



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA

Facultad de Arquitectura | Instituto de Investigaciones Históricas | FES Aragón

Evaluación de materiales aislantes translúcidos para la eficiencia energética de las cubiertas en centros comerciales de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

TESIS

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN ARQUITECTURA
En el campo de conocimiento de Tecnologías**

PRESENTA:

Arq. Sandra Paulina Bastida Rojano

TUTOR PRINCIPAL

**Dr. Mauro Germán Valdés Barrón
Instituto de Geofísica, UNAM**

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR

**Dra. Ilse García Villalobos | Facultad de Arq., UNAM, Campo de Tecnologías
Dr. Victor Armando Fuentes Freixanet | MAD CyAD, UAM-A, Arquitectura Bioclimática**

SINODALES

**Dra. Dolores Ana Flores Sandoval | Facultad de Arq., UNAM, Campo de Tecnologías
Dr. Pino Durán Medina | Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, IPN, Unidad Zacatenco**

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, mayo de 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



**Evaluación de materiales aislantes
translúcidos para la eficiencia
energética de las cubiertas en
centros comerciales de la Zona
Metropolitana de la Ciudad de
México**

Presenta:

Arq. Sandra Paulina Bastida Rojano

Tutor:

Dr. Mauro Germán Valdés Barrón

. . .

El presente trabajo de Tesis nivel Maestría fue desarrollado en el Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura de la Universidad Nacional Autónoma de México, bajo la tutoría del Dr. Mauro Germán Valdés Barrón. Se contó con el apoyo de una beca para estudios de maestría del CONACYT.

Agradecimientos institucionales

A la UNAM, a la Facultad de Arquitectura, al Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura y al Campo de Tecnologías por brindarme el espacio virtual y el conocimiento para mi formación en estudios de maestría y el apoyo de su comunidad para realizar esta investigación.

A la Sección de Radiación Solar del Instituto de Geofísica por proporcionarme el equipo necesario para realizar la investigación.

Al Programa de Becas para Estudios de Posgrado de CONACYT por brindarme el apoyo financiero para mi formación en estudios de maestría.

Agradezco especialmente al Dr. Mauro Germán Valdés Barrón por dirigir el desarrollo de esta investigación; por disponer el tiempo y el espacio para compartir su conocimiento y por su apoyo y comprensión en los momentos de incertidumbre.

A la Dra. Ilse García Villalobos por compartirme su conocimiento y las aportaciones que realizó durante esta investigación. Mi más sincero agradecimiento por brindarme sus consejos, apoyo y motivación durante mi formación académica.

Al Dr. Victor Fuentes Freixanet por brindarme las herramientas necesarias durante la realización de esta investigación. Agradezco por su disposición y aportaciones a esta investigación.

A la Dra. Dolores Ana Flores Sandoval por brindarme su apoyo y consejos durante mi formación académica. Agradezco por compartirme su conocimiento, tiempo y disposición durante la realización de esta investigación.

Al Dr. Pino Durán Medina por compartirme su conocimiento y brindarme sus consejos para el desarrollo del método experimental y el análisis de datos.

A la Dra. Cecilia Guadarrama y la Dra. Adriana Lira Oliver que, con tanta vocación en sus asignaturas de licenciatura, despertaron mi interés por la investigación y a desarrollar este trabajo de investigación.

Mi más sincero agradecimiento **al Mtro. Ernesto Ocampo Ruiz** por brindarme su apoyo y motivación en mi formación académica y **al Dr. Carlos Alfredo Bigurra Alzati y Dr. José Luis Bermúdez Alcocer** por brindarme la oportunidad de participar en actividades para difundir esta investigación.

Agradecimientos personales

A mi familia por su amor y apoyo incondicional en todo momento, por motivarme a seguir adelante y acompañarme en cada paso que doy. **A mi madre María Magdalena Rojano** por acompañarme en cada noche de estudio, por ofrecerme su ayuda en todo momento y demostrarme su amor en cada palabra de aliento. **A mi padre Alfonso Bastida** por enseñarme que el esfuerzo, dedicación y perseverancia son importantes para alcanzar una meta, por tu comprensión y paciencia en cada una de mis decisiones. **A mis hermanos Alfonso y Daniel** por brindarme su apoyo moral, su compañía y consejos durante mi formación académica, por demostrarme su amor en cada consejo que me dan. **A mi cuñada Gali** que siempre se preocupa por mi salud. **A Javier Solis**, mi compañero de vida, por brindarme con tanto amor y cariño su apoyo incondicional y consejo en todo momento, por alentarme a aprender cosas nuevas y cuidar de mi en todo momento.

A la familia Solis Oviedo, con mucho cariño, por permitirme formar parte de su familia y hacerme sentir en casa, por su atenciones y calidez. Agradezco su apoyo y ánimos en este proceso que ha sido complicado para mí. **A Maggie y Rodrigo** por brindarme su compañía y complicidad en momentos de estudio.

A mis amigos Marce P., Liz G., Mitzy T., Angelica R., Meli M., David G., Moisés R., Nohemí L. y Christian P. por ofrecerme su apoyo y consejos pues, de manera directa o indirecta, contribuyeron a este trabajo y por animarme a seguir adelante.

Dedicatorias

Dedicado con todo mi amor y cariño **a mi familia** por darme su amor en cada paso que doy y por creer en mí.

Dedico mi esfuerzo y amor por este trabajo **a Javier**, por darme la fuerza para seguir adelante en momentos de incertidumbre.

Índice

Introducción	8
Antecedentes	10
CAPÍTULO 1. Consumo energético en el sector comercial en México	14
1.1 Centros Comerciales en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México	16
1.2 Programas de ahorro energético	18
1.3 Estrategias de diseño para la eficiencia energética	20
1.4 Requerimientos térmicos para el usuario	23
1.5 Requerimientos lumínicos para el usuario	25
CAPÍTULO 2. Materiales aislantes translúcidos	28
2.1 Materiales aislantes y la crisis energética	30
2.2 Productos comerciales en el mundo	31
2.3 Clasificación de materiales aislantes	32
2.4 Propiedades térmicas	34
2.5 Propiedades ópticas	35
2.6 Selección de materiales aislantes translúcidos	37
CAPÍTULO 3. Instrumentos de medición para la envolvente del cerramiento arquitectónico	41
3.1 La atmósfera y la radiación solar	43
3.2 La radiación solar y el cerramiento arquitectónico	46
3.3 Instrumentos de medición	49
CAPÍTULO 4. Método de estudio para el análisis térmico y lumínico de materiales aislantes translúcidos en cubiertas	54
4.1 Descripción del caso de estudio	55
4.2 Análisis del clima	57
4.3 Modelo experimental	62
CAPÍTULO 5. Comportamiento térmico y lumínico de la cubierta	76
5.1 Comportamiento general de la cubierta	78
5.2 La cubierta durante la temporada cálida	87
5.3 La cubierta durante la temporada fría	97
5.4 Análisis del desempeño térmico y lumínico de los materiales	108

CAPÍTULO 6. Resultados y conclusiones	115
6.1 Discusión de resultados	116
6.2 Conclusiones	124
6.3 Trabajo a futuro	129
Anexo A. Centros comerciales en la ZMCM	130
Anexo B. Calibración de estaciones meteorológicas	131
Anexo B.1 Calibración de sensores de Humedad y Temperatura	131
Anexo B.2 Acondicionamiento del sensor de luz	134
Referencias	135
Bibliografía	136
Ilustraciones	146
Índice de figuras	146
Índice de gráficas	148
Índice de tablas	150

Introducción

La cubierta es el elemento de la envolvente arquitectónica que está sometido a mayores ganancias térmicas durante el día, por la constante incidencia de la radiación solar, y a mayores pérdidas térmicas durante la noche, por la ausencia de esta. Por lo tanto, el material que conforma las cubiertas puede ganar o perder una mayor o menor cantidad de energía térmica al interior de un espacio, influyendo en las condiciones de confort térmico y visual para el usuario y el consumo energético del inmueble.

Actualmente, existe una gran variedad de materiales con propiedades térmicas y/o lumínicas que pueden ser adecuadas para edificios del sector comercial en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). Por ende, es importante estudiar el comportamiento térmico y lumínico de aquellos materiales con el potencial de obtener un alto rendimiento energético y aprovechamiento de luz natural, durante la etapa conceptual de un proyecto arquitectónico. Esto demuestra la necesidad de los arquitectos y diseñadores de la construcción por emplear herramientas para la toma de decisiones de materiales con un mismo objetivo.

Los materiales aislantes translúcidos (TIM's, por sus siglas en inglés) son estrategias de sistema pasivo que tienen el potencial de disminuir el consumo energético de sistemas de climatización e iluminación artificial entre un 20 y 30 % aproximadamente (Kneifel 2010). Por lo tanto, los TIM's permiten satisfacer requerimientos arquitectónicos, estructurales y energéticos (CEI, IDAE y CSCAE 2005). El aerogel es un TIM de estructura cuasihomogénea que tiene un gran potencial en la construcción, debido su aplicación en distintas tecnologías que son amigables con el medio ambiente y al considerable ahorro energético (Cuce et al. 2014).

Debido a la importancia de una adecuada selección, si se utilizan TIM's en las cubiertas de gran claro y estructura curva, modificarán el comportamiento térmico y lumínico para aminorar el consumo energético en el interior de los espacios, en comparación a los materiales convencionales. Por lo tanto, se identificó el material translúcido con el mejor desempeño térmico y lumínico, a partir de dos materiales no convencionales (el aerogel y politetrafluoroetileno (PTFE)) respecto a un elemento convencional (el policloruro de vinilo (PVC)).

Este estudio diseñó un modelo experimental con una duración de un ciclo climatológico (un año) para analizar y caracterizar el comportamiento térmico y lumínico (temperatura e iluminancia) de los materiales de estudio en la ZMCM. Debido a la cantidad de datos recopilados,

se analizaron 2 días para cada tipo de cielo (despejado, parcialmente nublado y nublado) en los meses calurosos y fríos, es decir, 12 días de estudio. Asimismo, se realizó un reporte fotográfico para analizar el cambio físico de los materiales de estudio. Posteriormente, se desarrolló una matriz de selección de TIM's para evaluar, interpretar e identificar el material con el mejor desempeño térmico y lumínico. Por lo tanto, se realizó una propuesta de los indicadores de desempeño y una estimación del impacto (magnitud e importancia) de cada uno para cada material.

