$	irradiancia solar incidente (W/m <sup>2</sup> )

#### 4.2.4 Resistencia térmica total del sistema

Los tres mecanismos descritos (conducción, convección y radiación) no actúan de manera aislada sino en serie, como resistencias en un circuito. La resistencia total del sistema es la suma de todas las resistencias individuales, desde el ambiente exterior hasta el espacio interior. Este modelo, establecido en la norma ISO 6946, permite sintetizar el comportamiento global de la envolvente mediante la resistencia térmica total de cualquier configuración de fachada ventilada en un solo indicador. Es la expresión (4-10) que integra el efecto de los materiales seleccionados, el espesor de la cámara y las condiciones convectivas superficiales:

$$R_{total} = R_{int} + \sum \frac{e_i}{\lambda_i} + R_{cav} + R_{ext} \quad (4-10)$$

Donde:

$R_{int}$	resistencia superficial interior (m <sup>2</sup> ·K/W)
$R_{ext}$	resistencia superficial exterior (m <sup>2</sup> ·K/W)
$e_i / \lambda_i$	resistencia por conducción de la capa i
$R_{cav}$	resistencia térmica equivalente de la cavidad ventilada (m <sup>2</sup> ·K/W)

A partir de esta resistencia, se define la transmitancia térmica  $U$  (4-11), parámetro que sintetiza el desempeño térmico del sistema y permite comparar configuraciones con distintos materiales y espesores de cámara en condiciones equivalentes. Valores menores de  $U$  indican mayor capacidad de aislamiento:

$$U = \frac{1}{R_{total}} \quad (4-11)$$

Donde:

$$U \quad \text{eficiente global de transferencia de calor}$$
$$R_{total} \quad \text{resistencia térmica total del sistema (m}^2 \cdot \text{K/W)}$$

En conjunto las ecuaciones desarrolladas establecen la relación directa entre las variables de diseño (tipo de material, espesor de cada capa y dimensionamiento de la cavidad), el desempeño térmico del sistema y al mismo tiempo, integrarlos en un modelo global. Es la base que sustenta la comparación entre configuraciones en la etapa metodológica.

### 4.3 Comportamiento lumínico: fundamento físico

La fachada ventilada no es un sistema lumínicamente neutro. Al interponer una capa de revestimiento exterior entre el ambiente y el interior del edificio, el sistema modifica necesariamente la cantidad y la calidad de la luz natural que llega al espacio. Esta modificación depende de las propiedades ópticas del material de revestimiento: su capacidad para reflejar, absorber o transmitir la radiación visible.

Entender esta relación es necesario para anticipar que distintos materiales de revestimiento no solo tendrán desempeños térmicos distintos, sino también comportamientos lumínicos diferentes y que ambos deben evaluarse de manera conjunta para caracterizar el desempeño integral del sistema.

#### 4.3.1 Reflectancia, transmitancia y absorptancia: balance radiativo

La radiación solar que incide sobre el revestimiento exterior se distribuye en tres componentes según las propiedades del material. Este balance (4-12) establece que la suma de las tres fracciones es siempre la unidad, lo que implica que incrementar la reflectancia necesariamente reduce la absorptancia o la transmitancia, es decir una relación de compensación que tiene consecuencias simultáneas sobre el comportamiento térmico y lumínico del sistema:

$$p + \alpha + \tau = 1 \quad (4-12)$$

Donde:

$\rho$	reflectancia — fracción de radiación reflejada
$\alpha$	absorptancia — fracción de radiación absorbida
$\tau$	transmitancia — fracción de radiación transmitida

#### 4.3.2 Ecuaciones de iluminancia y factor de luz diurna (DF)

La iluminancia mide la cantidad de flujo luminoso que incide sobre una superficie interior. Sin embargo, su valor depende de las condiciones climáticas del momento, lo que dificulta la comparación entre configuraciones simuladas bajo condiciones distintas:

$$E = \frac{\Phi}{A} \quad (4-13)$$

Donde:

E	iluminancia (lux)
$\Phi$	flujo luminoso (lúmenes)
A	área de la superficie receptora (m <sup>2</sup> )

Para comparar el desempeño lumínico de distintas configuraciones de manera objetiva e independiente de las condiciones exteriores, la literatura utiliza el Factor de Luz Diurna (DF, por sus siglas en inglés *Daylight Factor*). Este indicador (4-14) expresa la iluminación interior como proporción de la exterior, permitiendo comparar escenarios bajo las mismas condiciones de referencia.

Es el indicador más utilizado en la evaluación de estrategias de iluminación natural en edificaciones educativas y el que sustenta la evaluación comparativa de los escenarios en la metodología:

$$DF = \frac{E_{int}}{E_{ext}} \times 100 \quad (4-14)$$

Donde:

DF	factor de luz diurna (%)
$E_{int}$	iluminancia interior (lux)
$E_{ext}$	iluminancia exterior de referencia (lux)

#### 4.4 Comportamiento acústico: fundamento físico

El sistema de fachada ventilada introduce entre el exterior y el interior un conjunto de capas (revestimiento, cavidad de aire y muro soporte) que en conjunto modifican la transmisión del sonido. A diferencia del comportamiento térmico, donde la cavidad siempre contribuye positivamente, el efecto de la cavidad sobre el aislamiento acústico es más complejo: puede mejorar el aislamiento por el efecto de doble pared, pero también puede introducir frecuencias de resonancia que lo reducen.

Comprender estos fenómenos es necesario para entender por qué la masa superficial del panel exterior es la variable de mayor incidencia en el desempeño acústico del sistema, y por qué el diseño de las aberturas de ventilación involucra un compromiso entre ventilación y control sonoro.

##### 4.4.1 Ley de masa: pérdida de transmisión sonora en particiones simples

La resistencia de un elemento constructivo frente al paso del sonido está fundamentalmente determinada por su masa superficial. A mayor masa por unidad de área, mayor es la energía necesaria para hacer vibrar el elemento y, por tanto, mayor la atenuación del ruido incidente.

Esta relación (4-15), conocida como ley de masa, es el principio que explica por qué materiales con densidades y espesores distintos ofrecen niveles de aislamiento diferentes:

$$TL = 20 \log(m \cdot f) - 47.5 \quad (4-15)$$

Donde:

$TL$	pérdida de transmisión sonora (dB)
$m$	masa superficial (kg/m <sup>2</sup> )
$f$	frecuencia del sonido (Hz)

#### 4.4.2 Índice de reducción sonora ( $R_w$ ) y pérdida de transmisión ( $TL$ )

El índice de reducción sonora ponderado  $R_w$  representa el desempeño acústico global del sistema mediante un valor único expresado en dB. Se obtiene ajustando la curva de pérdida de transmisión del sistema a una curva de referencia según el procedimiento de la norma ISO 717-1. Este indicador permite comparar distintas configuraciones de fachada ventilada considerando el efecto conjunto del revestimiento y la cavidad, y es el que se adopta en la evaluación comparativa de la metodología.

La presencia de aberturas de ventilación puede reducir el aislamiento acústico global, por lo que su dimensionamiento involucra un compromiso entre la eficiencia del efecto chimenea y el control sonoro del sistema.

#### 4.5 Balance integrado del sistema: modelo multicapa

El comportamiento de una fachada ventilada no depende de una sola variable ni puede explicarse únicamente a partir del desempeño térmico del sistema. En este tipo de envolventes, las condiciones térmicas, lumínicas, acústicas y de calidad del aire interior se relacionan entre sí, por lo que cualquier modificación en la configuración de la fachada puede generar cambios simultáneos en distintas dimensiones del confort ambiental.

Esta relación entre variables forma parte del funcionamiento propio del sistema y debe considerarse dentro del análisis de la envolvente. Bajo este enfoque, la fachada ventilada se entiende como un sistema multicapa donde los fenómenos de transferencia de calor, circulación de aire, control lumínico y aislamiento acústico ocurren de manera paralela y presentan efectos cruzados entre sí.

#### 4.5.1 Interacción de variables térmicas, lumínicas, acústicas e IAQ

La interacción entre las distintas variables de desempeño puede representarse mediante la función (4-16), donde el comportamiento de la fachada depende simultáneamente de factores climáticos, geométricos y de las propiedades físicas de los materiales.

$$Y = f (T, v, G, m, C) \quad (4-16)$$

Donde:

T	temperatura (K)
v	velocidad del aire en la cavidad (m/s)
G	irradiancia solar incidente (W/m <sup>2</sup> )
m	masa superficial del panel exterior (kg/m <sup>2</sup> )
C	concentración de contaminantes — CO <sub>2</sub> (ppm)

Esta representación permite expresar que el desempeño de la fachada ventilada no puede evaluarse de forma independiente para cada dimensión de confort. Por el contrario, cualquier modificación en la configuración del sistema puede alterar simultáneamente distintas condiciones ambientales del espacio interior.

Por ejemplo, un aumento en el espesor de la cavidad puede favorecer la disipación térmica y mejorar la ventilación del sistema; sin embargo, también puede modificar el comportamiento acústico o alterar las condiciones de iluminación natural. De manera similar,

la selección de ciertos materiales puede mejorar el aislamiento térmico, pero afectar la reflectancia o la absorción sonora de la envolvente.

Debido a ello, el análisis de fachadas ventiladas requiere una evaluación integral que permita comparar distintas configuraciones bajo condiciones equivalentes, considerando el efecto conjunto de las variables que intervienen en el sistema.

Las ecuaciones presentadas en este capítulo se muestran de forma conceptual y simbólica. Los valores específicos relacionados con materiales, espesores y condiciones climáticas del caso de estudio se desarrollan posteriormente en el capítulo de Metodología.

## 5 METODOLOGIA

### 5.1 Enfoque metodológico de la investigación

El análisis del desempeño de fachadas ventiladas requiere un enfoque cuantitativo que permita evaluar configuraciones de diseño bajo condiciones controladas y comparables. Esta investigación adopta un enfoque cuasiexperimental sustentado en planteamientos físico-matemáticos, modelado BIM y simulaciones térmicas, los cuales permiten cuantificar el comportamiento térmico, lumínico, acústico y de calidad del aire de distintas configuraciones.

La estrategia metodológica se organiza en tres fases. En la primera, se desarrolla el modelo tridimensional del caso de estudio en Autodesk Revit 2024 y se establece el caso base mediante mediciones in situ. En la segunda, se configuran los nueve escenarios de fachada ventilada y se ejecutan los análisis de insolación solar acumulada. En la tercera, se aplican los métodos analíticos para la evaluación lumínica, acústica y de calidad del aire, y se comparan todos los escenarios contra la condición base y las normativas de referencia.



**Tabla 5-1 Proceso metodológico**

#### 5.1.1 Tipo de investigación

La investigación corresponde a un enfoque cuantitativo de carácter cuasiexperimental. El diseño comparativo se establece mediante diez escenarios evaluados bajo condiciones idénticas: un caso base y nueve configuraciones de fachada ventilada que combinan tres materiales de revestimiento —fibrocemento (10 mm), HPL o laminado de alta presión (8 mm) y ACP o panel compuesto de aluminio (4 mm)— con tres espesores de cámara de aire: 5, 7 y 11 cm.

En todos los escenarios se mantienen constantes la geometría del aula, su orientación poniente, las condiciones climáticas del sitio y el período de análisis, de modo que la única variable que cambia entre casos es la configuración del sistema de fachada ventilada. Este diseño permite establecer relaciones cuantificables entre parámetros de diseño y comportamiento ambiental sin necesidad de intervención física en el edificio.

### **5.2.1 Fundamento de los modelos utilizados**

- Modelo analítico de resistencias térmicas en serie (ISO 6946):

El comportamiento térmico de la envolvente se evaluó mediante el modelo de resistencias térmicas en serie establecido en la norma ISO 6946:2017, el cual representa cada capa constructiva como una resistencia al flujo de calor. En este enfoque, la resistencia de cada material depende directamente de su espesor e inversamente de su conductividad térmica, mientras que el flujo de calor se obtiene a partir de la diferencia de temperatura entre ambos lados de la envolvente dividida entre la resistencia térmica total ( $q = \Delta T / R_{total}$ ).

Este método es utilizado para el análisis de sistemas multicapa en régimen estacionario y resulta adecuado para comparar configuraciones de diseño bajo condiciones climáticas controladas.

- Modelo BIM en Autodesk Revit 2024:

El modelo digital desarrollado en Autodesk Revit 2024 permitió analizar el comportamiento térmico de la fachada ventilada mediante las propiedades físicas asignadas a cada capa constructiva. El software calcula la resistencia térmica total del sistema a partir de la suma de las resistencias de cada material, siguiendo principios compatibles con la metodología de la ISO 6946.

Sin embargo, a diferencia del cálculo analítico simplificado, Revit considera el comportamiento integral de la cámara de aire, incluyendo su contribución volumétrica y los efectos a la transferencia de calor dentro del espacio ventilado, lo que puede generar valores de resistencia térmica superiores. Además, el análisis de insolación solar acumulada utiliza parámetros geográficos y climáticos del sitio (como latitud, orientación y trayectoria solar) para estimar la energía incidente sobre la envolvente durante el periodo de estudio.

- Método BRE Split Flux (Factor de Luz Diurna):

El análisis lumínico se basó en el método BRE Split Flux, desarrollado por el Building Research Establishment (BRE) en Reino Unido para la estimación del Factor de Luz Diurna (Daylight Factor, DF). Este método divide la iluminancia interior en dos componentes principales: la componente de cielo, correspondiente a la luz que ingresa directamente, y la componente reflejada, asociada a las reflexiones producidas en superficies interiores y exteriores.

La formulación utilizada permitió estimar la iluminancia interior considerando la reflectancia del panel exterior y una iluminancia exterior tipo CIE de 10,000 lux, condición estándar utilizada para realizar comparaciones objetivas entre distintas configuraciones de fachada. La incorporación de estrategias pasivas de control lumínico en envolventes ventiladas ha demostrado contribuir al confort visual y a la reducción de la demanda energética en edificaciones.

- Modelo de calidad del aire ASHRAE 62.1-2019:

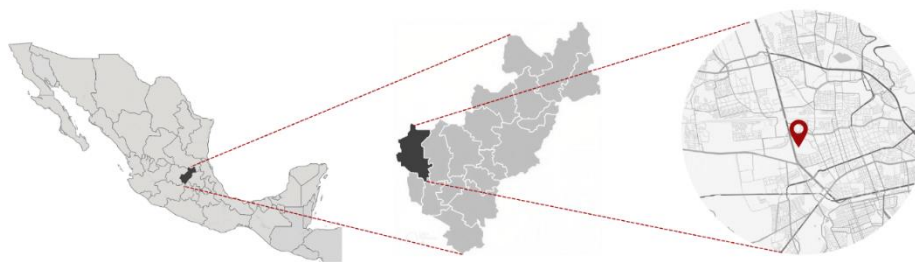
La estimación de la calidad del aire interior se realizó mediante el modelo estacionario de balance de masa de CO<sub>2</sub> propuesto en ASHRAE 62.1-2019. Este modelo determina la concentración interior de CO<sub>2</sub> a partir de la relación entre la concentración exterior de referencia, la generación de CO<sub>2</sub> producida por los ocupantes y el caudal de ventilación disponible en el espacio.

El caudal de ventilación se calculó a partir de las renovaciones de aire por hora (ACH) asociadas al efecto chimenea en la cámara ventilada. Debido a que la resolución numérica detallada del flujo de aire quedó fuera del alcance de este estudio, los valores de ACH utilizados se tomaron de literatura especializada sobre ventilación natural en fachadas ventiladas y comportamiento termo-fluidodinámico de cavidades ventiladas.

## 5.2 Caso de estudio

La investigación se desarrolla en el edificio Parque Biotecnológico, ubicado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, en el estado de Querétaro, México. Se trata de un inmueble de uso educativo de cinco niveles cuya distribución, características constructivas y condiciones de ocupación lo convierten en un caso representativo para el análisis del desempeño ambiental de sistemas de fachada ventilada en clima semiárido.

**Figura 5-1 Ubicación de caso de estudio**



La región de Querétaro se clasifica como BSk según la tipología de Köppen-Geiger: clima semiárido templado, con temperaturas exteriores que oscilan entre 30 y 37 °C en condiciones críticas de verano, variaciones térmicas diurnas de 10 a 15 °C, y radiación solar horizontal global (GHI) promedio de 5.5 a 6.0 kWh/m<sup>2</sup>/día (Beck et al., 2018; CONAGUA, 2024). Este contexto climático incrementa significativamente las ganancias térmicas en la envolvente e intensifica la demanda de estrategias pasivas de control solar.

La elección del edificio responde a que sus espacios presentan problemáticas documentadas mediante medición in situ: sobrecalentamiento interior, sobreexposición lumínica y niveles de ruido que superan los límites normativos. Estas condiciones permiten evaluar de manera aplicada el impacto de la fachada ventilada como estrategia pasiva de mejora ambiental integral.

**Figura 5-2 Fachada caso de estudio**



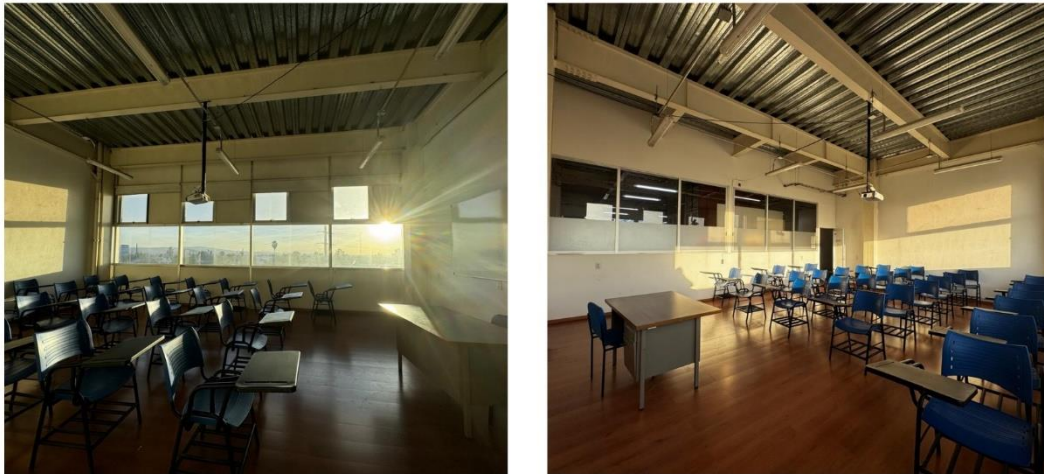
### **5.2.1 Características del aula analizada**

Para efectos del análisis se selecciona un aula tipo ubicada en el tercer nivel del edificio, orientada hacia el poniente. Esta orientación representa la condición más crítica en términos de exposición a radiación solar directa, dado que recibe incidencia directa durante las horas de la tarde, coincidiendo con los picos de temperatura exterior y con el período de mayor ocupación académica. Los datos específicos de esta aula se expresan en la tabla 5-2

**Tabla 5-2 Características de aula**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Largo	8.3	m
Ancho	7.8	m
Área	64.74	m <sup>2</sup>
Altura interior	4.5	m
Volumen	291.33	m <sup>3</sup>
Orientación fachada	Poniente	—
Envolvente base	Fachada acristalada con marco de aluminio	—
Muros interiores	Tablaroca	—
Ocupación estimada	20–25 alumnos	personas
Horario de uso	8:00–18:00 h	—

**Figura 5-3 Interior de aula**



### 5.2.2 Mediciones in situ — caso base

Con el fin de caracterizar las condiciones reales del espacio y establecer el caso base de referencia para cada variable de estudio, se realizaron mediciones in situ durante cinco días representativos de agosto de 2025, en tres franjas horarias: 10:00, 14:00 y 18:00 horas. Los instrumentos utilizados fueron termohigrómetro digital, luxómetro y sonómetro.

**Tabla 5-3 Resultados de mediciones in situ**

Variable	Valor medido (caso base)	Rango de confort	Normativa	Cumplimiento
Temperatura interior	25–30 °C	22–26 °C	ASHRAE 55-2020	Parcial
Humedad relativa	37–48%	30–60%	ASHRAE 55-2020	Cumple
Iluminancia	680–1,037 lux	300–500 lux	NOM-025-STPS-2008	Excede
Nivel sonoro	65–76 dBA	≤ 68 dBA	NOM-081-SEMARNAT-1994	Excede

Los resultados evidencian que el aula presenta condiciones que exceden los rangos óptimos de confort en tres de las cuatro dimensiones evaluadas. La temperatura interior de hasta 30 °C supera el límite superior de la zona de confort de ASHRAE 55; la iluminancia

de hasta 1,037 lux duplica el límite de la NOM-025; y el nivel sonoro promedio de 70.1 dBA supera los 68 dBA de la NOM-081.

Estas condiciones documentadas constituyen la línea base contra la cual se evalúa el impacto de los nueve escenarios de fachada ventilada. Para el modelado térmico se adoptó una velocidad de viento representativa de 3 m/s, dentro del rango promedio regional de 2.5 a 4.5 m/s (CONAGUA, 2024).

### 5.3 Variables de estudio

#### 5.3.1 Variables independientes

Las variables independientes corresponden a los dos parámetros de diseño que se modifican sistemáticamente entre los nueve escenarios: el espesor de la cámara de aire y el tipo de material de revestimiento exterior.

El espesor de la cámara de aire determina la capacidad de circulación del aire en la cavidad y, con ello, la eficiencia del efecto chimenea. Se seleccionan tres valores representativos del rango constructivo viable en fachadas ventiladas: 5 cm como límite inferior con flujo significativo, 7 cm como punto de equilibrio entre desempeño y factibilidad constructiva, y 11 cm como valor amplio donde el efecto chimenea alcanza su mayor expresión.

**Tabla 5-4 Clasificación de espesores de cámara de aire**

Rango de espesor	Clasificación	Comportamiento térmico	Nivel de ventilación	Implicación en diseño
5 cm	Cavidad reducida	Disipación térmica moderada	Baja-media	Sistemas compactos
7 cm	Cavidad intermedia	Buen equilibrio térmico	Media	Condición óptima práctica
11 cm	Cavidad amplia	Alta disipación térmica	Alta	Mayor efecto chimenea

Los materiales de revestimiento exterior se seleccionaron considerando disponibilidad comercial en México, diversidad de propiedades termofísicas y pertinencia para estrategias de bajo impacto ambiental.

El ACP de 4 mm actúa como referencia convencional por ser la solución más extendida en fachadas ventiladas en México, ya que presenta la mayor reflectividad del grupo (0.70) y la menor emisividad (0.15). El fibrocemento de 10 mm se incorpora por su bajo costo relativo, disponibilidad regional y emisividad de 0.88 que favorece la disipación radiante. El HPL de 8 mm representa la alternativa de mayor resistencia a la intemperie y menor conductividad térmica del grupo ( $k = 0.29 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ).

**Tabla 5-5 Comparativa de materiales de revestimiento exterior**

Propiedades	Fibrocemento	HPL	ACP
Masa superficial (kg/m <sup>2</sup> )	14	10.8	6.12
Viabilidad económica	Alta	Medio	Alta
Viabilidad constructiva	Alta	Alta	Alta
Impacto ambiental producción	Medio	Medio	Alta
Impacto ambiental ciclo de vida	Bajo-medio	Bajo	Medio
Desempeño térmico	Medio	Alta	Bajo
Control solar (reflectancia)	Medio	Medio-alto	Alta
Efecto chimenea (emisividad)	Alta	Alta	Limitado
Desempeño acústico (masa)	Alta	Medio	Bajo
Mantenimiento	Bajo	Muy bajo	Bajo
Modularidad	Alta	Muy alta	Muy alta

### 5.3.2 Variables dependientes

Las variables dependientes son los indicadores que cuantifican el efecto de cada configuración sobre las condiciones ambientales del aula. Su selección responde a las cuatro dimensiones de confort evaluadas: térmica, lumínica, acústica y de calidad del aire.