El presente documento se conforma de seis capítulos que desarrollan el marco teórico, la metodología, el análisis e interpretación de resultados y la conclusión de la investigación. A continuación, se describe de manera general el capitulado:

- **Capítulo 1:** describe la importancia del consumo energético y el potencial ahorro de energía en el sector comercial en México, a través de programas y estrategias para cumplir los requerimientos térmicos y lumínicos de los usuarios.
- **Capítulo 2:** menciona el beneficio de los TIM's ante la crisis energética y describe la variedad de productos en el mercado, el proceso de selección y métodos para estimar su desempeño.
- **Capítulo 3:** compila información sobre la radiación solar y los efectos que produce en la envolvente arquitectónica, así como los tipos de modelos de estudio para analizar sus repercusiones en el interior.
- **Capítulo 4:** describe el caso de estudio y desarrolla los métodos para el análisis del sitio y el diseño del modelo experimental.
- **Capítulo 5:** analiza y caracteriza el comportamiento térmico y lumínico en el interior de los módulos de prueba, a partir de gráficas y tablas, y desarrolla el método para el análisis de desempeño térmico y lumínico de los materiales.
- **Capítulo 6:** interpreta los resultados del modelo experimental; evalúa e identifica el material con el mejor desempeño, a partir de indicadores en una matriz de decisión, y se concluye con la descripción general del desarrollo y sus limitaciones, aportes de la investigación y trabajo a futuro.

Antecedentes

Desde la firma del Protocolo de Kioto en 1997, los materiales de alto desempeño tuvieron relevancia por las consideraciones de sustentabilidad y la potencial solución a la ineficiencia energética en construcciones (Alonso et al. 2013). Un problema latente en la construcción es la limitante disponibilidad de materiales fabricados con compuestos orgánicos o reciclados, por lo que existen una mayor cantidad de materiales con un ciclo de vida lineal (sin posibilidad de reciclar). Existen estudios dentro de la tecnología de materiales, de origen orgánico y biodegradables, con el potencial para ser empleados en la construcción o aquellos que han sido mejorados (nanomateriales) para generar materiales de vida cíclica, con la posibilidad de ser reciclados o biodegradables (Atawa H, Al-Kattan, y Elwan 2015). El aerogel es un material que tiene un gran potencial en la construcción, debido su aplicación en distintas tecnologías que son amigables con el medio ambiente y al considerable ahorro energético (Cuce et al. 2014).

Kistler (1931), de la Universidad del Pacífico en Stockton, California, descubrió el aerogel de sílice, un material sólido con estructura porosa y ligera, debido a una alta densidad de moléculas de hidrógeno (99 %) y baja densidad de sílice (0-1 %). La dimensión del aerogel granular es de 0.3-2 nm aproximadamente, considerándose como un nanomaterial (Reim et al. 2005; ATIGA 2016).

Mujeebu, Ashraf y Alsuwayigh (2016) evaluaron el desempeño energético y la viabilidad económica de dos materiales (el vidrio nano aerogel (nanogel) y el nano panel de aislamiento al vacío (VIP)) en un edificio de oficinas de gran altura en Dhahran, Arabia Saudita. La investigación demostró que la ventana de nanogel puede ahorrar 14 % del consumo energético anual del edificio y la recuperación económica del vidrio nanogel y el panel VIP en muros y techos es de 7 años, en comparación a los 54.2 años que requiere el aislamiento convencional.

Las condiciones meteorológicas (el clima) y la posición geográfica de un lugar son parámetros que influyen en el desempeño del aerogel. Chen et al. (2018) elaboraron un modelo experimental para validar los resultados del vidrio con aerogel en el modelo matemático en 5 regiones con diferentes condiciones meteorológicas. El mejor desempeño del aerogel fue en las regiones con un clima frío extremo (Harbin), templado (Kunming), en las orientaciones norte-sur de Changsha (verano cálido e invierno frío) y en todas las orientaciones para Beijing (clima frío).

Asimismo, Schultz, Jensen y Kristiansen (2005) confirman que en climas fríos el consumo energético anual por calefacción disminuye considerablemente, debido a su alto valor G (76 % de transmitancia) y bajo valor U (coeficiente de transferencia de calor $< 0.7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) (ver *Tabla 1*).

Dowson et al. (2011) evaluaron el potencial de un panel prototipo, compuesto por una lámina de policarbonato de doble pared rellena de aerogel granular translúcido, utilizado en sistemas de acristalamiento. El estudio de los investigadores demostró que el material puede disminuir hasta un 80 % de la pérdida térmica e iluminar sin bloquear la luz natural útil. Por lo tanto, se considera su potencial en edificios habitacionales y comerciales para el ahorro energético en sistemas de climatización e iluminación artificial.

Tabla 1. Prototipos elaborados con aerogel para su aplicación en elementos arquitectónicos.

AÑO	AUTOR	PAÍS	PROTOTIPO	RESULTADOS
2004	Jensen, K.I. Schultz, J.M. Kristiansen, F.H.	Dinamarca	Aerogel monolítico entre dos capas de vidrio.	Espesor de 15 mm: coeficiente total de transferencia de calor (valor U) $< 0.7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ y una transmitancia de radiación solar del 76 %.
2005	Reim, M., Körner, W., Manara, J., Korder, S., et. Al.	Alemania	Aerogel granular confinado en una lámina de PMMA, entre dos paneles de vidrio low-e con gas.	Espesor < 50 mm: valor U menor a $0.4 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ y una transmitancia de radiación solar del 35 %.
2008	Baker, P.	Escocia	Marco de madera con aerogel en manta (Spacetherm de 9 mm).	Valor U de $1.6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, disminución de pérdida de calor total del 60 % y temperatura de la superficie interior (hacia el cuarto) de $21 \text{ }^\circ\text{C}$.
2011	Dowson, M., Harrison, D., Craig, S., & Gill, Z.	Reino Unido	Lamina de policarbonato de doble pared de 6 mm con partículas de aerogel de 3 mm de diámetro.	Valor U de $1.54 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, reducción de la pérdida de calor total del 74 %. Transmitancia 58 %, reducción de luz natural 22 %.
			Lamina de policarbonato de doble pared de 10 mm con partículas de aerogel de 3 mm de diámetro.	Valor U de $1.17 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, reducción de la pérdida de calor total del 80 %. Transmitancia 51 %, reducción de luz natural 31 %.
2012	Buratti y Moretti	Italia	Ventanas de aerogel monolítico y granular en el interior.	Valor U de $>0.6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ y $>1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; transmitancia óptica del 62 % y <30 % y factor solar de 0.74 y 0.36.
2013	Alonso, L., Bedoya, C., Lauret, B., Alonso, F.	España	Panel de 25 mm de espesor, relleno de aerogel monolítico y confinado de Polimetilmetacrilato.	Resistencia térmica de $3.16 \text{ m}^2\text{k/w}$; Valor U de $0.316 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ y transmisión de luz entre 87.6 y 71.6 %.
2013	Baetens, R.	Bélgica	Lamina de polimetilmetacrilato relleno de aerogel granular semi transparente y altamente translucido.	Espesor de 20 mm: valor U de $0.5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ y una transmitancia de radiación solar del 75 %.
2014	F. Cotana, A.L. Pisello, E. Moretti, C. Buratti	Italia	2 paneles de vidrio flotado relleno de aerogel granular (15 mm), confinados en 2 capas de vidrio low-e (1.23 x 1.47 m).	Espesor de 23 mm y orientación sur: valor U de $1.09 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, disminución en la fluctuación térmica diaria de $3 \text{ }^\circ\text{C}$ (sistema de calefacción apagada). Disminución en los niveles de iluminancia promedio un 36- 47 %. Incremento en el aislamiento acústico de 3 dB para 28 a 31 dB.
2015	Yu Huang, Jian-lei Niu	Hong Kong	Aerogel granular (10 mm) entre dos capas de vidrio de 6 mm (25 x 25 cm).	Espesor de 24 mm y clima subtropical: Reduce el 60 % de ganancias térmicas, un 4 % de consumo en sistemas de climatización en el año y un 4-8 % en sistemas de enfriamiento. El periodo de horas de confort ($25 \text{ }^\circ\text{C}$) aumentó un 34-38 %.
2016	M. Abdul Mujeebu, N. Ashraf y A Alsawayigh	Saudí Arabia	Paneles de vidrio (5mm) relleno de gas argón (12 mm) y nanogel de sílice (16 mm).	Espesor total de 50 mm: Ahorro de un 14 % del consumo energético anual en un edificio de oficina. Adecuado para desarrollo en ventanas.
2018	Y. Chen, Y. Xiao, S. Zheng, Y. Lui, Y. Li	China	Aerogel granular entre dos capas de vidrio.	Apropiado para regiones frías/invierno y calientes/verano en las orientaciones norte y sur.
2020	Ibrahim Rizk Hegazy	Egipto	Aerogel granular entre dos capas de vidrio de 6 mm.	Ahorro de un 40 % del consumo energético en un edificio de pisos y uso gubernamental.

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de Jensen, Schultz y Kristiansen (2004); Reim et al. (2005); Baker (2008); Dowson et al. (2011); Buratti y Moretti (2011); Alonso et al. (2013); Baetens (2013); Cotana et al. (2014); Huang y Niu (2015); Abdul Mujeebu, Ashraf y Alsawayigh (2016); Chen et al. (2018) y Hegazy (2020).

El aerogel tiene gran potencial en la construcción, pero sus limitaciones, las cuales se mencionan más adelante, impiden su crecimiento comercial en el futuro. Buratti y Moretti (2011) elaboraron diferentes prototipos de acristalamiento con aerogel monolítico y granular, por lo que considera que su complejo proceso de producción impide la fabricación de piezas mayores a 0.58 x 0.58 m de aerogel monolítico, debido a su fragilidad y alto costo (Liskiewicz 2020). El aerogel granular tiene una mayor estabilidad que las láminas monolíticas, pero su presentación restringe su uso como material de relleno (Alonso et al. 2013; Buratti y Moretti 2011). De acuerdo con Liskiewicz (2020), la manta de aerogel tiene una mayor resistencia a la deformación por tensión, en comparación al monolítico y granular, debido a la posibilidad de mezclar las partículas con fibras de diversos materiales. La *Tabla 1* recopila los resultados de investigaciones que evaluaron prototipos elaborados con el aerogel (material de relleno) y diversos materiales (sistema de confinamiento), utilizados como elementos de la envolvente arquitectónica en diferentes condiciones climáticas.

La empresa comercial Birdair (2021a) ha dirigido diversos proyectos con soluciones tensoestructurales que utilizan la membrana aislante translúcida llamada Tensotherm™ en cubiertas, compuesta de tres capas (una membrana externa de fibra de vidrio recubierta de PTFE, una capa de manta de aerogel Nanogel® de 8 mm y un revestimiento acústico interior de PTFE). La capa exterior también puede ser fabricado con fibras de vidrio recubiertas de PTFE o PVC y la capa interior de un revestimiento acústico o de barrera de vapor (Augustyniak 2009; Birdair 2014). El sistema se utilizó en tres obras nuevas, cuatro rehabilitaciones y una remodelación de edificios pertenecientes al sector comercial, en Arabia Saudita (2015), Hong Kong (2016), Qatar (2017), Canadá (2011), Estados Unidos (2008, 2012 y 2015) y México (2016) (Liskiewicz 2020; Birdair 2021b).

Augustyniak (2009) es un investigador de la empresa Birdair que realizó un escaneo térmico aéreo en el gimnasio Talisman Center para analizar la efectividad de aislamiento de dos cubiertas con materiales aislantes (el Tensotherm™ y la membrana estándar a tensión) y un elemento comparativo (el techo existente con una membrana de caucho). La iluminación natural homogénea, el aislamiento térmico y acústico de la cubierta con aerogel fueron superiores a un aislamiento convencional (fibra de vidrio y lana mineral), desde su manufactura hasta la última evaluación que se realizó durante un periodo de un año.

Dowson et al. (2011) mencionan la importancia de realizar mediciones en sitio para observar el desempeño del prototipo bajo condiciones reales, como las variaciones del viento, temperatura

y radiación solar (Martin y Watson 1990). Dowson et al. (2011), Alonso et al. (2013), Chen et al. (2018), Buratti y Moretti (2011) desarrollaron y analizaron prototipos (ver *Figura 1*) para validar modelos matemáticos o simulaciones por computadora. Los módulos de prueba fueron previamente calibrados para obtener datos confiables durante el periodo de estudio (1 a 30 días) y el análisis de resultados. El desempeño de un material suele ser evaluado en la temporada cálida y fría de la región, para analizar su desempeño en orientaciones específicas.

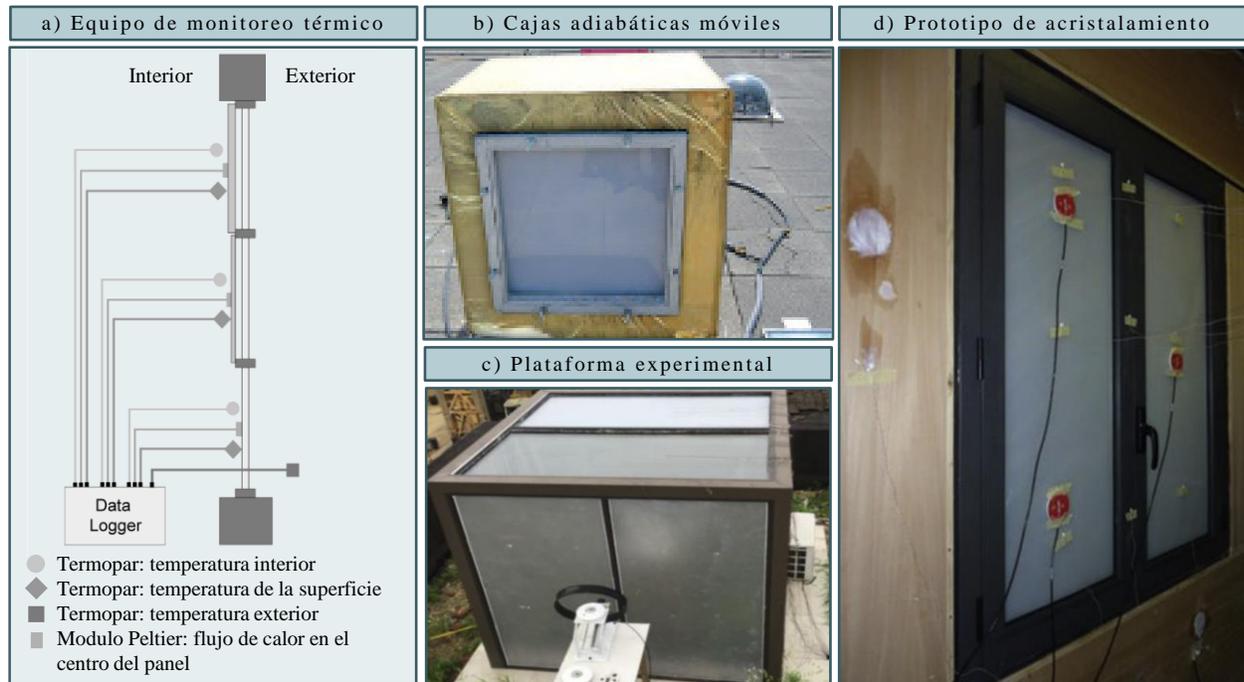


Figura 1. Métodos para evaluar prototipos de acristalamiento a) diagrama esquemático del equipo de monitoreo térmico b) cajas adiabáticas móviles, desarrollada en el Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas de la ETSAM c) plataforma experimental para validar el modelo de transferencia térmica dinámica d) prototipo de acristalamiento con aerogel en el interior, por Buratti y Moretti. Elaboración propia con fotografías de Dowson et al. (2011), Alonso et al. (2013), Chen et al. (2018), Buratti y Moretti (2011).

De acuerdo con las investigaciones anteriores, el aerogel (monolítico, granular o en manta) tiene el potencial de aumentar el ahorro energético, aislamiento térmico, aprovechamiento de la luz natural y la sustentabilidad en las construcciones respecto a un aislamiento convencional. Para las cubiertas translúcidas, el aerogel monolítico tiene el mejor desempeño térmico y lumínico pero el granular ofrece una mayor versatilidad de forma, facilidad de producción comercial y es más económico (Alonso et al. 2013; Dowson et al. 2011). Por lo tanto, Birdair (2021a) y Liskiewicz (2020) mencionan que la manta de aerogel granular es el formato adecuado para aumentar la eficiencia energética en cubiertas, por su potencial ahorro energético, retorno de inversión favorable, resistencia a la tensión, versatilidad en la forma y como material de relleno.

CAPÍTULO 1.

Consumo energético en el sector comercial en México

“Lo más importante es recopilar datos, tener información y transformar eso en una decisión: impulsar la investigación en México.”

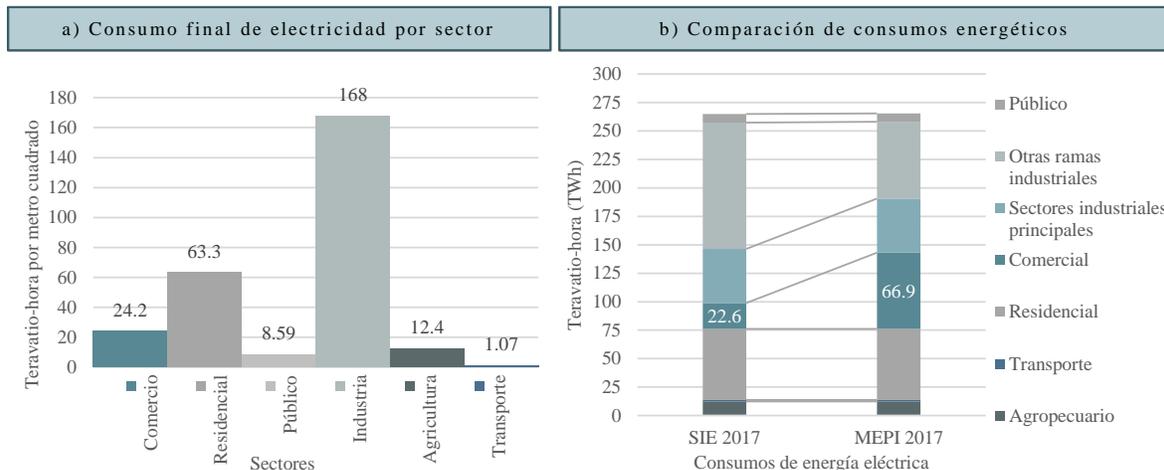
Hoarau (2018)

En México, el 60 % de las personas acude a los centros comerciales para hacer uso de los espacios de consumo, intercambio de servicios o mera recreación, tan propios de nuestro tiempo (Navarrete 2019; Gasca-Zamora 2017). En consecuencia, se acentúa la necesidad de ofrecer un entorno confortable. Un centro comercial, en promedio, destina el 90 % de su consumo energético anual en el confort térmico y visual, en comparación al 10 % de energía que necesita un centro comercial para su funcionamiento (Santillana Ramos 2018).

Por otra parte, la gestión eficiente de sistemas de aire acondicionado, equipos de transporte vertical e iluminación artificial puede significar un ahorro anual de hasta un 20 a 30 % (Santillana Ramos 2018). Al respecto, diversas investigaciones privadas y gubernamentales han estudiado estrategias de sistemas pasivos y activos, con el objetivo de disminuir el consumo energético en las edificaciones. Asimismo, las normas nacionales e internacionales son una herramienta de diseño para conocer las condiciones óptimas de un espacio y generar beneficios de ahorro energético (Capezzuto y Oltmanns 2015).