**Tabla 5-6 Variables dependientes**

Variable	Símbolo	Unidad	Método de obtención	Normativa referencia	Meta
Insolación acumulada	Esol	kWh/m <sup>2</sup>	Análisis solar Revit 2024	—	Reducción vs. base
Resistencia térmica	R	m <sup>2</sup> ·K/W	Editor de montaje Revit 2024	ISO 6946	Maximizar R
Transmitancia térmica	U	W/m <sup>2</sup> ·K	U = 1/R	—	Minimizar U
Flujo de calor	q	W/m <sup>2</sup>	q = ΔT/R	—	Reducción ≥ 10%
Iluminancia interior	E	lux	Medición in situ + DF analítico	300–500 lux NOM-025	Reducción hacia 500 lux
Factor de luz diurna	DF	%	Método BRE Split Flux	DF ≥ 2% CIBSE	Reducción ≥ 10%
Índice reducción sonora	Rw	dB	Ley de masa ISO 717-1	≥ 35 dB NOM-081	Maximizar Rw
Nivel sonoro interior	L_int	dB(A)	L_ext – Rw	≤ 68 dB(A) NOM-081	≤ 68 dB(A)
Concentración CO <sub>2</sub>	C	ppm	Modelo ASHRAE 62.1	≤ 1,000 ppm	Reducción ≥ 15%
Tasa renovación aire	ACH	ren/h	Datos literatura (Bansal, 1994)	—	Incremento vs. base

### 5.4 Modelo matemático de transferencia térmica

Para el análisis del comportamiento térmico de la envolvente, se plantea un modelo matemático basado en el principio de resistencias térmicas en serie, conforme a la norma ISO 6946. Este modelo permite cuantificar el flujo de calor a través de sistemas multicapa considerando los mecanismos de conducción en los materiales sólidos y los efectos de convección en las superficies en contacto con el aire.

Para la aplicación del modelo, se establecen condiciones de frontera representativas de un escenario crítico en clima cálido semiárido, considerando la orientación poniente del aula

durante horas de máxima radiación solar. Estas condiciones incluyen temperaturas interior y exterior obtenidas a partir de mediciones y datos climáticos, así como coeficientes de transferencia de calor por convección en las superficies interior y exterior del sistema.

**Tabla 5-7 Condiciones de frontera**

Variable	Símbolo	Valor	Unidad	Fuente
Temperatura exterior crítica	$T_{ext}$	37	°C	Medición in situ agosto 2025
Temperatura interior de confort	$T_{int}$	25	°C	ASHRAE 55-2020
Diferencia térmica	$\Delta T$	12	°C	$T_{ext} - T_{int}$
Coeficiente convectivo exterior	$H_{ext}$	15	W/m <sup>2</sup> ·K	Correlación $v = 3$ m/s
Coeficiente convectivo interior	$H_{int}$	8	W/m <sup>2</sup> ·K	Convección natural (ISO 6946)
Radiación solar incidente	$G$	800	W/m <sup>2</sup>	NASA POWER, Querétaro

#### 5.4.1 Resistencia térmica por conducción

La resistencia térmica por conducción de cada material de revestimiento se calcula conforme a la ecuación (4-7) del marco teórico. La tabla siguiente presenta los valores obtenidos para los tres materiales, utilizando los espesores estándar de cada sistema y la conductividad  $k$  corregida (HPL:  $k = 0.29$  W/m·K):

**Tabla 5-8 Resistencia térmica por conducción**

Material	Espesor $e$ (m)	Conductividad $k$ (W/m·K)	$R_{cond} = e/k$ (m <sup>2</sup> ·K/W)
HPL	0.008	0.29	0.0276
Fibro cemento	0.01	0.35	0.0286
ACP	0.004	1.6	0.0025

El HPL presenta la menor conductividad del grupo ( $k = 0.29 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ), lo que se traduce en la mayor resistencia conductiva a pesar de tener el menor espesor. El ACP, con  $k = 1.60 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , ofrece la mínima resistencia conductiva, aunque compensa con su alta reflectancia que reduce la radiación absorbida.

#### 5.4.2 Resistencia térmica por convección

La resistencia convectiva en las superficies interior y exterior se determina con  $R = 1/h$ , conforme a la ecuación (4-8) del marco teórico. Los coeficientes adoptados son  $H_{ext} = 15 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  (correspondiente a viento moderado de 3 m/s según la correlación  $h = 5.7 + 3.8v$ ) y  $H_{int} = 8 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  para convección natural. Estos valores se mantienen constantes en los diez escenarios.

**Tabla 5-9 Resistencia térmica por convección superficial**

Superficie	$h \text{ (W/m}^2\cdot\text{K)}$	$R = 1/h \text{ (m}^2\cdot\text{K/W)}$	Condición de referencia
Exterior	15	0.067	Viento moderado $v = 3 \text{ m/s}$ (CONAGUA, 2024)
Interior	8	0.125	Convección natural, espacio cerrado (ISO 6946)

#### 5.4.3 Resistencia total del sistema

La resistencia térmica total de cada escenario se obtiene conforme a la ecuación (4-10) del marco teórico. La resistencia de la cámara de aire varía con el espesor:  $0.15 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$  para 5 cm,  $0.17 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$  para 7 cm y  $0.18 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$  para 11 cm. El flujo de calor se calcula como  $q = \Delta T / R_{total}$  con  $\Delta T = 12 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Tabla 5-10 Resistencia total y flujo de calor por escenario**

Esc.	Material	Cámara	$R_{panel}$	$R_{cav}$	$R_{ext}$	$R_{int}$	$R_{total}$ (m <sup>2</sup> ·K/W)	q (W/m <sup>2</sup> )
Base	Cristal	—	0.15	—	0.067	0.125	0.0455	263.7
1	Fibroemento	5 cm	0.0286	0.15	0.067	0.125	0.3706	32.38
2	Fibroemento	7 cm	0.0286	0.17	0.067	0.125	0.3906	30.72
3	Fibroemento	11 cm	0.0286	0.18	0.067	0.125	0.4006	29.96
4	HPL	5 cm	0.0276	0.15	0.067	0.125	0.3696	32.47
5	HPL	7 cm	0.0276	0.17	0.067	0.125	0.3896	30.8
6	HPL	11 cm	0.0276	0.18	0.067	0.125	0.3996	30.03
7	ACP	5 cm	0.0025	0.15	0.067	0.125	0.3445	34.83
8	ACP	7 cm	0.0025	0.17	0.067	0.125	0.3645	32.92
9	ACP	11 cm	0.0025	0.18	0.067	0.125	0.3745	32.04

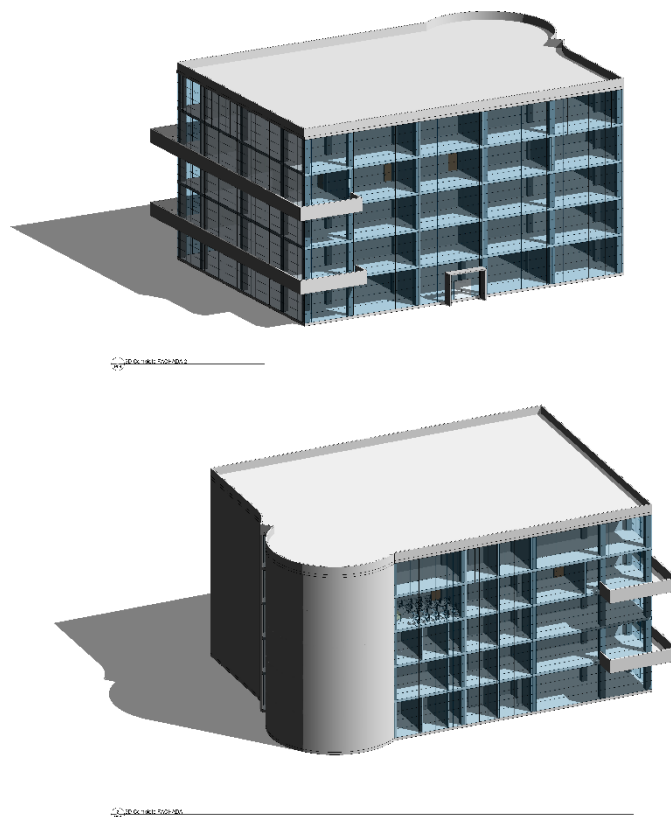
Los resultados evidencian que la cámara de aire es la variable de mayor incidencia en la resistencia total del sistema: su incremento de 5 a 11 cm mejora R en promedio un 7.8% independientemente del material. El HPL con cámara de 11 cm alcanza la mayor resistencia analítica del grupo ( $R = 0.3996 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ), mientras que el ACP registra consistentemente los valores más bajos debido a su alta conductividad. El incremento de resistencia entre escenarios no es proporcional, es decir el paso de 5 a 7 cm genera mayor beneficio relativo que el de 7 a 11 cm, evidenciando rendimientos decrecientes en espesores mayores.

## 5.5 Métodos de análisis del desempeño en fachadas ventiladas

El modelado del caso de estudio se desarrolla mediante la metodología Building Information Modeling (BIM), utilizando el software Autodesk Revit, con el objetivo de generar una representación digital precisa del edificio y su envolvente arquitectónica. Este enfoque permite integrar en un único modelo la información geométrica, constructiva y material, lo cual resulta fundamental para el análisis del desempeño de la fachada ventilada bajo un enfoque cuantitativo.

A partir de este enfoque, se desarrolló un modelo tridimensional del edificio en su estado actual (sin fachada ventilada), el cual funciona como caso base de referencia para el análisis. Este modelo define la geometría del edificio, su orientación y la distribución espacial, incluyendo la fachada acristalada existente

La Figura 5-4 muestra dos vistas tridimensionales del modelo generado. La fachada con orientación sur-poniente (visible en la vista inferior) presenta una mayor exposición a la radiación solar durante las horas críticas del día, lo que la convierte en el elemento más relevante para el análisis del desempeño térmico. Esta condición justifica su selección como zona de estudio para la implementación de la fachada ventilada, ya que permite evaluar el sistema bajo condiciones desfavorables y, por tanto, medir con mayor claridad su impacto en la reducción de ganancias térmicas



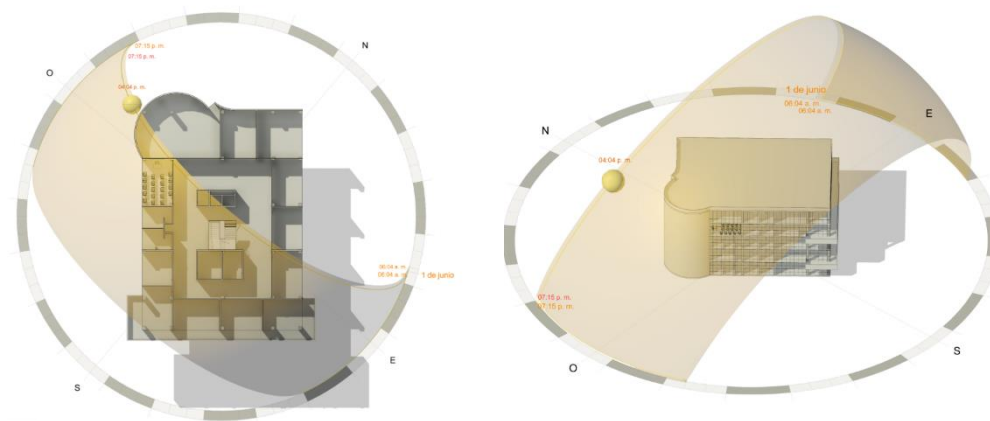
**Figura 5-4 Vistas del modelo BIM en Autodesk Revit 2024**

### 5.5.1 Análisis solar del caso de estudio

Con el objetivo de identificar las condiciones de exposición solar que inciden sobre la envolvente del edificio, se realizó un análisis de asoleamiento. Este análisis permite comprender la trayectoria solar y su interacción con la geometría del edificio, constituyendo un insumo clave para la evaluación del desempeño térmico de la fachada ventilada.