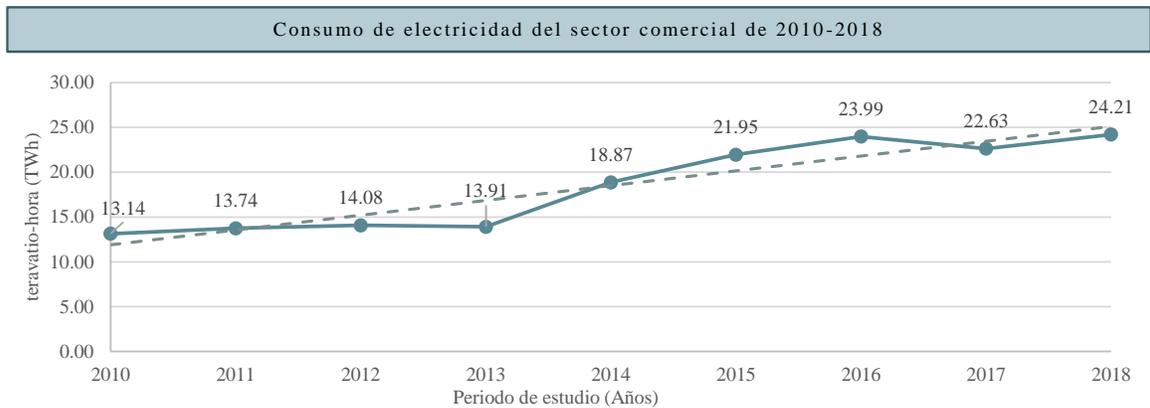
La Secretaría de Energía (SENER) y el Sistema de Información Energética (SIE) (2018) determinaron 277.56 TWh/m² (teravatio hora por metro cuadrado) de consumo final de electricidad en México. De acuerdo con la Comisión Federal de Electricidad, la *Gráfica 1, a* muestra el aprovechamiento de energía primaria y secundaria en los sectores comercial, residencial, público, industrial, agropecuario y transporte (Chatellier Lorentzen y McNeil 2019). De Buen Rodríguez (2009) menciona una mala categorización de edificios del sector industrial debido a la clasificación por tipo de tarifa eléctrica, en lugar de la actividad económica.

Para Chatellier y McNeil, de Lawrence Berkeley National Laboratory (2019) los edificios públicos de la administración, escuelas, entre otros, no se categorizan en las tarifas de servicios públicos; éstos se consideran como edificios comerciales. El informe muestra que el sector comercial excede el consumo eléctrico de años anteriores, provocando un uso excesivo de uso energético en comparación a los demás (ver *Gráfica 1, b*). Los mismos autores consideran a los hoteles, restaurantes, oficinas, comercios, supermercados, hospitales y escuelas parte del sector comercial.



Gráfica 1. a) Consumo final de electricidad por sector en México, en 2018 y b) comparación de consumos energéticos con datos del SIE y los calculados por Chatellier y McNeil. Elaboración propia con datos obtenidos de (SENER y SIE 2018; Chatellier Lorentzen y McNeil 2019).

Se dice así que, el sector comercial muestra una tendencia a un mayor crecimiento de consumo de electricidad en el futuro (ver *Gráfica 2*), debido a un aumento de 11.07 TWh en ocho años (durante el periodo 2010-2018), donde el mayor aumento de consumo energético de 10.08 TWh ocurrió entre 2013 y 2016. Por tal motivo, se debe considerar la implementación de programas de ahorro y uso eficiente del sector comercial para producir grandes ahorros energéticos (Chatellier Lorentzen y McNeil 2019).



Gráfica 2. Consumo de electricidad del sector comercial en México y la línea de tendencia, con datos del Balance Nacional de Energía 2010-2018.
Elaboración propia con datos obtenidos de (SENER y SIE 2018).

1.1 Centros Comerciales en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

En el 2016 se registraron 645 centros comerciales en el territorio mexicano, con una superficie bruta alquilable (GLA) mayor a ocho millones de metros cuadrados, de los cuales más de 200 centros comerciales se ubicaron en la ZMCM, aumentando 38 edificios nuevos en los siguientes dos años (Gasca-Zamora 2017; Trejo 2018). Asimismo, Gasca (2017) reportó para la ZMCM la construcción de 108 obras nuevas en la última década y estima un aumento de 760 edificios para el año 2025, con una superficie en venta de 23.3 millones de metros cuadrados y un ratio comercial de 22.0 m²/100 habitantes. Por lo tanto, se estima un inminente crecimiento de construcciones de centros comerciales en la Ciudad de México.

Real Estate Market & Lifestyle (2018) elaboró un estudio para representar la situación actual de los centros comerciales en México y estimó la apertura de 17 nuevos complejos comerciales en la ZMCM, durante el 2019 y 2021 (ver *Tabla A.1*). La configuración espacial de los edificios en estado de remodelación u obra nueva se conforman por un 65 % de diseños techados y el 35 % restante en distribuciones abiertas. Los desarrolladores o financieros con el mayor porcentaje de obras son GICSA y Mexico Retail Properties (MRP), quien contempla la apertura de tres centros comerciales (proyectos en etapa de preconstrucción) en el 2022.

1.1.1 Consumo energético.

De acuerdo con la tipología comercial (Community Center, Fashion Mall, Power Center, entre otros), el consumo energético anual de un centro comercial oscila entre 150 y 350 kilovatio hora por metro cuadrado ($\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$), los cuales destinan un 50 % en iluminación artificial, un 40 % en sistemas de aire acondicionado y el 10 % restante en equipos mecánicos (bombas, sistemas de refrigeración, motores, entre otros). Aunado a esto, un centro comercial puede aumentar su consumo energético hasta un 20 % del consumo anual total en temporadas de invierno, debido a la reducción de horas de sol por día, la infraestructura en iluminación por festividades, y la regulación de bajas temperaturas con sistemas de calefacción (Santillana Ramos 2018).

Siemens indicó que el 40 % del consumo energético total del país proviene de edificios. De acuerdo con Preinfalk, los centros comerciales son el segmento más importante, pues destinan el mayor consumo de energía en sistemas de aire acondicionado, equipos de transporte vertical e iluminación interior y exterior (Mendoza 2018). Por lo tanto, “la generación de energía es un tema de vital importancia para los centros comerciales, ya que éstos enfrentan tarifas muy altas dado su vasto consumo de electricidad” (Herrera Padilla 2018).

1.1.2 Potencial ahorro energético.

La implementación de programas de ahorro energético y la gestión eficiente pueden generar hasta un 20 y 30 % de ahorro de energía, lo que representa entre 2 y 3 millones de $\text{kW}\cdot\text{h}$ y una reducción de 1 500 toneladas de emisión de CO_2 al año (Chatellier Lorentzen y McNeil 2019; Santillana Ramos 2018). Según Schneider Electric y Siemens, los edificios comerciales tienen una eficiencia energética potencial del 82 %, la cual no ha sido aprovechado debido a la falta de conocimiento de las posibilidades tecnológicas (Mendoza 2018). Por lo anterior, Mendoza (2018) refirió en la revista Retailers Magazine el panorama de oportunidad de los centros comerciales que Preinfalk comentó:

Hay una demanda de soluciones tecnológicas que generan mayor eficiencia energética y disminución de la huella de carbono. Los servicios de optimización energética controlan, analizan y optimizan el consumo de energía del edificio aumentando la comodidad, el ahorro de energía y minimizando el impacto medioambiental [...] Generalmente los administradores de las obras existentes se interesan en la eficiencia energética por los ahorros en las tarifas eléctricas y consumos de energía. (Mendoza 2018, 20)

Boubekri (2008a) elaboró un estudio para demostrar un ahorro energético de hasta el 20 y 40 % en iluminación y refrigeración con el uso adecuado de fotosensores de luz diurna y otros sistemas, en construcciones comerciales y de oficinas ocupadas durante el día. Asimismo, Kneifel (2010) demostró que las tecnologías convencionales de eficiencia energética (el aislamiento térmico, las ventanas de baja emisividad, los voladizos de las ventanas y los controles de luz natural) pueden ahorrar hasta un 20 y 30 % de energía en edificios nuevos comerciales y más del 40 % para otros tipos de edificios y diferentes regiones geográficas. El estudio de cada edificio es un proceso relevante para tomar decisiones y utilizar tecnologías que reducen de 3 a 10 % del consumo energético en tiendas pequeñas y el 20 a 30 % en grandes tiendas (Hoarau 2018).

1.2 Programas de ahorro energético

Los programas y códigos para aminorar el consumo energético y la emisión de carbono se han implementado en construcciones de todo el mundo, a través de métodos de eficiencia. Algunas organizaciones reconocidas son la certificación Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental (LEED, por sus siglas en inglés), el Consejo de Edificación Sustentable de Estados Unidos (USGBC); la certificación Green Globes Building de Green Building Initiative (GBI), alternativa a la certificación LEED en Estados Unidos; la certificación Passive House Building de International Passive House Association, apropiado para climas fríos; y Energy Star, programa de la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos. Las organizaciones anteriores y muchas otras adoptaron las metas de la organización Agenda 2030, destinada al desarrollo sostenible para reducir las emisiones de gas invernadero de construcciones a cero, desde septiembre de 2015 al 2030 (ver *Figura 2*) (Lechner 2015; Naciones Unidas 2018).

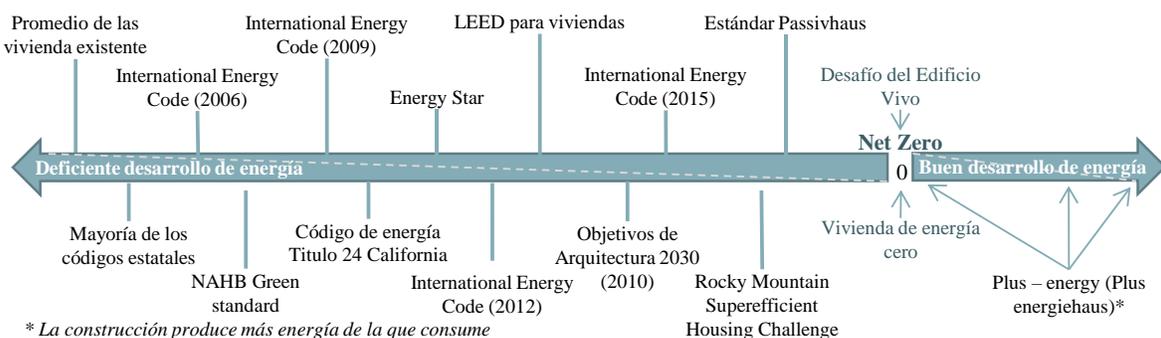


Figura 2. Variación del rendimiento energético de edificios construidos bajo la influencia de los códigos de energía y programas. Elaboración propia con información obtenida de Lechner (2015).

Los programas de ahorro energético son un instrumento para gestionar la energía por medio de una metodología y la definición de estrategias. La Agencia Internacional de Energía (por sus siglas en inglés, IEA) y el Programa de Energía en los Edificios y Comunidades (EBC) elaboraron proyectos colaborativos internacionales para desarrollar y aplicar metodologías científicas en edificios comerciales, residenciales y de oficinas, por medio de simulaciones en computadoras (Da y Tianzhen 2018). El proyecto *IEA EBC Anexo 66: Definición y simulación del comportamiento de los ocupantes en edificios* propone cuatro etapas para analizar y evaluar el rendimiento energético de un edificio:

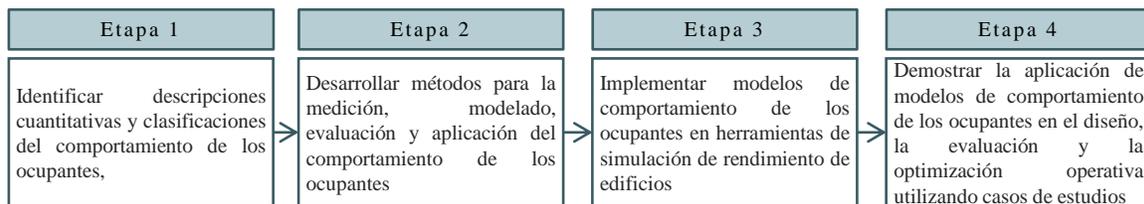


Figura 3. Etapas para gestionar la energía eléctrica, a partir del comportamiento de los ocupantes en edificios. Elaboración propia con datos obtenidos de Da y Tianzhen (2018).

Animación y Promoción del Medio (AMP) y la Fundación Vida Sostenible (FVS) (2011) elaboraron la *Guía de buenas prácticas energéticas en galerías y centros comerciales*, que consiste en cinco etapas (la limpieza y mantenimiento, iluminación y climatización, abastecimiento, transporte y almacenamiento y comunicación) para cada tipo de edificios comerciales. Asimismo, la herramienta recomienda realizar un plan de gestión de la demanda y una auditoría energética completa basada en las cinco secciones propuestas por una Empresa de Servicios Energéticos (ver *Figura 4*) (AMP y FVS 2011).



Figura 4. Pasos para elaborar una auditoría energética completa, según una Empresa de Servicios Energéticos. Elaboración propia con datos obtenidos de AMP y FVS (2011).

La eficiencia energética consiste en aprovechar la energía disponible para obtener “la mayor cantidad posible de iluminación, calor y fuerza con el mínimo de kilovatios, metros cúbicos de gas o litros de combustible” (AMP y FVS 2011), es decir, “el uso de una menor cantidad de energía” (EPA 2009). Por ende, los programas de ahorro energético se han convertido en un objetivo clave para una gestión eficiente de energía, debido a un beneficio económico, social y ambiental sin perjudicar el confort y la calidad del servicio hacia el usuario.

1.3 Estrategias de diseño para la eficiencia energética

Por estrategias se entiende a “las acciones óptimas para la consecución de un fin, basadas en ciertas reglas, principios o directrices que ayuden a tomar las decisiones correctas” (Fuentes Freixanet 1984). En el caso del diseño bioclimático, las estrategias son “para que el diseñador y el constructor considere la interacción entre energía, ambiente y construcción para que ésta regule los intercambios de calor con el ambiente y propicie las condiciones de comodidad o confort que requiere el ser humano” (CONAFOVI 2006).

A principios del siglo XIX, el ciudadano comenzó a adquirir nuevos hábitos y habilidades por la aplicación de tecnologías como la luz eléctrica (invento de Edison) y el aire acondicionado (diseño de Haviland Carrier). Esto ocasionó una crisis energética en los años setentas por el uso desmedido de las nuevas tecnologías en edificaciones, utilizados ante el impacto del clima en las edificaciones (Banham 1969). En consecuencia, diversos autores propusieron aplicar estrategias de diseño para aminorar el consumo energético.

Los Congresos de Energía Solar, organizados por la Sociedad Internacional de Energía Solar (ISES), clasificaron a las estrategias de diseño de acuerdo con la conformación de los componentes para su funcionamiento. Los sistemas activos (mecánicos) se forman por colectores planos o concentradores que necesitan otros componentes para realizar mecanismos de transferencia, control y distribución de la energía. Los sistemas pasivos (arquitectónicos) forman parte del edificio, por lo tanto, los mecanismos de transferencia, control y distribución de la energía son considerados en el diseño arquitectónico para no recurrir a un sistema externo (Sarmiento M. Pedro 2007; Serra Florensa y Coch Roura 2001; Zeevaert Alcántara 2020).

A finales de los años sesenta, Givoni (1969) presentó los límites de efectividad de las estrategias y el complemento entre sistemas para obtener el nivel de confort deseado en distintas condiciones climatológicas. Por lo anterior, Zeevaert (2020) menciona una tercera clasificación nombrada “híbrido” y concluye que a pesar de que un ser humano puede controlar su estado de confort por su actividad o el aislamiento de su ropa, solo los sistemas convencionales (mecánicos) pueden lograr las condiciones térmicas interiores ideales.

1.3.1 Sistemas activos.

Los sistemas requieren de energía eléctrica para coleccionar, transferir, almacenar y distribuir la energía. Las estrategias básicas de climatización en un edificio son la ventilación forzada, la calefacción, la refrigeración y el acondicionamiento de aire (estos dos últimos se realizan con el mismo dispositivo nombrado “aire acondicionado”). Cabe destacar que “los sistemas activos deben ser complementarios a los pasivos [...] para poder reducir el consumo de energía, ya que éstos sistemas requieren un gran consumo de energía teniendo un impacto ambiental negativo” (Ruiz 2019).

Actualmente, existen parámetros para otorgar etiquetas de eficiencia energética para sistemas de climatización. Es una herramienta para informar al usuario la eficiencia energética cuando el equipo está al 100 % de su potencia (EER y SEER) y su rendimiento energético (COP y SCOP). Los valores más altos (entre A+++ y C) representan una mayor eficiencia del equipo y un costo elevado del sistema, sin embargo, puede reducir la factura de electricidad por el ahorro de energía (Junkers 2017) (ver *Figura 5*).

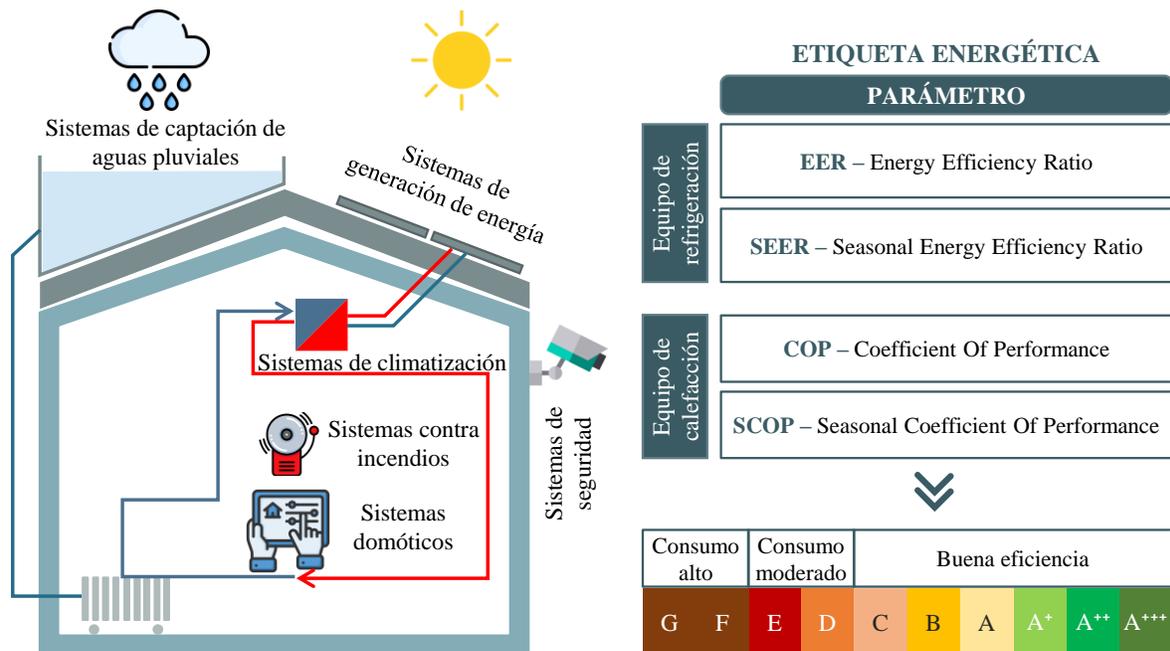


Figura 5. Sistemas activos de una edificación (izquierda) y tabla informativa sobre etiquetas de rendimiento de un sistema de climatización (derecha).
Elaboración propia con datos obtenidos de Carlos (2014); Junkers (2017); Ruiz (2019).

1.3.2 Sistemas pasivos.

Actualmente, los sistemas pasivos son sinónimos de “diseño con el clima” (V. Olgyay 1967; Koeningsberger et al. 1975), “conservación de la energía” (AIA 1974; Watson 1979), “diseño pasivo” (Mazria 1979; Lebens 1980), “ecodiseño” (Tudela 1982), “Eco-tech” (Zeihner 1996; Slessor 1997), “arquitectura verde” (Vale y Vale 1991), “arquitectura solar”, “helioarquitectura” y “arquitectura bioclimática” (Sarmiento M. Pedro 2007; Zeevaert Alcántara 2020). Este último es un concepto adecuado, por la integración entre los fenómenos radiantes, térmicos y de movimiento del aire y el bienestar de las personas en el diseño arquitectónico (Sarmiento M. Pedro 2007). Por lo tanto, las estrategias de diseño tienen el objetivo de lograr una adecuada relación entre el análisis climático y los requerimientos de confort (Fuentes 1984^a).