La representación en planta evidencia que, conforme avanza el día, la radiación solar incide de manera progresiva sobre la envolvente, alcanzando su punto más crítico cuando el sol descende hacia el poniente. En este momento, el ángulo de incidencia tiene una entrada directa de la radiación al interior del aula, particularmente debido a la presencia de superficies acristaladas. Esta condición incrementa tanto la ganancia térmica dentro del aula como la intensidad de iluminación natural en determinadas zonas del espacio.

Por otra parte, la vista en perspectiva de la figura 5-5 permite identificar con mayor claridad la relación entre la geometría del edificio y la exposición solar de la fachada. A diferencia de otras orientaciones donde la radiación puede controlarse con mayor facilidad, la orientación poniente presenta una condición más desfavorable durante las últimas horas del día, ya que la radiación incide con menor altura solar y de forma más directa sobre la envolvente.



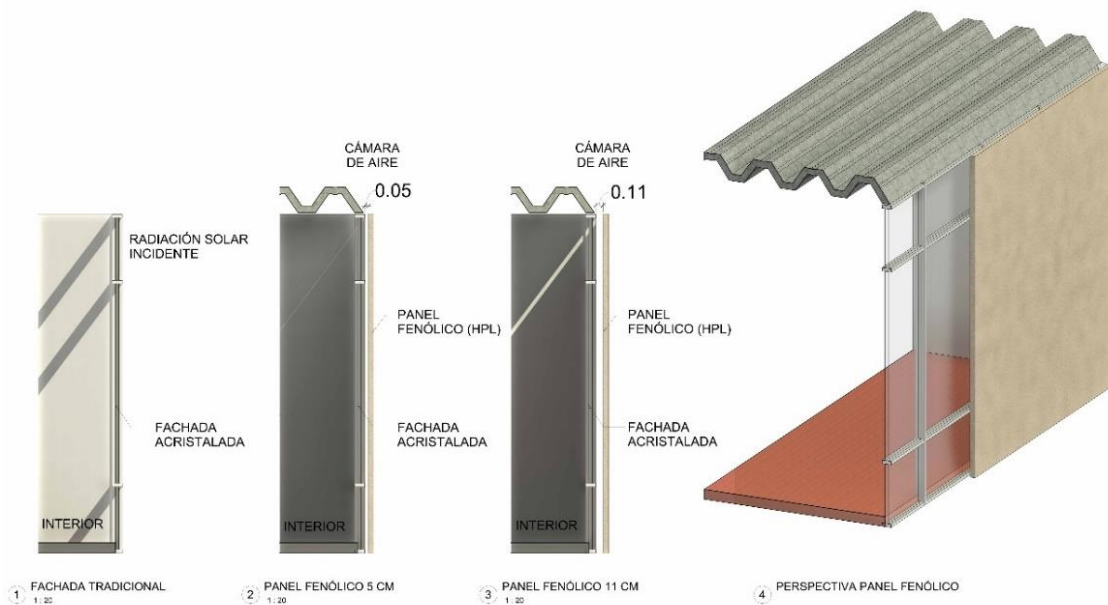
**Figura 5-5 Recorrido solar**

Al comparar este comportamiento con los datos obtenidos durante las mediciones in situ, se observa que los mayores incrementos de temperatura interior y los valores más altos de iluminancia coinciden con el periodo identificado como de mayor exposición solar. Sin embargo, los resultados también muestran que el comportamiento térmico del espacio no

depende únicamente de la radiación incidente. Factores como las características de los materiales, la ventilación del aula y las condiciones de ocupación también influyen en la respuesta ambiental del espacio interior.

### 5.5.2 Configuración de escenarios en Revit

En las figuras siguientes (5-6, 5-7, 5-8) se presentan dos configuraciones de cámara de aire: 0.05 m y 0.11 m, aplicadas en cada uno de los sistemas evaluados. Esta variación responde a rangos constructivos viables dentro de sistemas de fachada ventilada, permitiendo analizar cómo la separación entre el revestimiento exterior y la fachada base influye en la ventilación de la cavidad.

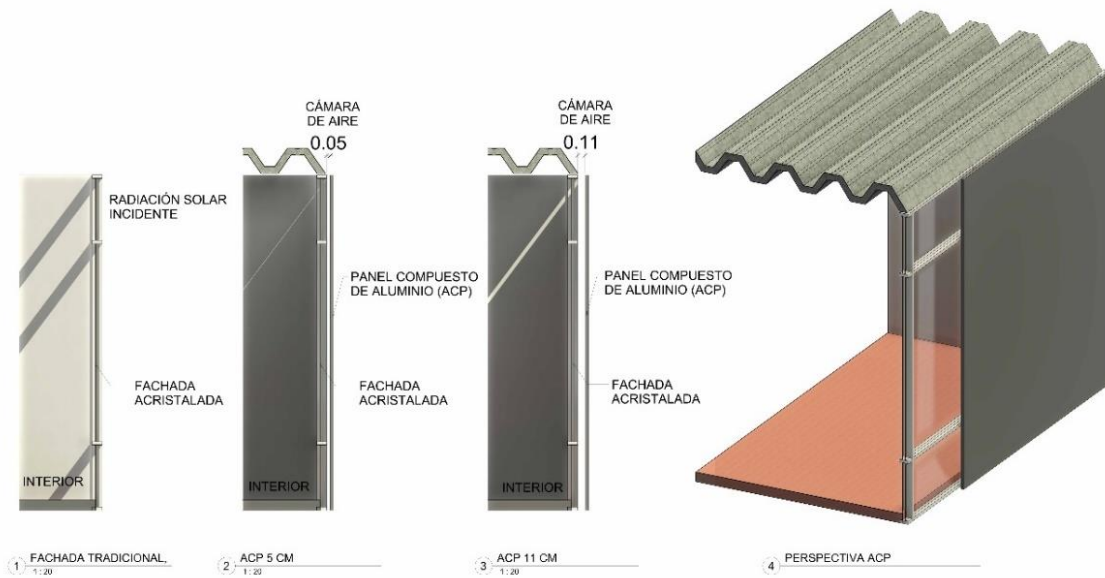


**Figura 5-6 Representación panel HPL**

**Figura 5-7 Representación panel ACP**



**Figura 5-8 Representación fibrocemento**



Más allá de su representación geométrica, el cambio de espesor modifica directamente las condiciones de circulación del aire en la cavidad, lo que impacta en la capacidad del sistema para disipar el calor acumulado por efecto de la radiación solar. En este sentido, los modelos no solo ilustran una diferencia dimensional, sino que representan escenarios con comportamientos térmicos potencialmente distintos.

Los diez escenarios se configuran mediante tipos de muro diferenciados en el Editor de montaje. Cada tipo incluye las capas del sistema de fachada ventilada en orden exterior-interior: panel de revestimiento (Acabado 1), cámara de aire (Capa térmica/de aire) y contornos del núcleo. El caso base corresponde al muro acristalado existente sin fachada ventilada.

**Tabla 5-11 Matriz de escenarios**

Escenario	Material panel	Espesor panel	Cámara de aire	Nombre en Revit	R Revit (m <sup>2</sup> ·K/W)	U Revit (W/m <sup>2</sup> ·K)
0	Cristal	50 mm	—	Acrystalado	0.0455	21.98
1	Fibrocemento	10 mm	5 cm	FV-FC-5	2.0286	0.493
2	Fibrocemento	10 mm	7 cm	FV-FC-7	2.8286	0.354
3	Fibrocemento	10 mm	11 cm	FV-FC-11	4.4286	0.226
4	HPL	8 mm	5 cm	FV-HPL-5	2.2759	0.439
5	HPL	8 mm	7 cm	FV-HPL-7	3.0759	0.325
6	HPL	8 mm	11 cm	FV-HPL-11	4.6759	0.214
7	ACP	4 mm	5 cm	FV-ACP-5	2.025	0.494
8	ACP	4 mm	7 cm	FV-ACP-7	2.825	0.354
9	ACP	4 mm	11 cm	FV-ACP-11	4.425	0.226

Los valores de R obtenidos en Revit son significativamente mayores que los del modelo analítico (sección 5.5) porque Revit incorpora la resistencia volumétrica completa de la cámara de aire, mientras que el modelo analítico utiliza únicamente el coeficiente convectivo superficial de la cavidad. Ambos métodos son válidos y complementarios: el modelo analítico permite el cálculo transparente paso a paso; el modelo BIM integra el sistema completo con mayor precisión conforme a ISO 6946.

### 5.5.3 Análisis de insolación solar acumulada

El análisis de insolación solar acumulada se realiza mediante el módulo de Análisis solar de Autodesk Revit 2024. El tipo de estudio seleccionado es Insolación acumulada en unidades de kWh/m<sup>2</sup>, con período anual del 1 de enero al 31 de diciembre de 2025, del amanecer al anochecer. El estilo de visualización Insolación anual de análisis solar permite representar la distribución espacial de la radiación sobre la envolvente mediante mapa de falso color.

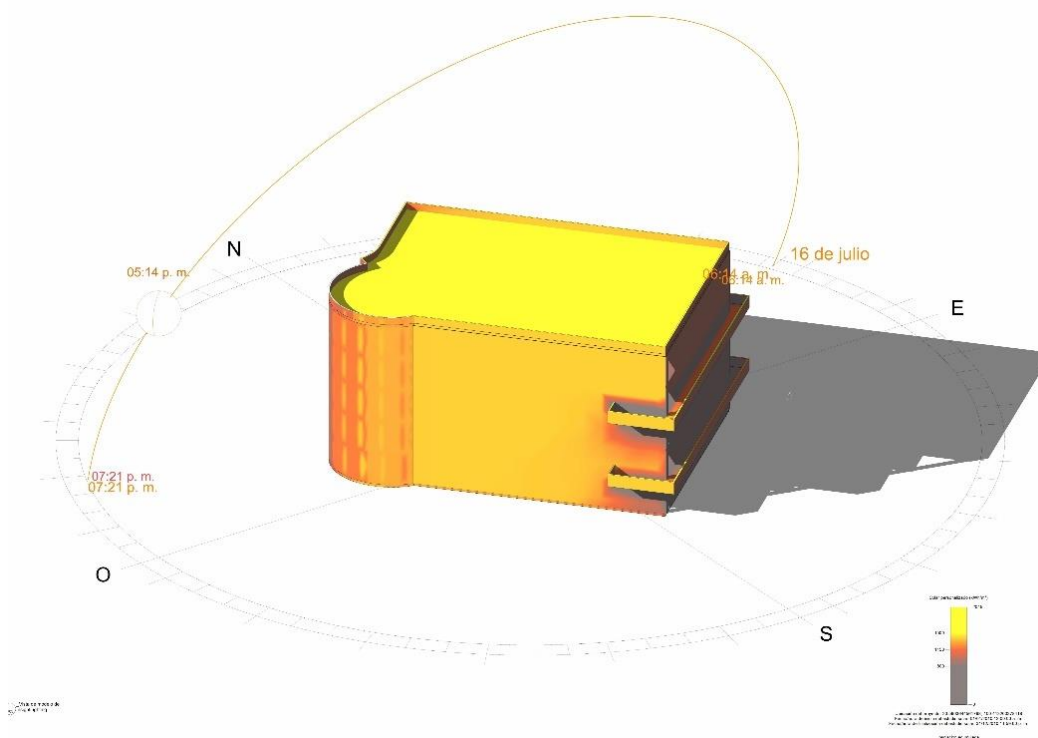


Figura 5-9 Mapa de insolación acumulada anual 2025

El caso base analiza la envolvente completa del edificio (26,847 m<sup>2</sup>), obteniendo una insolación acumulada total de 7,250,002 kWh y un valor promedio de 270 kWh/m<sup>2</sup> anual. La distribución espacial muestra que la cubierta horizontal concentra los valores máximos ( $\approx$  2,045 kWh/m<sup>2</sup>), los muros verticales orientados al sur y poniente registran entre 800 y 1,500 kWh/m<sup>2</sup>, y las zonas protegidas por voladizos presentan valores mínimos próximos a cero.

Este dato de insolación de 270 kWh/m<sup>2</sup> es un valor de contexto que no varía entre los nueve escenarios de fachada ventilada, si no que representa la radiación que llega a la superficie exterior del panel independientemente del material. Lo que varía entre escenarios es la fracción de esa radiación que es absorbida, reflejada o disipada por cada configuración, cuantificada mediante los indicadores R, U y q presentados en las secciones anteriores.