Los componentes de los elementos pasivos que interactúan en la construcción son la superficie (absorción de radiación de onda larga y onda corta y emisión de onda larga), la masa térmica (almacena el calor o retiene el frío), el espacio habitable (el cual es calentado o enfriado), el sistema de control (regula la cantidad de calor o frío en el espacio) y el sistema de distribución (transfiere el calor o frío hacia el espacio habitable) (Givoni 1969; Watson 1979; Lebens 1980; Mazria 1979). La radiación solar incide sobre la superficie, el calor se distribuye en la masa térmica de la construcción y se transfiere hacia el espacio habitable (Sarmiento M. Pedro 2007). El sistema de control permite ganar/resistir ganancias de calor durante el día y evitar/promover las pérdidas de calor durante la noche, a través de mecanismos de transferencia de calor por conducción, convección, radiación y evaporación (ver *Figura 6*).

ESTRATEGIAS DE CALENTAMIENTO						
ESTRATEGIAS DE CONTROL	INVIerno	FUENTE DE CALOR	CONDUCCIÓN	CONVECCIÓN	RADIACIÓN	EVAPORACIÓN
		Día		Atmosfera <td>Sol</td> <td></td>	Sol	
	Promover Ganancias			Promover Ganancias solares		
	Noche	Evitar pérdidas	Minimizar el flujo conductivo de calor	Minimizar el flujo de aire exterior		
			Minimizar la infiltración			
ESTRATEGIAS DE ENFRIAMIENTO						
ESTRATEGIAS DE CONTROL	VERANO	SUMIDERS DE CALOR	CONDUCCIÓN	CONVECCIÓN	RADIACIÓN	EVAPORACIÓN
		Día	Tierra <td>Atmosfera <td>Espacio exterior <td>Atmosfera </td></td></td>	Atmosfera <td>Espacio exterior <td>Atmosfera </td></td>	Espacio exterior <td>Atmosfera </td>	Atmosfera
	Resistir Ganancias	Minimizar el flujo conductivo de calor	Minimizar la infiltración	Minimizar la infiltración	Minimizar la infiltración	
	Noche	Promover pérdidas	Promover el enfriamiento conductivo	Promover la Ventilación	Promover el Enfriamiento Radiante	Promover el Enfriamiento evaporativo

Figura 6. Mecanismos de transferencia de calor por medio de estrategias pasivas de control para los periodos extremos del año. Elaboración propia con datos obtenidos de Zeevaert Alcántara (2020); Fuentes Freixanet (1984).

1.4 Requerimientos térmicos para el usuario

El confort y/o bienestar térmico es un término que determina el rango de temperatura y humedad en el cual el hombre desarrolla sus actividades cotidianas de manera óptima (Zeevaert Alcántara 2020). Fuentes (1984) considera la importancia de las relaciones entre el medio ambiente térmico y las sensaciones fisiológicas y psicológicas que experimentan las personas frente a condiciones impuestas por ese ambiente. Debido a la importancia de los factores subjetivos y objetivos que se relacionan con el hombre, la mayor parte de los estudios científicos en el siglo XX se enfocó en determinar los índices de confort térmico por medio de la integración de parámetros básicos (Parsons 2014).

Parsons (2014) y la norma ANSI/ASHRAE 55:2017 (2017) sugirieron dos términos (personales y ambientales) que se derivan en seis parámetros básicos (varían en el espacio y el tiempo). La relación entre el metabolismo generado por los factores personales (la actividad humana y el arropamiento) y ambientales (la temperatura del aire, temperatura radiante media, velocidad relativa del aire y humedad relativa) definen los entornos térmicos humanos y, en consecuencia, el índice de confort de las personas:

(Ec. 1.1)

$$f(MET, CLO; TBS, HR, MRA, TMR,) = 0$$

donde

MET metabolismo por una actividad física,
CLO efecto aislante de la ropa al intercambio de calor;
TBS temperatura del aire,
HR Humedad relativa,

MRA movimiento relativo del aire con respecto a la piel,
TMR temperatura media radiante, características tales como: edad, sexo, forma y superficie corporal, condición de salud, etc.

El cuerpo humano es un organismo sumamente complejo que desarrolla funciones para mantener constante su temperatura corporal (entre 36.5 °C y 37.5 °C) bajo cualquier condición climática (Fuentes Freixanet 1984). El nivel de actividad física y mental son factores que intervienen en la producción de calor del cuerpo y en consecuencia, el gasto de energía (Zeevaert Alcántara 2020). Fanger (1970) determinó los valores “MET” para diferentes actividades, expresados en múltiplos de un MET, el cual equivale 58.2 W·m². CIBSE (2015) estableció la unidad de resistencia térmica de diferentes combinaciones de ropa (vestimenta europeo-americano), expresados en valor “CLO” (equivalente a 0.16 °C·m²·W⁻¹).

La temperatura del aire o temperatura de bulbo seco es uno de los factores más importantes “ya que entre mayor sea la diferencia entre la temperatura del aire y la del cuerpo, mayor será el flujo de calor” (Fuentes Freixanet 1984). Por consiguiente, el rango de temperatura en la que el ser humano expresa satisfacción térmica, durante el desempeño de una actividad, es muy restringida. Auliciems (2007) estableció una fórmula para determinar los rangos de confort térmico anual en edificaciones naturalmente ventilados, en ciudades de la República Mexicana (ver (Ec. 1.2)). Asimismo, diversos autores establecieron rangos de confort térmico para la Ciudad de México (ver *Tabla 2*).

Tabla 2. Rangos de confort térmico para la Ciudad de México (Tacubaya (obs)) y formula definida por Auliciems y Szokolay.

NORMA O AUTOR		Min.	Tn	Máx.	Fórmula de Auliciems Tn = 17.6 + 0.31 Tm (Ec. 1.2) Zc = Tn ± 2.5 °C donde Tn temperatura neutral, Tm temperatura media anual o mensual, Zc zona de confort.
ANSI/ASHRAE 55:2017	invierno	26.6 °C	28.1 °C	29.6 °C	
	verano	28.1 °C	29.6 °C	31.1 °C	
Humphreys (1976)	invierno	21.0 °C	23.5 °C	26.0 °C	
	verano	23.8 °C	26.3 °C	28.8 °C	
Auliciems y Szokolay (1984)	invierno	21.9 °C	24.4 °C	26.9 °C	
	verano	23.4 °C	25.9 °C	28.4 °C	
Nicol y Roaf (1996)	invierno	22.8 °C	25.3 °C	27.8 °C	
	verano	24.7 °C	27.2 °C	29.7 °C	
de Dear et al. (1997)	invierno	22.1 °C	24.6 °C	27.1 °C	
	verano	23.6 °C	26.1 °C	28.6 °C	

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de ASHRAE (2017);Szokolay (1985); Auliciems y Szokolay (2007).

La humedad relativa se refiere a “la proporción entre la cantidad de agua en forma de vapor que contiene el aire en relación a la cantidad de saturación, expresada como porcentaje” (Ministerio de Fomento 2014). Yunus (2015) indica que el rango de humedad relativa óptimo es entre el 30 % y 70 %, siendo el 50 % el nivel más adecuado. La humedad y la temperatura de la piel aumentan con niveles mayores a 70 % y los malestares térmicos (como resequeidad en los labios las membranas mucosas y deshidratación) se presentan con niveles menores a 20 % (Zeevaert Alcántara 2020).

El movimiento del aire es un factor que a las personas les puede resultar incómodo a velocidades menores de 0.08 m/s por aire estancado y favorable en un rango de 0.12 a 0.25 m/s para todas las aplicaciones (Soler & Palau 2015). Para Yunus (2015), el movimiento se debe mantener a velocidades por debajo de 0.1524 m/s (en invierno) y 0.254 m/s (en verano), para minimizar la incomodidad. La temperatura media radiante (TMR) se refiere al intercambio de calor por radiación entre un cuerpo negro uniforme y el ocupante, además de su entorno propio (Zeevaert Alcántara 2020; ASHRAE 2017). “Algunos estudios recientes sugieren que la temperatura radiante es más significativa que la temperatura del aire” (Fuentes Freixanet 1984).

1.5 Requerimientos lumínicos para el usuario

La luz natural es un elemento vital para el ser humano y todo ser vivo en el planeta, debido a que existen funciones fisiológicas y psicológicas fundamentalmente coordinadas por ciclos (como el ciclo circadiano), que están íntimamente asociados con la radiación solar (Guadarrama Gándara y Bronfman Rubli 2016). Diversas investigaciones muestran su influencia positiva en las personas, como son el control del reloj biológico; los efectos de la luz sobre el sueño, la cura de enfermedades y el estado de ánimo; y su influencia sobre la actividad (Boubekri 2008b; CEI, IDAE y CSCAE 2005).

Ávila y Arias (2015) refieren al confort lumínico como las condiciones adecuadas de iluminación para que el ojo humano pueda leer un libro u observar un objeto de manera fácil y rápida, sin distracciones y estrés. Por el contrario, un espacio que presenta disconfort lumínico comienza a comprometer el aspecto térmico (Laforgue et al. 1997). En ausencia total de luz solar, los seres humanos, plantas y otros animales desarrollan comportamientos anormales y enfermedades por la perturbación del ciclo diurno (Boubekri 2008a).

La Norma Española UNE-EN 12464-1 (2021) menciona que es esencial la satisfacción de necesidades lumínicas cualitativas y cuantitativas, las cuales se subdividen en tres básicas: el confort visual, en el que los trabajadores tienen una sensación de bienestar y contribuye, de manera indirecta, a un elevado nivel de productividad; las prestaciones visuales, en el que los trabajadores son capaces de realizar sus tareas visuales, incluso en circunstancias difíciles y durante períodos más largos; y la seguridad, para realizar cualquier actividad sin riesgos.

Los parámetros fundamentales que determinan el ambiente luminoso son: la distribución de luminancias; la iluminancia; el deslumbramiento; la dirección de la luz; el rendimiento de colores y apariencia de color de la luz; flicker; y luz natural o diurna (British Standards Institution 2021). La iluminancia y su distribución en el área de trabajo y circundante influyen en la percepción visual y la optimización de tareas visuales. Se deben evitar deslumbramientos (valores superiores a 500 lx); contrastes de luminancia altos que causa fatiga por la readaptación constante de la visión; y las luminancias y contrastes bajas que pueden ocasionar un ambiente visual oscuro y no estimulante (valores inferiores a 1 lx). El deslumbramiento es la sensación producida por áreas brillantes dentro del campo visual (molesto) o por reflexiones en superficies especulares (reflejado) (CEI, IDAE y CSCAE 2005).