#### **5.5.4 Evaluación lumínica**

La evaluación del confort lumínico combina la medición directa in situ del caso base con el cálculo analítico del Factor de Luz Diurna (DF%), para los nueve escenarios. La referencia normativa es la NOM-025-STPS-2008 (300–500 lux para espacios educativos) y la meta de la hipótesis es una reducción lumínica de al menos el 10% respecto al caso base.

El Factor de Luz Diurna se calcula según la ecuación (4-13), donde  $E_{int}$  es la iluminancia interior estimada a partir de la reflectancia del panel exterior de cada escenario, y  $E_o = 10,000$  lux es la iluminancia exterior de referencia bajo cielo nublado CIE (método BRE Split Flux). Las reflectancias aplicadas son 0.35 para fibrocemento, 0.45 para HPL y 0.70 para ACP, obtenidas de las propiedades ópticas configuradas en Autodesk Revit 2024.

**Tabla 5-12 Evaluación lumínica por escenario**

Caso	Material	Reflectancia panel	Ei estimada (lux)	Eo referencia (lux)	DF (%)	Reducción vs. base	Cumple NOM-025
Caso base	Cristal	0.08	862	10,000	8.62	—	Excede
FV-FC-5	FB	0.35	795	10,000	7.95	7.80%	Excede
FV-FC-7	FB	0.35	778	10,000	7.78	9.70%	Excede
FV-FC-11	FB	0.35	754	10,000	7.54	SI 12.5%	Excede
FV-HPL-5	HPL	0.45	812	10,000	8.12	5.80%	Excede
FV-HPL-7	HPL	0.45	798	10,000	7.98	7.40%	Excede
FV-HPL-11	HPL	0.45	776	10,000	7.76	SI 10%	Excede
FV-ACP-5	ACP	0.7	834	10,000	8.34	3.20%	Excede
FV-ACP-7	ACP	0.7	820	10,000	8.2	4.90%	Excede
FV-ACP-11	ACP	0.7	801	10,000	8.01	7.10%	Excede

La meta de reducción lumínica del 10% se alcanza en dos escenarios: FV-FC-11 (12.5%) y FV-HPL-11 (10.0%). Ningún escenario reduce la iluminancia al rango normativo de 300–500 lux, lo que indica que la fachada ventilada mejora pero no resuelve completamente la sobreexposición lumínica en orientación poniente. Para alcanzar el rango normativo se recomienda complementar el sistema con dispositivos de sombreado exterior.

### 5.5.5 Evaluación Sonora

El desempeño acústico se evalúa mediante el Índice de Reducción Sonora ponderado ( $R_w$ , dB) calculado con la fórmula de la ley de masa conforme a ISO 717-1, según la ecuación (4-15), donde  $m$  es la masa superficial del panel exterior en  $\text{kg/m}^2$ . El nivel sonoro interior estimado se obtiene como  $L_{int} = L_{ext} - R_w$ , con  $L_{ext} = 70.1$  dBA correspondiente al

promedio de las mediciones in situ. La referencia normativa es la NOM-081-SEMARNAT-1994 ( $\leq 68$  dBA).

**Tabla 5-13 Evaluación acústica por material**

Caso	Material	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Espesor (m)	Masa superficial (kg/m <sup>2</sup> )	Rw calc. (dB)	L <sub>int</sub> estimado (dBA)	Cumple NOM-081
Caso base	Cristal	2,500	0.05	125	48.4	21.7	SI
FV-FC-5/7/11	Fibrocemento	1,400	0.01	14	29.4	40.7	SI
FV-HPL-5/7/11	HPL	1,350	0.008	10.8	27.1	43	SI
FV-ACP-5/7/11	ACP	1,530	0.004	6.12	22.2	47.9	SI

Todos los escenarios de fachada ventilada reducen el nivel sonoro interior a valores que cumplen la NOM-081 ( $\leq 68$  dBA). El fibrocemento ofrece el mejor desempeño acústico del grupo por su mayor masa superficial (14.0 kg/m<sup>2</sup>), resultando en  $R_w = 29.4$  dB y  $L_{int} = 40.7$  dBA. El  $R_w$  del panel aislado es inferior al mínimo de 35 dB recomendado para fachadas en zonas urbanas; en entornos con niveles exteriores superiores a 75 dBA se recomendaría complementar con materiales absorbentes en la cavidad.

### 5.5.6 Evaluación de calidad de aire interior

La calidad del aire interior se estima mediante el modelo estacionario de ASHRAE 62.1-2019, que calcula la concentración de CO<sub>2</sub> en función de la tasa de renovación de aire (ACH) inducida por el efecto chimenea de la cavidad. La referencia es el límite de 1,000 ppm de ASHRAE 62.1 para espacios educativos con ocupación continua.

La tasa de renovación de aire base del aula se estima en 0.5 ACH para el caso sin fachada ventilada. Para cada escenario, el incremento de ACH inducido por el efecto chimenea se adopta a partir de los rangos reportados por Bansal (1994) para cavidades

ventiladas de geometría comparable: espesores de 5, 7 y 11 cm generan incrementos estimados de 0.8, 1.2 y 1.8 ACH adicionales, resultando en tasas totales de 1.3, 1.7 y 2.3 ACH respectivamente. La concentración interior de CO<sub>2</sub> se estima como  $C_{int} = C_{ext} + \left(\frac{Q_{gen}}{Q_{vent}}\right)$ , donde  $C_{ext} = 400 \text{ ppm}$ ,  $Q_{gen} = 0.004 \frac{L}{s} \cdot \text{persona}$ , considerando 25 ocupantes sedentarios, y  $Q_{vent}$  es el caudal derivado del ACH total y el volumen del aula.

**Tabla 5-14 Concentración de CO<sub>2</sub> por espesor de cámara**

<b>Espesor cámara</b>	<b>ACH total</b>	<b><math>Q_{vent}</math> (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>CO<sub>2</sub> interior (ppm)</b>	<b>Mejora vs. caso base</b>	<b>Meta <math>\geq 15\%</math> hipótesis</b>	<b>ASHRAE <math>\leq 1,000</math> ppm</b>
(caso base)	0.5	145.7	3,375	—	—	Excede
5 cm	1.3	378.7	1,542	54.30%	Cumple	Excede
7 cm	1.7	495.4	1,278	62.10%	Cumple	Excede
11 cm	2.3	670	1,054	68.80%	Cumple	Excede

Los resultados presentados en la Tabla 5-14 muestran que todas las configuraciones de fachada ventilada generan una reducción importante en la concentración de CO<sub>2</sub> respecto al caso base. A medida que aumenta el espesor de la cámara, también se incrementa la tasa de renovación de aire (ACH), favoreciendo una mayor extracción del aire acumulado en el interior del aula.

La configuración base registra una concentración estimada de 3,375 ppm, mientras que los escenarios con fachada ventilada reducen este valor a rangos entre 1,542 ppm y 1,054 ppm. La mayor disminución se presenta en la cámara de 11 cm, asociada también al valor más alto de ventilación dentro de la cavidad.

En términos comparativos, todos los escenarios superan la meta planteada en la hipótesis sobre la mejora del 15% en calidad del aire interior, alcanzando reducciones considerablemente mayores respecto al caso base. Sin embargo, aunque las concentraciones disminuyen de manera importante, ninguna de las configuraciones logra alcanzar el valor de referencia de 1,000 ppm establecido por ASHRAE 62.1 únicamente mediante ventilación pasiva.

Estos resultados indican que el incremento en el espesor de la cámara favorece el movimiento de aire y mejora las condiciones de ventilación interior; no obstante, también

evidencian que, bajo condiciones de alta ocupación, la estrategia pasiva por sí sola presenta limitaciones para mantener concentraciones de CO<sub>2</sub> dentro de los rangos recomendados, por lo que podría requerirse apoyo de sistemas complementarios de ventilación.

## 6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.2 Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos para los diez escenarios analizados, correspondientes a un caso base y nueve configuraciones de fachada ventilada. La evaluación se desarrolla considerando variables relacionadas con desempeño térmico, comportamiento lumínico, aislamiento acústico y calidad del aire interior.

La exposición de resultados se organiza en dos etapas. En primer lugar, se analiza el comportamiento de cada configuración en comparación con el caso base, con el fin de identificar los cambios generados por la incorporación de la fachada ventilada. Posteriormente, se realiza una comparación entre escenarios para observar cómo las variaciones en el espesor de la cámara ventilada y el tipo de material de revestimiento influyen en cada indicador de confort ambiental.

Este análisis permite reconocer tendencias de comportamiento entre configuraciones y evaluar cuáles presentan un mejor desempeño bajo las condiciones climáticas registradas durante el periodo de estudio.

Los resultados se obtuvieron mediante la aplicación de modelos matemáticos de transferencia térmica y el desarrollo de modelos digitales BIM elaborados en Autodesk Revit 2024. Para la evaluación de los escenarios se utilizaron las condiciones de frontera derivadas de las mediciones realizadas in situ durante agosto de 2025, incluyendo variables como temperatura exterior, humedad relativa, iluminancia y nivel sonoro. Estos datos sirvieron como base para la configuración de los escenarios y para la comparación de resultados, conforme a lo descrito en el apartado 5.5.2 Mediciones in situ-caso base.

### 6.2.1 Escenarios comparativos

La tabla siguiente integra los dos indicadores térmicos obtenidos para cada escenario: el flujo de calor  $q$  ( $W/m^2$ ) calculado con el modelo analítico de resistencias en serie desarrollado en la metodología, y los valores  $R/U$  obtenidos del editor de montaje de Autodesk Revit 2024. Ambos métodos son complementarios: el modelo analítico permite el cálculo transparente paso a paso; el modelo BIM integra el sistema completo con mayor precisión.

**Tabla 6-1 Desempeño térmico por escenario**

Escenario	Material	Cámara	$q$ analítico ( $W/m^2$ )	Reducción $q$ vs. base (%)	R Revit ( $m^2 \cdot K/W$ )	U Revit ( $W/m^2 \cdot K$ )	Meta térmica $\geq 10\%$ hipótesis
Caso base	Cristal	—	263.7	—	0.0455	21.98	Referencia
FV-FC-5	Fibrocemento	5 cm	32.38	87.70%	2.0286	0.493	Cumple
FV-FC-7	Fibrocemento	7 cm	30.72	88.40%	2.8286	0.354	Cumple
FV-FC-11	Fibrocemento	11 cm	29.96	88.60%	4.4286	0.226	Cumple
FV-HPL-5	HPL	5 cm	32.59	87.60%	2.2759	0.439	Cumple
FV-HPL-7	HPL	7 cm	30.91	88.30%	3.0759	0.325	Cumple
FV-HPL-11	HPL	11 cm	30.13	88.60%	4.6759	0.214	Cumple
FV-ACP-5	ACP	5 cm	34.29	87%	2.025	0.494	Cumple
FV-ACP-7	ACP	7 cm	32.43	87.70%	2.825	0.354	Cumple
FV-ACP-11	ACP	11 cm	31.58	88%	4.425	0.226	Cumple

Todos los escenarios superan la meta del 10% de reducción térmica establecida en la hipótesis, con reducciones que oscilan entre 86.9% (FV-ACP-5) y 88.9% (FV-HPL-11). El comportamiento del flujo de calor es coherente entre los dos métodos: en ambos, el HPL 11 cm presenta el mejor desempeño térmico del grupo.

La diferencia en magnitud absoluta de R entre el modelo analítico (0.37–0.41 m<sup>2</sup>·K/W) y el modelo BIM (2.02–4.68 m<sup>2</sup>·K/W) se debe a que Revit incorpora la resistencia volumétrica completa de la cámara de aire, mientras que el modelo analítico utiliza únicamente el coeficiente convectivo superficial de la cavidad, ambas aproximaciones son válidas conforme a ISO 6946 y se describen en detalle en la metodología (sección 5.3.2).