La *Tabla 3* muestra los valores de iluminancia constante requerida en edificios de uso comercial. Los niveles pueden aumentar cuando el trabajo visual es crítico; los errores son costosos de rectificar; la exactitud o mayor productividad es de gran importancia; el tamaño de los detalles es inusualmente pequeños o de bajo contraste; y la tarea es realizada durante un tiempo prolongado. Por el contrario, se deben disminuir cuando el tamaño de los detalles es considerablemente grande o de alto contraste; y la tarea es elaborada durante un tiempo corto (British Standards Institution 2021).

Tabla 3. Niveles de iluminancia recomendados para edificios de uso comercial.

NORMA O AUTOR	REQUERIMIENTOS LUMÍNICOS
NOM-025-STPS-2008, Condiciones de iluminación en los centros de trabajo	Tabla 1. Niveles de Iluminación para tareas visuales y áreas de trabajo. <i>200 luxes</i> mínimos requeridos para tareas visuales simples como inspección visual, recuento de piezas, trabajo en banco y máquina.
BREEAM ES 2015, New Construction Technical Manual	Apartado Salud y Bienestar-Confort Visual (SyB 1 Confort Visual), Tabla. Notas adicionales, apartado NA 16, Estipulado en UNE EN 12464-1: 2021. Iluminación- Iluminación de los lugares de trabajo- Parte 1: Lugares de trabajo en interiores.
UNE-EN 12464-1: 2021	Tabla de niveles de iluminación, Tabla 35 Establecimientos minoristas, apartado 35.1. <i>300 luxes</i> mínimos requeridos para áreas de venta pequeñas y <i>500 luxes</i> para áreas de venta largos
Steven Szokolay	Tabla de Factores de Luz Natural recomendados. <i>0.5 %</i> (50 lux) de luz natural para aulas de reunión en área de corredores.
ISO 8995 CIE S 008/E	Tabla “Programa de tareas y actividades interiores (áreas) con especificación de iluminancia, limitación de deslumbramiento y calidad de color”. Apartado 23. Minorista, <i>300 luxes</i> mínimos requeridos para áreas de venta pequeños y <i>500 luxes</i> para áreas de venta largos
Casabianca y Mandel	<i>300 a 750 luxes</i> recomendados para edificios de uso comercial
LEED v4.1 Building Design and Construction	EQ Credit: Daylight. Opción 3, Mediciones (1-3 puntos, 1-2 puntos salud), Tabla 3. Puntuación para la opción 3. Registrar niveles de iluminancia entre <i>300 y 3,000 luxes</i> .

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de Secretaría del Trabajo y Previsión Social (2008); Maceiras Pinilla (2017); British Standards Institution (2021); Szokolay (1980); ISO (2002); Casabianca y Mandel (2018); USGBC (2022).

La luz procedente de una dirección permite mejorar y revelar las texturas y formas de las características estructurales del espacio, las personas y objetos, de un modo claro; o revelar detalles dentro de una tarea visual, aumentando su visibilidad, para realizar la tarea con mayor facilidad (British Standards Institution 2021). CEI, IDEA y CSCAE (2005) define al rendimiento de colores de una fuente luminosa como la obtención de información objetiva del entorno, objetos y personas, el cual puede ser medido con un índice de rendimiento de colores general (R_a) cuyo valor máximo es 100. Por otro lado, la apariencia de color de una luz artificial se refiere al color aparente (cromaticidad) de la luz emitida y es medida por su temperatura de color correlacionada (T_C).

El flicker o parpadeo en una luz artificial puede ocasionar distracción en el trabajador y efectos fisiológicos negativos como el dolor de cabeza (British Standards Institution 2021). CIE Standard (2004) indica que los criterios para obtener confort visual en el diseño de la luz natural son evitar interiores oscuros y procurar proveer las formas y tamaños adecuadas de ventanas para mantener el contacto con el exterior.

Los centros comerciales son inmuebles que aumentan considerablemente en la ZMCM, los cuales destinan el 90 % de su consumo energético anual en sistemas de iluminación artificial y climatización. Los sistemas pasivos son estrategias que pueden reducir el consumo energético, como es a través del almacenamiento o retención de la energía térmica (masa térmica); y la absorción o emisión de la radiación solar (superficie). Las estrategias de diseño deben considerar los parámetros para determinar un ambiente térmico y lumínico adecuado para un edificio de uso comercial. La fórmula de Auliciems es una herramienta de diseño apropiada para determinar los rangos de confort térmico mensual y/o anual (ver *Tabla 2*), pues considera los 6 parámetros básicos establecidos por Parsons (2014) y la norma ANSI/ASHRAE 55:2017 (2017). USGBC (2022) proporciona los niveles de iluminancia recomendado para edificios de uso comercial (entre 300 y 3,000 lux (ver *Tabla 3*)), además, debe considerarse posibles deslumbramientos, contrastes y la dirección de la luz. En consecuencia, las acciones óptimas, para aminorar el consumo energético de un edificio de uso comercial, deben basarse en rangos de confort térmico y lumínico, establecidos por especialistas en el tema (como Auliciems y la organización USGBC), que ayuden a tomar la decisión correcta.

CAPÍTULO 2.

Materiales aislantes translúcidos

“Hoy en día, el uso de materiales de construcción sostenibles es fundamental en el diseño y la construcción de nuevos edificios [...].”

Birdair (2021b)

La eficiencia energética es un tema de vanguardia en la construcción, debido a la alta demanda energética y el cambio climático. Los diversos productos, materiales y métodos de instalación son alternativas que generan un interés en aumentar el rendimiento energético. Las propiedades térmicas y lumínicas de los materiales aislantes translúcidos dependen del material, su estructura, su espesor, su calidad y uniformidad.

Los materiales aislantes translúcidos transmiten menor energía térmica en comparación de un material convencional, sin comprometer la transmisión de la luz natural. Los autores Wong, Eams y Perera (2007) elaboraron una clasificación de materiales aislantes translúcidos por medio de la capacidad de absorción de radiación solar en la estructura del material. El entendimiento y la selección adecuada de los materiales, para una construcción en específico, depende del conocimiento de las propiedades térmicas y ópticas.

El ser humano se caracteriza por utilizar una gran cantidad de recursos, incluso los no renovables, dejando rastros de contaminación en el proceso. Durante el siglo pasado, el uso de materiales aumentó ocho veces, lo que da un total de 60 mil millones de toneladas de materiales utilizados por año (Fernando Pacheco-Torgal y Labrincha 2013). A pesar de lo anterior, la investigación sobre materiales de construcción todavía prioriza sus propiedades mecánicas, en lugar de las consideraciones ambientales.

La cuarta revolución industrial (Industria 4.0) permite elaborar procesos de producción por medio de la digitalización, debido a la introducción de las Tecnologías de la Información e Internet de las cosas, y la aplicación de nuevos materiales. La nanotecnología es una de sus tecnologías que influyen en el área de los materiales de construcción, por su gran potencial para diversas aplicaciones y desarrollos. De acuerdo con U.S. National Nanotechnology Initiative (NNI), la nanotecnología es la comprensión, control y reestructuración de la materia a una escala nanométrica (es decir, dimensiones menores a 100 nm), para crear materiales con nuevas propiedades y funciones (Hu 2015; ATIGA 2016).

La aplicación de la nanotecnología tiene diversas contribuciones en la industria de la construcción, como es la optimización de productos existentes o materiales convencionales, protección contra daños, disminución del peso y/o volumen, reducción en el número de etapas de producción y una mayor eficiencia en el uso de materiales. Por lo anterior, la creación de nanomateriales “representa un alejamiento del catálogo de materiales convencionales” (Hu 2015).

ASHRAE (2011), en el documento *Advanced Energy Design Guide for Medium to Big Box Retail Buildings*, destaca la importancia de utilizar materiales locales disponibles, reutilizados o apropiados (este último, en caso de no utilizar materiales convencionales) para cumplir con los requisitos de rendimiento para cada una de las medidas de conservación de energía, estrategias de control y la intención de diseño. La nanotecnología tiene la posibilidad de diseñar materiales personalizados con propiedades individuales específicas para problemas concretos, con el empleo de una menor cantidad de materia prima y energía (Hu 2015). Por lo anterior, Jones, Gibb, Goodier, Bust, Song y Jin (2019) mencionan la importancia de comprender a profundidad los riesgos y beneficios de los diversos nanomateriales disponibles en el mercado, para tomar una decisión informada, inteligente y segura.

2.1 Materiales aislantes y la crisis energética

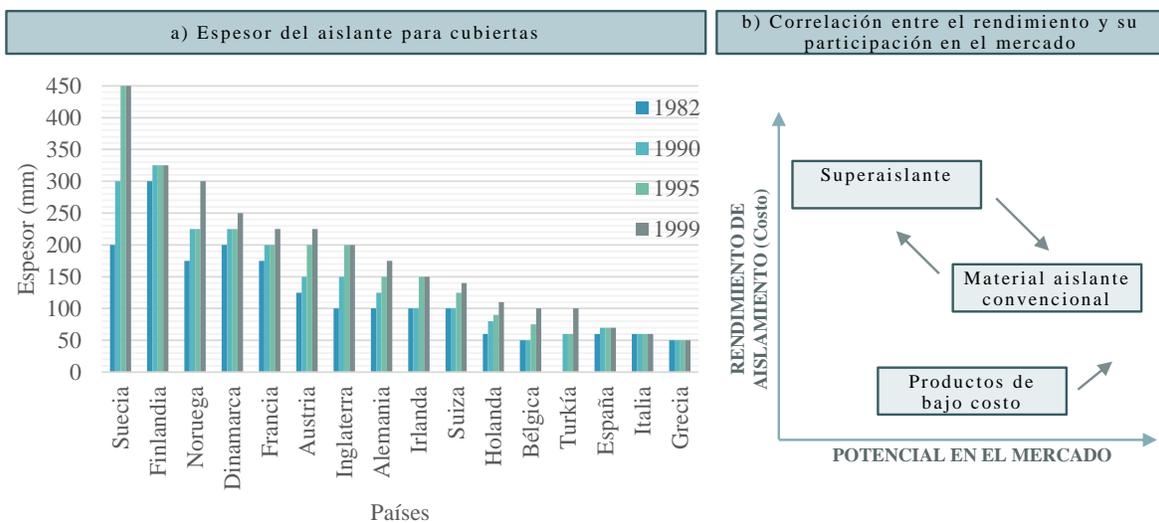
El calentamiento global y las emisiones de gases de efecto invernadero, emanadas por la construcción, son un problema mundial que debemos considerar. *Los límites del crecimiento* es un informe publicado en 1972 que concluyó lo siguiente: “si el actual incremento de la población mundial, la industrialización, la contaminación, la producción de alimentos y la explotación de los recursos naturales se mantiene sin variación, alcanzará los límites absolutos de crecimiento en la Tierra durante los próximos cien años” (Meadows, Randers, y Meadows 2017). Sin embargo, dicha iniciativa disminuye su impacto cuando se utilizan técnicas arcaicas, mal evolucionadas y poco adaptadas para las construcciones con necesidades actuales (Alonso et al. 2013; Groesser, Ulli-Ber, y Mojtahedzadeh 2006).