Las mediciones in situ registraron una iluminancia promedio de 862 lux en el aula durante agosto de 2025, superando en 72% el límite superior de 500 lux de la NOM-025-STPS-2008. La fachada ventilada reduce esta iluminancia al actuar como elemento de control solar: el panel exterior absorbe y refleja una fracción de la radiación según su reflectancia, reduciendo la cantidad de luz que penetra al interior a través de la fachada acristalada

**Tabla 6-2 Desempeño lumínico por escenario**

<b>Escenario</b>	<b>Material</b>	<b>Reflec tancia panel</b>	<b>Ei estimada (lux)</b>	<b>Reducción vs. caso base</b>	<b>DF (%)</b>	<b>Meta lumínica ≥10% hipótesis</b>	<b>NOM-025 300–500 lux</b>
Caso base	Cristal	0.08	862	—	8.62	—	Excede
FV-FC-5	Fibro cemento	0.35	795	7.80%	7.95	No cumple (7.8%)	Excede
FV-FC-7	Fibro cemento	0.35	778	9.70%	7.78	No cumple (9.7%)	Excede
FV-FC-11	Fibro cemento	0.35	754	12.50%	7.54	Cumple	Excede
FV-HPL-5	HPL	0.45	812	5.80%	8.12	No cumple (5.8%)	Excede
FV-HPL-7	HPL	0.45	798	7.40%	7.98	No cumple (7.4%)	Excede
FV-HPL-11	HPL	0.45	776	10.00%	7.76	Cumple	Excede
FV-ACP-5	ACP	0.7	834	3.20%	8.34	No cumple (3.2%)	Excede
FV-ACP-7	ACP	0.7	820	4.90%	8.2	No cumple (4.9%)	Excede
FV-ACP-11	ACP	0.7	801	7.10%	8.01	No cumple (7.1%)	Excede

La meta del 10% de reducción lumínica se cumple únicamente en FV-FC-11 (12.5%) y FV-HPL-11 (10.0%). El ACP, con su alta reflectancia (0.70), presenta la menor reducción lumínica del grupo (3.2–7.1%) porque al reflejar más radiación, también reduce en menor proporción la luz difusa que ingresa al interior. Ningún escenario reduce la iluminancia al rango normativo de 300–500 lux, lo que indica que la fachada ventilada mejora, pero no resuelve completamente la sobreexposición lumínica en orientación poniente.

En cuanto a los niveles sonoros medidos in situ en el aula (65.4–75.9 dBA, promedio 70.1 dBA) superan el límite de 68 dBA de la NOM-081-SEMARNAT-1994. El panel exterior de la fachada ventilada actúa como masa adicional que incrementa el aislamiento acústico de la envolvente. Su eficacia depende directamente de la masa superficial del panel ( $m = \text{densidad} \times \text{espesor}$ ).

**Tabla 6-3 Evaluación acústica por escenario**

Escenario	Material	Masa superficial (kg/m <sup>2</sup> )	Rw calculado (dB)	$L_{int}$ estimado (dBA)	Reducción sonora (dBA)	Cumple NOM-081 ≤68 dBA
Caso base	Cristal	125	48.4	21.7	—	Sí
FV-FC-5	Fibrocemento	14	29.4	40.7	29.4 dBA	Sí
FV-FC-7	Fibrocemento	14	29.4	40.7	29.4 dBA	Sí
FV-FC-11	Fibrocemento	14	29.4	40.7	29.4 dBA	Sí
FV-HPL-5	HPL	10.8	27.1	43	27.1 dBA	Sí
FV-HPL-7	HPL	10.8	27.1	43	27.1 dBA	Sí
FV-HPL-11	HPL	10.8	27.1	43	27.1 dBA	Sí
FV-ACP-5	ACP	6.12	22.2	47.9	22.2 dBA	Sí
FV-ACP-7	ACP	6.12	22.2	47.9	22.2 dBA	Sí
FV-ACP-11	ACP	6.12	22.2	47.9	22.2 dBA	Sí

Todos los escenarios de fachada ventilada reducen el nivel sonoro interior estimado a valores entre 40.7 y 47.9 dBA, cumpliendo la NOM-081. El fibrocemento ofrece el mejor desempeño acústico por su mayor masa superficial (14.0 kg/m<sup>2</sup>). Sin embargo, el Rw del panel exterior aislado es inferior al mínimo de 35 dB recomendado para fachadas en zonas

urbanas, mientras que en entornos con niveles sonoros superiores a 75 dBA se recomienda complementar con absorbentes en la cavidad.

La concentración de CO<sub>2</sub> en el aula sin fachada ventilada se estima en 3,375 ppm bajo el modelo ASHRAE 62.1 con 25 ocupantes y 0.5 ACH, valor que supera más de tres veces el límite de 1,000 ppm. La fachada ventilada incrementa el ACH mediante el efecto chimenea de la cavidad, cuya magnitud depende exclusivamente del espesor de cámara, no del material.

**Tabla 6-4 Concentración de CO<sub>2</sub> por espesor de cámara**

<b>Espesor cámara</b>	<b>ACH total</b>	<b>CO<sub>2</sub> interior (ppm)</b>	<b>Mejora vs. caso base</b>	<b>Meta calidad aire ≥15%</b>	<b>ASHRAE ≤1,000 ppm</b>
— (caso base)	0.5	3,375	—	—	Excede
5 cm	1.3	1,542	54.30%	Cumple	Excede
7 cm	1.7	1,278	62.10%	Cumple	Excede
11 cm	2.3	1,054	68.80%	Cumple	Excede (próximo)

La meta del 15% de mejora en calidad de aire se cumple en todos los escenarios (mínimo 54.3%). Sin embargo, ninguna configuración alcanza el límite absoluto de 1,000 ppm de ASHRAE 62.1. Dando el escenario más favorable (cámara 11 cm) llega a 1,054 ppm. Esto establece el límite de la estrategia pasiva para este espacio y justifica la recomendación de ventilación mecánica complementaria en aulas con alta densidad de ocupación.

### **6.2.2 Impacto en el confort térmico**

La relevancia central de estos resultados no reside únicamente en la magnitud de las mejoras obtenidas en cada indicador de forma individual, sino en el hecho de que las cuatro dimensiones de confort (térmica, lumínica, acústica y de calidad del aire) se mejoran de manera simultánea a partir de una única intervención en la envolvente del edificio.

Desde una perspectiva operativa, esto representa una ventaja importante frente a estrategias que dependen exclusivamente de sistemas activos para resolver cada necesidad ambiental por separado. En este caso, la fachada ventilada funciona como un sistema pasivo

capaz de contribuir al control térmico, reducir parte de la radiación directa y favorecer la ventilación del espacio interior sin requerir un consumo energético constante.

Esta condición adquiere mayor relevancia en edificios educativos, donde las condiciones de confort suelen depender de recursos limitados para climatización y mantenimiento. Bajo estas circunstancias, reducir la dependencia de equipos mecánicos puede representar una mejora tanto en términos de operación como de estabilidad ambiental dentro del aula.

A nivel de uso del espacio, los resultados muestran que las configuraciones evaluadas contribuyen a generar condiciones interiores más estables frente a las variaciones climáticas exteriores. La disminución de ganancias térmicas y la reducción de exposición directa a radiación solar permiten disminuir factores asociados a incomodidad ambiental, como sobrecalentamiento, deslumbramiento o acumulación de aire poco renovado. Aunque estas mejoras no eliminan completamente las condiciones críticas detectadas en el caso de estudio, sí evidencian un cambio en el comportamiento ambiental del aula respecto al escenario base.

## **6.3 Discusión**

### **6.3.1 Evaluación de mejora porcentual respecto a la hipótesis**

Los resultados obtenidos permiten dar respuesta al tercer objetivo específico mediante una propuesta de diseño fundamentada en la evaluación comparativa de los nueve escenarios. La configuración óptima identificada (FV-HPL-11) constituye el modelo constructivo optimizado de la investigación. Su validación mediante prototipo físico a escala real queda establecida como línea futura de trabajo, conforme a los alcances declarados en el Capítulo 1.

La hipótesis planteó que la optimización conjunta de parámetros geométricos y constructivos de fachadas ventiladas con materiales de bajo impacto ambiental mejoraría en al menos un 10% el desempeño térmico, un 15% la calidad del aire y un 10% el control lumínico en espacios de clima cálido. Los resultados permiten evaluar el grado de cumplimiento de cada una de estas metas.

La meta de desempeño térmico se cumple en todos los escenarios evaluados. La reducción en el flujo de calor osciló entre 86.9% y 88.9% respecto al caso base, superando con amplitud el umbral del 10% establecido en la hipótesis. Este comportamiento responde a que la diferencia de transmitancia entre el caso base ( $U = 21.98 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ) y cualquier configuración de fachada ventilada es tan significativa que el margen de la meta queda cubierto independientemente del material o del espesor de cámara seleccionado.

La magnitud de las mejoras térmicas observadas debe interpretarse considerando las características del caso base utilizado como referencia. El aula analizada presenta una envolvente acristalada con una transmitancia térmica significativamente mayor que la de las configuraciones de fachada ventilada evaluadas. Por esta razón, la incorporación de una cámara ventilada y de materiales con mayor resistencia térmica genera una diferencia sustancial en el flujo de calor calculado. En consecuencia, las reducciones obtenidas no implican que todas las fachadas ventiladas produzcan mejoras de esta magnitud en cualquier contexto, sino que reflejan el contraste entre la condición actual del edificio y las soluciones propuestas.

En este indicador, ambas variables de diseño tienen una influencia mínima entre sí, ya que el salto cualitativo ocurre al pasar de la envolvente acristalada existente al sistema de fachada ventilada, no entre configuraciones de fachada. La meta de calidad del aire también se cumple en todos los escenarios. La mejora en la concentración de  $\text{CO}_2$  varió entre 54.3% para los escenarios con cámara de 5 cm y 68.8% para los de cámara de 11 cm, superando en todos los casos el umbral del 15%. Está claro que la estrategia mejora significativamente la calidad del aire interior, pero por sí sola no es suficiente para cumplir completamente los límites recomendados para espacios educativos con alta densidad de ocupación.

A diferencia del indicador térmico, aquí sí existe una variable determinante: el espesor de la cámara de aire es el único factor que condiciona este resultado, ya que determina el ACH inducido por el efecto chimenea y, con él, la concentración interior. El material del panel no incide en este indicador.

La meta lumínica es la más restrictiva y la única que no se cumple en todos los escenarios. Solo FV-FC-11 y FV-HPL-11 alcanzan reducciones de iluminancia del 12.5% y 10.0% respectivamente, cumpliendo el umbral del 10%.

Los siete escenarios restantes registraron reducciones de iluminancia entre 3.2% y 9.7%, valores que no alcanzan la meta mínima planteada en la hipótesis para esta variable. Aunque todas las configuraciones generaron cierto nivel de control lumínico respecto al caso base, los resultados muestran que no cualquier combinación de material y espesor produce el mismo comportamiento frente a la radiación solar.

A partir de la comparación entre escenarios, se observa que la cámara de 11 cm favorece una disminución más consistente de la iluminancia interior; sin embargo, el espesor por sí solo no garantiza el cumplimiento de la meta. El comportamiento también depende de las propiedades ópticas del material de revestimiento, particularmente de su reflectancia. En los casos de fibrocemento y HPL, cuyos valores de reflectancia son de 0.35 y 0.45 respectivamente, se obtuvieron reducciones lumínicas suficientes para cumplir el umbral planteado. En cambio, el ACP presentó reducciones menores, aun utilizando la misma configuración geométrica.

Este comportamiento sugiere que materiales con reflectancias más altas no necesariamente mejoran el control lumínico dentro del espacio. Aunque el ACP refleja una mayor cantidad de radiación hacia el exterior, también favorece el ingreso de luz difusa al interior, lo que reduce su capacidad para disminuir los niveles de iluminancia en comparación con los otros materiales evaluados.

En conjunto, los resultados muestran que únicamente las configuraciones FV-FC-11 y FV-HPL-11 lograron cumplir simultáneamente las metas planteadas para desempeño térmico, calidad del aire y control lumínico. Los demás escenarios alcanzaron mejoras parciales, principalmente en las variables térmicas y de ventilación, pero sin satisfacer completamente el criterio lumínico establecido en la hipótesis.

A partir de ello, puede identificarse una tendencia común entre las configuraciones con mejor desempeño: la presencia de una cámara ventilada de 11 cm combinada con materiales de reflectancia moderada. Bajo las condiciones analizadas, esta relación permitió

obtener un comportamiento más equilibrado entre las distintas variables de confort evaluadas.

La Tabla 6-5 reúne los resultados obtenidos para los cuatro indicadores de confort en cada escenario y permite comparar su comportamiento respecto a las metas de la hipótesis y las referencias normativas utilizadas. Dentro del conjunto evaluado, la configuración FV-HPL-11 presentó el comportamiento más equilibrado, al combinar una alta resistencia térmica ( $R = 4.6759 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ), una reducción lumínica equivalente al umbral planteado en la hipótesis, niveles sonoros interiores más bajos respecto a configuraciones similares y una disminución importante en la concentración de  $\text{CO}_2$ . Estos resultados permiten identificarla como la alternativa con mejor desempeño integral dentro de los escenarios analizados.

Aunque las configuraciones FV-FC-11 y FV-HPL-11 cumplen simultáneamente las metas establecidas en la hipótesis, la alternativa FV-HPL-11 fue seleccionada como configuración óptima debido a que presenta la mayor resistencia térmica del conjunto evaluado ( $R = 4.6759 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ), asociada a la menor conductividad térmica del revestimiento empleado. Adicionalmente, el HPL ofrece ventajas relacionadas con estabilidad dimensional, resistencia a la intemperie y menores requerimientos de mantenimiento durante su vida útil.

Por ello, aun cuando ambas configuraciones presentan desempeños similares en las variables evaluadas, FV-HPL-11 proporciona el mejor equilibrio entre desempeño térmico, durabilidad y viabilidad constructiva.

**Tabla 6-5 Resumen integral de desempeño por escenario**

Escenario	Mat.	Cam.	q (W/m <sup>2</sup> )	Reduc. térmica	Meta ≥10%	Ei (lux)	Reduc. lumínica	Meta ≥10%	L <sub>int</sub> (dBA)	NOM- 081	CO <sub>2</sub> (ppm)	Meta ≥15%	Cumple 3 metas
Caso base	—	—	263.7	—	—	862	—	—	70.1	NO	3375	—	—
FV-FC-5	Fib	5cm	32.38	87.70%	SI	795	7.80%	NO	40.7	SI	1542	SI	2/3
FV-FC-7	Fib	7cm	30.72	88.40%	SI	778	9.70%	NO	40.7	SI	1278	SI	2/3
FV-FC-11	Fib	11cm	29.96	88.60%	SI	754	12.50%	SI	40.7	SI	1054	SI	3/3
FV-HPL-5	HPL	5cm	32.59	87.60%	SI	812	5.80%	NO	43	SI	1542	SI	2/3
FV-HPL-7	HPL	7cm	30.91	88.30%	SI	798	7.40%	NO	43	SI	1278	SI	2/3
FV-HPL-11	HPL	11cm	30.13	88.60%	SI	776	10.00%	SI	43	SI	1054	SI	3/3
FV-ACP-5	ACP	5cm	34.29	87%	SI	834	3.20%	NO	47.9	SI	1542	SI	2/3
FV-ACP-7	ACP	7cm	32.43	87.70%	SI	820	4.90%	NO	47.9	SI	1278	SI	2/3
FV-ACP-11	ACP	11cm	31.58	88%	SI	801	7.10%	NO	47.9	SI	1054	SI	2/3

Donde:

	Configuración óptima: cumple meta e hipótesis
	Mejora parcial: no cumple todas las metas
	No cumple: excede limite normativo

### **6.3.2 Lineamientos de diseño replicables para climas cálidos**

Los resultados de la investigación permiten formular criterios de diseño fundamentados en evidencia cuantitativa, directamente aplicables a proyectos de fachada ventilada en edificaciones de clima semiárido.

El primer criterio es el espesor mínimo de cámara de 11 cm. Los datos muestran que este es el valor a partir del cual el sistema cumple las tres metas de la hipótesis de manera simultánea. Espesores de 5 y 7 cm generan mejoras significativas en los indicadores térmico y de calidad del aire, pero no alcanzan la reducción lumínica requerida.

Desde el punto de vista constructivo, el incremento de una cámara ventilada de 7 cm a 11 cm representa una modificación mínima de la subestructura, sin generar cambios importantes en la complejidad de instalación ni incrementos significativos en el costo del sistema. Bajo las condiciones evaluadas, esta decisión presenta una de las relaciones más favorables entre desempeño obtenido y repercusión constructiva.

La selección del material de revestimiento debe responder al criterio de desempeño prioritario de cada proyecto. Cuando el objetivo principal es mejorar el comportamiento térmico integral del sistema, el revestimiento exterior de HPL representa la alternativa más adecuada debido a su menor conductividad térmica y a que, combinado con una cámara de 11 cm, logra cumplir exactamente la meta lumínica establecida en la hipótesis.

En cambio, cuando el criterio dominante se relaciona con la relación costo-beneficio o con el desempeño acústico, el fibrocemento presenta ventajas importantes dentro de los escenarios evaluados. Este material alcanzó la mayor reducción de iluminancia del conjunto analizado (12.5%) y el mejor desempeño acústico, con un índice de reducción sonora de 29.4 dB, además de mantener un costo menor respecto a otras alternativas.

Por otra parte, el ACP mostró un comportamiento favorable en términos de reflectancia solar y durabilidad del material a largo plazo. Sin embargo, en los escenarios evaluados no logró alcanzar la meta lumínica planteada en la hipótesis.

Los resultados también muestran que, en fachadas con orientación poniente, ninguno de los materiales evaluados consigue reducir por sí solo los niveles de iluminancia hasta el rango

recomendado por la NOM-025-STPS-2008 (300–500 lux). Debido a ello, la incorporación de elementos de control solar exterior, como parasoles, no debe considerarse una estrategia opcional, sino una solución complementaria para alcanzar condiciones adecuadas de confort. Por esta razón, dichos elementos deberían integrarse desde las etapas iniciales del diseño como parte del sistema de fachada.

En aulas con alta densidad de ocupación, como el caso analizado en esta investigación (25 personas en 64.74 m<sup>2</sup>), el efecto chimenea generado por la cavidad ventilada no resulta suficiente para alcanzar el límite de 1,000 ppm de CO<sub>2</sub> establecido por ASHRAE 62.1 únicamente mediante ventilación pasiva. Bajo estas condiciones, se recomienda complementar con sistemas de ventilación mecánica controlados por demanda y activados mediante sensores, de manera que operen únicamente cuando la concentración interior supere el umbral recomendado.

Finalmente, los lineamientos obtenidos pueden aplicarse en ciudades del Bajío y del norte de México con clasificación climática BSk o BSh, como Aguascalientes, San Luis Potosí, Monterrey o Chihuahua, donde las condiciones de radiación solar y amplitud térmica diaria presentan características similares a las registradas en Querétaro.

### **6.3.3 Propuesta constructiva del escenario FV-HPL-11**

La propuesta constructiva del escenario FV-HPL-11 consiste en un sistema de fachada ventilada compuesto por una subestructura metálica anclada al muro base, una cámara de aire ventilada y un revestimiento exterior de panel laminado de alta presión (HPL). El sistema fue configurado con una cámara ventilada de 11 cm de espesor, dimensión seleccionada a partir de los resultados obtenidos en la etapa experimental y comparativa de desempeño térmico, lumínico y de ventilación natural.

La composición del sistema inicia con un muro base, que es la fachada acristalada, encargada de proporcionar estabilidad y aislamiento inicial de la envolvente. Sobre este elemento se colocan ménsulas y perfiles metálicos verticales de aluminio galvanizado, los cuales generan la separación necesaria para conformar la cámara de aire continua.

Como acabado exterior se emplean paneles HPL (High Pressure Laminate), material seleccionado por su resistencia mecánica, estabilidad dimensional, bajo mantenimiento y comportamiento favorable frente a agentes climáticos. Además de sus propiedades funcionales, el HPL proporciona versatilidad estética y una superficie de baja absorción térmica en comparación con materiales pétreos o metálicos oscuros. Los paneles se fijan mecánicamente a la subestructura mediante un sistema oculto de anclajes, permitiendo mantener la continuidad de la cámara ventilada y facilitando labores de mantenimiento o sustitución.

La entrada y salida de aire se localizan en la parte inferior y superior de la fachada, respectivamente, permitiendo la circulación natural dentro de la cavidad ventilada. Este movimiento de aire contribuye a disminuir la acumulación de calor sobre el cerramiento principal, mejorar las condiciones de confort térmico interior y favorecer la renovación del aire en la envolvente. Diversas investigaciones han demostrado que las fachadas ventiladas con cámaras de aire incrementan la resistencia térmica total del sistema y reducen las ganancias térmicas en climas cálidos.

#### **6.3.4 Comparación del sistema propuesto frente a tecnologías contemporáneas de envolvente**

Con el objetivo de contextualizar la propuesta desarrollada frente a tendencias recientes en envolventes arquitectónicas, se realizó una comparación conceptual entre el sistema de fachada ventilada y otras tecnologías empleadas para el control ambiental en edificaciones.

Este análisis permite reconocer las diferencias existentes entre los distintos sistemas considerando aspectos relacionados con desempeño térmico, complejidad constructiva, costos y posibilidades de aplicación en climas cálidos. Más que comparar únicamente la eficiencia de cada tecnología, el objetivo es entender bajo qué condiciones ciertas soluciones resultan más viables que otras dentro del contexto arquitectónico analizado.

Bajo este enfoque, la propuesta desarrollada se compara con tecnologías como fachadas cinéticas, vidrios electrocrómicos y sistemas fotovoltaicos integrados en fachada (BIPV), ya que actualmente forman parte de las soluciones con mayor presencia en investigaciones y

proyectos de alto desempeño ambiental. La intención de esta comparación no es establecer una equivalencia directa entre tecnologías, sino identificar diferencias relacionadas con requerimientos técnicos, consumo energético, mantenimiento, costos de implementación y comportamiento en contextos climáticos similares al caso de estudio.

La Tabla 6-6 permite observar que tecnologías como las fachadas cinéticas y los vidrios electrocrómicos ofrecen una mayor capacidad de adaptación dinámica frente a cambios ambientales; sin embargo, también requieren sistemas de control, instalación especializada y mayores costos asociados tanto a operación como a mantenimiento.

En comparación, el sistema propuesto presenta una menor complejidad operativa al funcionar mediante mecanismos pasivos, además de una configuración modular que facilita su aplicación en edificaciones existentes.

**Tabla 6-6 Comparación de sistemas**

<b>Sistema</b>	<b>Ventaja principal</b>	<b>Limitación principal</b>	<b>Viabilidad en clima cálido</b>
Fachada ventilada FV-HPL-11	Estrategia pasiva + bajo mantenimiento	menor adaptabilidad dinámica	Alta
Fachada cinética	control solar dinámico	alto costo y mantenimiento	Media
Vidrio electrocrómico	control lumínico	alto consumo/costo	Media
BIPV	generación energética	eficiencia dependiente orientación	Media

Los resultados de esta comparación también muestran que las estrategias pasivas continúan siendo una alternativa funcional frente a tecnologías emergentes, particularmente en contextos donde las condiciones económicas, climáticas y constructivas requieren soluciones de menor consumo energético y con posibilidades de implementación más accesibles.

## 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.2 Aportes de la investigación

La investigación desarrollada aporta distintos elementos al estudio de envolventes arquitectónicas y al análisis de fachadas ventiladas en climas cálidos. Uno de los principales aportes corresponde a la integración de una metodología de trabajo basada en BIM, donde Autodesk Revit 2024 se utilizó tanto para el modelado del sistema como para el análisis solar y el cálculo de resistencias térmicas, evitando la necesidad de trasladar el modelo a otros programas durante el proceso de evaluación. Esto permitió mantener coherencia entre el modelo constructivo y el análisis desarrollado, además de facilitar la repetibilidad del procedimiento para futuras investigaciones o aplicaciones profesionales.

Otro aporte importante consiste en la elaboración de una comparación de desempeño ambiental entre tres materiales comerciales (fibrocemento, HPL y ACP) y tres espesores de cámara ventilada evaluados bajo condiciones climáticas representativas del contexto semiárido de Querétaro. Los resultados obtenidos generan información técnica aplicable a proyectos educativos y a edificaciones ubicadas en regiones con características climáticas similares, particularmente en zonas del Bajío y norte de México.

Asimismo, la investigación incorpora mediciones realizadas directamente en el caso de estudio como parte del proceso de evaluación. El uso de datos obtenidos in situ permitió establecer un escenario base de referencia para la comparación entre configuraciones, aportando mayor relación entre el análisis teórico y las condiciones reales del edificio. Este procedimiento también muestra una alternativa metodológica para analizar estrategias pasivas en edificaciones existentes donde no es posible intervenir físicamente durante la etapa de investigación.

Finalmente, los resultados permitieron identificar la influencia de algunas variables de diseño dentro del comportamiento del sistema. A partir de la comparación entre escenarios, se observó que el espesor de la cámara ventilada tiene una incidencia más directa sobre el desempeño térmico y la calidad del aire interior que el material de revestimiento. Este

comportamiento permite reconocer cuáles variables tienen mayor impacto dentro del sistema y aporta criterios útiles para la toma de decisiones durante el diseño de fachadas ventiladas.

### **7.3 Líneas futuras de investigación**

Los resultados obtenidos durante la investigación también permiten identificar aspectos que no pudieron desarrollarse completamente dentro de los alcances planteados y que podrían explorarse en trabajos posteriores.

Una de las principales líneas futuras corresponde a la validación experimental del sistema mediante prototipos a escala real. Aunque los modelos analíticos y el desarrollo BIM utilizados en esta tesis mostraron resultados consistentes entre escenarios, la comparación con el caso base se realizó a partir de mediciones tomadas en el edificio existente y no mediante un sistema construido específicamente para ensayo. Debido a ello, la fabricación de un módulo experimental basado en la configuración FV-HPL-11 permitiría evaluar directamente variables como temperatura dentro de la cavidad, flujo de calor superficial, velocidad del aire y concentración de CO<sub>2</sub> bajo condiciones reales de operación. Además, este tipo de pruebas ayudaría a contrastar y ajustar los modelos desarrollados a partir de datos experimentales controlados.

Otra línea de investigación relacionada con el desempeño térmico del sistema es la posible incorporación de materiales de cambio de fase dentro de la cavidad ventilada. Estos materiales tienen la capacidad de absorber y liberar energía térmica durante sus cambios de estado, lo que les permite funcionar como elementos de almacenamiento térmico dentro de la envolvente. Su integración en el sistema podría contribuir a reducir las variaciones de temperatura interior y disminuir los picos térmicos durante periodos de alta radiación solar, complementando el comportamiento convectivo evaluado en esta investigación.

La tercera línea propone la replicación de la metodología en otras tipologías edificatorias y zonas climáticas del país. Los lineamientos de esta investigación son aplicables en climas BSk y BSh, pero su extensión a zonas cálido-húmedas o templadas requiere estudios específicos que consideren diferencias en patrones de ocupación, demandas de confort y

condiciones de radiación propias de cada contexto. La acumulación sistemática de estos resultados en distintos casos permitiría construir una base de datos nacional sobre el desempeño de fachadas ventiladas que hoy no existe para el contexto mexicano.

## **7.4 Recomendaciones técnicas y académicas**

Para proyectistas y constructores que trabajen en climas semiáridos, la recomendación central es adoptar una cámara de aire mínima de 11 cm, independientemente del material de revestimiento seleccionado. Esta es la única condición que garantiza el cumplimiento simultáneo de las tres metas de desempeño identificadas en la investigación.

La selección del material de revestimiento exterior puede ajustarse en función de criterios económicos, estéticos o ambientales sin generar diferencias importantes en el desempeño general del sistema, siempre que se mantengan ciertas condiciones relacionadas con el control lumínico. En los escenarios evaluados, los materiales con valores de reflectancia superiores a 0.45 presentaron una menor capacidad para reducir la iluminancia interior, por lo que este parámetro debe considerarse durante el proceso de diseño cuando el confort visual forme parte de los objetivos del proyecto.

En fachadas con orientación poniente, los resultados muestran que la fachada ventilada por sí sola no logra reducir la iluminancia hasta los rangos recomendados por la NOM-025-STPS-2008. Debido a ello, la incorporación de elementos de sombreado exterior, como parasoles o de control solar, debe contemplarse como parte complementaria del sistema y no únicamente como un recurso opcional de diseño.

Desde el ámbito académico, se recomienda desarrollar investigaciones que evalúen el confort ambiental de manera integral, considerando simultáneamente variables térmicas, lumínicas, acústicas y de calidad del aire interior. Gran parte de los estudios actuales continúa abordando estas dimensiones por separado, aun cuando las modificaciones en la envolvente generan efectos conjuntos sobre distintas condiciones ambientales del espacio.

Los resultados obtenidos en esta investigación muestran que una misma intervención puede producir cambios en varios indicadores de confort al mismo tiempo. Por esta razón, analizar cada variable de manera aislada puede limitar la comprensión del comportamiento real del sistema y conducir a decisiones parciales durante el diseño.

Finalmente, se considera importante continuar aplicando este tipo de metodologías en otras tipologías de edificio y en diferentes regiones climáticas del país, además de fortalecer los procesos de validación experimental mediante mediciones directas y prototipos físicos. Esto permitiría ampliar la información disponible sobre fachadas ventiladas en el contexto mexicano y generar criterios de diseño más consistentes para futuras aplicaciones.

## 8 REFERENCIAS

- Al-Shawabkeh, A., Sawalheh, S., Ikhries, I., & Waid, O. (2022). Experimental Investigation and Numerical Simulation on the Thermal Insulation Materials Using Recycled Thermoplastic Polymers. *Material Plastice*, 59(1), 177-187. <https://doi.org/https://doi.org/10.37358/MP.22.1.5570>
- Andreeva, D., Nemova, D., & Kotov, E. (2022). Multi-Skin Adaptive Ventilated Facade: A Review. *MDPI: Energies*, 15(9), 3447. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en15093447>
- Azkorra-Larrinaga, Z., Romero-Antón, N., Martín-Escudero, K., Lopez-Ruiz, G., & Giraldo-Soto, C. (2023). Evaluation of the Thermal Performance of Two Passive Facade System Solutions for Sustainable Development. *MDPI: Sustainability*, 15(24), 16737. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su152416737>
- Barbosa, S., Alberto, K., & Poorang, P. (2025). Natural daylighting through double skin façades: a review. *Architectural Engineering and Design Management*, 21, 231-251. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/17452007.2024.2400711>
- Bianchi, S., Andriotis, C., Klein, T., & Overend, M. (2024). Multi-criteria design methods in façade engineering: State-of-the-art and future trends. *Building and Environment*, 250, 111184. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111184>
- Cuce, P., & Cuce, E. (2025). Ventilated Facades for Low-Carbon Buildings: A Review. *MDPI: Processes*, 13(7), 2275. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/pr13072275>
- Daza, A., & Zamora, J. (2019). Acoustic performance in a lightweight ventilated façade for building. *Journal of Construction*, 18(2), 247-257. <https://doi.org/https://doi.org/10.7764/RDLC.18.2.247>
- dos Santos Pizzatto, S., Pizzatto, F., Raupp-Pereira, F., Arcaro, S., Angioletto, E., & Klegues Montedo, O. (2025). Ventilated facades system: A review. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 64(100443). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2025.100443>

- Fantucci, S., Serra, V., & Carbonaro, C. (2020). An experimental sensitivity analysis on the summer thermal performance of an Opaque Ventilated Façade. *Energy and Buildings*, 225, 110354. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110354>
- Fissore, V., Fasano, S., Puglisi, E. G., Shtrepi, L., & Astolf, A. (2023). Indoor Environmental Quality and Comfort in Offices: A Review. *MDPI: Buildings*, 13(10), 2490. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/buildings13102490>
- Gökşen, F., & Ayçam, İ. (2023). Thermal performance assessment of opaque ventilated façades for residential buildings in hot humid climates. *Journal of the Croatian Association of Civil Engineers*, 75(3), 225-237. <https://doi.org/https://doi.org/10.14256/JCE.3576.2022>
- Iavorschi, E., Dan Milici, L., Ungureanu, C., & Bejenar, C. (2025). A Comparative Evaluation of the Thermal Performance of Passive Facades with Variable Cavity Widths for Near-Zero Energy Buildings (nZEB): A Modeling Study. *MDPI: Applied Sciences*, 15(13), 7019. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app15137019>
- Jankovic, A., & Goia, F. (2021). Impact of double skin facade constructional features on heat transfer and fluid dynamic behaviour. *Building and Environment*, 196, 107796. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107796>
- Jensen, M., & Alfieri, P. (2023). Design and manufacture of insulation panels based on recycled lignocellulosic waste. *Cleaner Engineering and Technology*, 3, 100111. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100111>
- Krawczyk, N. (2021). Thermal comfort in the low energy building - validation and modification of the Fanger model . *Cold Climate HVAC & Energy*, 246, 15003. <https://doi.org/https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124615003>
- Lin, S., Zhang, Y., Chen, X., Pan, C., Dong, X., Xie, X., & Chen, L. (2025). Review and Decision-Making Tree for Methods to Balance Indoor Environmental Comfort and Energy Conservation During Building Operation. *MDPI: Sustainability*, 17, 7016. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su17157016>

- Matour, S., Garcia-Hansen, V., Omrani, S., Hassanli, S., & Drogemuller, R. (2021). Wind-driven ventilation of Double Skin Facades with vertical openings: Effects of opening configurations. *Building and Environment*, *196*, 107804. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107804>
- Moghtadernejad, S., Chouinard, L., & Mirza, S. (2020). Design strategies using multi-criteria decision-making tools to enhance the performance of building façades. *Journal of Building Engineering*, *30*, 101274. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101274>
- Neubauer, R. (2022). Acoustic classification with the descriptor of the weighted standardized level difference  $D_{nT,w}$  with use of the weighted apparent sound reduction index  $R'_{w}$ . *Inter Noise*. Glasgow.
- Pujadas-Gispert, E., Alsailani, M., Van Dijk, K., Rozema, A., Ten Hoope, P., Korevaar, C., & Moonen, F. (2020). Design, construction, and thermal performance evaluation of an innovative bio-based ventilated façade. *Eindhoven University of Technology*, *9*, 681-696. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foar.2020.02.003>
- Rahiminejad, M., & Khovalyg, D. (2022). Numerical and experimental study of the dynamic thermal resistance of the dynamic thermal resistance of ventilated air-spaces behind passive and active facades. *Building and Environment*, *225*(109616). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109616>
- Sánchez, M., Giancola, E., Blanco, E., Soutullo, S., & Suárez, M. (2019). Experimental Validation of a Numerical Model of a Ventilated Facade with Horizontal and Vertical Open Points. *MDPI: Energies*, *13*(146). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en13010146>
- Stazi, F., Ulpiani, G., Pergolini, M., Di Perna, C., & D' Orazio, M. (2020). The role of wall layers properties on the thermal performance of ventilated facades: Experimental investigation on narrow-cavity design. *Energy and Buildings*, *209*(15), 109622. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109622>

- Tabadkani, A., Roetzel, A., Xian Li, H., & Tsangrassoulis, A. (2021). Daylight in Buildings and Visual Comfort Evaluation: the Advantages and Limitations. *Journal of Daylighting*, 8, 181-203. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.15627/jd.2021.16>
- Tao, Y., Yan, Y., Fang, X., Zhang, H., Tu, J., & Shi, L. (2022). Solar-assisted naturally ventilated double skin façade for buildings: Room . *Building and Environment*, 216(109002). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109002>
- United Nations Environment Programme. (2024). *Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector*. Nairobi: United Nations Environment Programme (UNEP). <https://doi.org/https://doi.org/10.59117/20.500.11822/45095>