La construcción de un edificio sustentable es posible con el uso eficiente de la energía, los recursos naturales y los materiales, para utilizar menos recursos y aminorar el impacto ambiental (Vanegas Useche y Arias Maya 2004). Los nanomateriales con propiedades de aislamiento térmico son considerados necesarios para una construcción ecoeficiente, por su potencial en el ahorro energético y mayor efectividad que los materiales convencionales (Fernando Pacheco-Torgal y Labrincha 2013; Jones et al. 2019; Pagliaro, Ciriminna, y Palmisano 2009). Dichos materiales tienen la capacidad de no transmitir con facilidad la energía térmica almacenada, por lo que se emplean elementos con valores de conductividad bajos, como el aire y la madera, para elaborar nuevos nanoproductos (Atawa H, Al-Kattan, y Elwan 2015; Cromer 1996).

Los materiales aislantes transparentes o translúcidos (como el nanogel de sílice) tienen un gran potencial en la construcción de ventanas de alta eficiencia energética, pues la mayoría de las pérdidas de energía en un edificio ocurren a través de los vanos (Jelle et al. 2012). Por su lado, Huang y Niu (2015) confirmaron un ahorro energético, en sistemas de climatización, de hasta 20-30 % en nuevas construcciones de uso comercial, con la aplicación de tecnologías como materiales aislantes, ventanas de baja emisividad, voladizos en ventanas y dispositivos de control de luz natural. Por consiguiente, un uso adecuado de los materiales aislantes en la construcción permite disminuir la alta demanda energética y a su vez, proveer confort térmico y lumínico en los usuarios (Kneifel 2010; Huang y Niu 2015; Alonso et al. 2013).

2.2 Productos comerciales en el mundo

Actualmente, la nanotecnología tiene la posibilidad de desarrollar aislantes térmicos de alto desempeño, es decir, materiales con una conductividad térmica (valor k) de 0.004 a 0.014 W/m \cdot °K (vatios por metro Kelvin) (Baetens 2013). El valor k es una constante que determina la capacidad de transmitir energía térmica a través del material (Cromer 1996). Por su parte, Papadopoulos (2005) elaboró una investigación de la evolución de los aislantes aplicados en cubiertas de países europeos desde principios de los ochentas. La *Gráfica 3, a* muestra que países al norte de Europa, como en Suecia, el incremento en la demanda de aislantes se duplicó durante este periodo; mientras que, en Grecia ocurre lo contrario.



Gráfica 3. a) Evolución del espesor del aislante para cubiertas en Europa y b) correlación entre el rendimiento, costo y su participación en el mercado en el sector de materiales aislantes. Elaboración propia con datos obtenidos de (Papadopoulos 2005).

Asimismo, el mismo autor representó la comparación de tres tipos diferentes de productos de aislamiento con respecto al rendimiento, costo y su participación de mercado (ver *Gráfica 3, b*). Los materiales aislantes convencionales tienen el mayor potencial en el mercado, pues ofrece un mayor rendimiento por costo unitario. Sin embargo, se estima que su costo aumentará ligeramente y su potencial en el mercado se reducirá en un futuro cercano. Los productos de bajo costo presentan un rendimiento y durabilidad deficientes y se predice que su situación actual no cambiará. Por otro lado, Cuce E., Cuce P., Wood, Riffat (2014) y Baetens (2013) estiman que los materiales *superaislantes* (como el aerogel) predominarán en un futuro cercano el mercado a nivel mundial, por su alto desempeño, sus características físicas y la continua disminución de costos en su producción.

2.3 Clasificación de materiales aislantes

Según Papadopoulos (2005), los materiales aislantes se pueden clasificar por su estructura química y física. Por lo tanto, el autor elaboró la agrupación a partir de los materiales disponibles en el mercado europeo durante el 2005, con la investigación de 250 compañías que contribuyen en el mercado, de los cuales 9 representan el 55 % del total de la producción anual (ver *Figura 7*). La clasificación se define en dos grupos principales, la primera son los materiales inorgánicos, compuestos por elementos de espuma o fibrosos; y el segundo son los materiales orgánicos, compuestos por elementos de espuma, fibroso expandido o fibroso, los cuales representan el 60 y 27 % de disponibilidad en el mercado. Los materiales combinados y de nueva tecnología son grupos secundarios que representan el 13 % restante.

CLASIFICACIÓN DE MATERIALES AISLANTES				
MATERIALES INORGÁNICOS		MATERIALES ORGÁNICOS		
ESPUMA	FIBROSO	ESPUMA	FIBROSO EXPANDIDO	FIBROSO
<ul style="list-style-type: none"> • Espuma de vidrio 	<ul style="list-style-type: none"> • Lana de vidrio • Lana de piedra 	<ul style="list-style-type: none"> • Poliestireno expandido • Poliestireno extruido • Espuma de poliuretano 	<ul style="list-style-type: none"> • Corcho • Espuma de melamina • Espuma de fenol 	<ul style="list-style-type: none"> • Lana de oveja • Algodón • Fibra de coco • Celulosa
MATERIALES COMBINADOS			MATERIALES DE NUEVA TECNOLOGÍA	
CALCIO SILICONADO	ESPUMA DE GYOSIUM	LANA DE MADERA	TRANSPARENTES	DINÁMICOS

Figura 7. Clasificación de materiales aislantes disponibles en el mercado europeo. Elaboración propia con datos obtenidos de Papadopoulos (2005).

Los materiales aislantes translúcidos (TIM's) se producen con elementos como el plástico, vidrio y aerogel. Wong Eames y Perera (2007) sistematizaron los materiales en cuatro maneras de absorber la radiación solar (ver *Figura 8*). La *absorción paralela* (*Figura 8, 1*) consiste en materiales de múltiples capas de vidrio, polímeros o metilmetacrilato. La categoría de *absorción perpendicular* (*Figura 8, 2*) se presenta en tres tipos de estructuras, el primero es el panel (elaborados con vidrio, polietersulfona, poliester carbonato, entre otros); el segundo es el capilar (elaborados con vidrio y policarbonato); y el tercer tipo son los paralelos y soleras en V (elaborados con vidrio y teflón FEP). La *absorción por cavidades* (*Figura 8, 3*) se refiere a la combinación de los dos grupos anteriores. Por último, la *absorción cuasihomogénea* (*Figura 8, 4*) contiene materiales de estructura porosa, como la fibra de vidrio, el xerogel y aerogel. Éste último tiene diferentes formatos comerciales disponibles, como son el monolito (en lámina o bloque sólido), granular (partículas o polvo) y manta en rollo o panel (rígido o semirrígido).

Los países de producción del aerogel son Australia, Suecia, Alemania, Rusia, Japón, China y Estados Unidos de América (Casini 2016; Buratti y Moretti 2011).

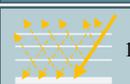
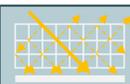
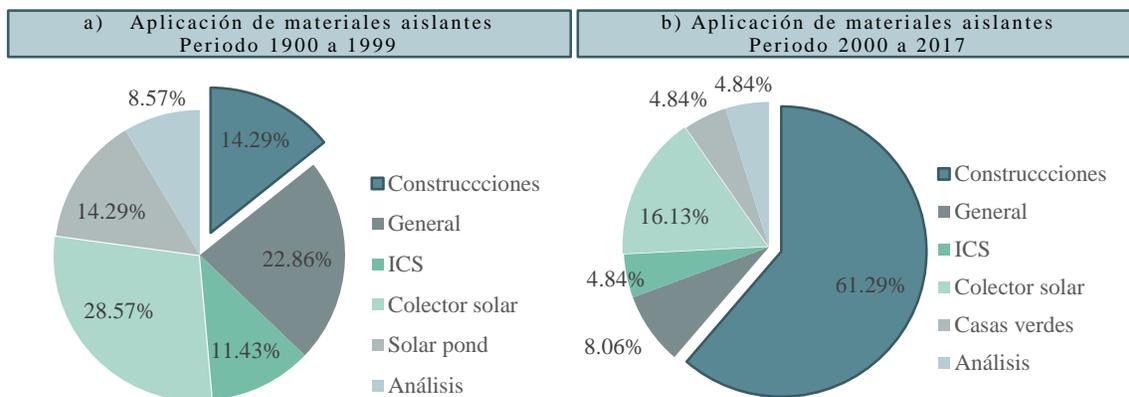
CLASIFICACIÓN DE MATERIALES AISLANTES TRANSLÚCIDOS				
 1. ABSORCIÓN PARALELA		 2. ABSORCIÓN PERPENDICULAR		
MÚLTIPLES CAPAS	SOLERA	ESTRUCTURA DE PANAL	CAPILARES	PARALELOS Y SOLERAS EN V
• Vidrio • Polímero	• Metilmetacrilato	• Vidrio • Poliestercarbonato • Polimetilmetacrilato • Policarbonato • Politetrafluoetileno • Polietileno • Polipropileno • Triacetato de celulosa	• Vidrio • Policarbonato	• Vidrio • Teflón etileno propileno fluorado (FEP)
<i>UNA HOJA – Promueve pérdidas de calor por convección y radiación (mecanismos de transferencia térmica)</i>		<i>Promueve pérdidas de calor por radiación y conducción a través del aire y sólidos (mecanismos de transferencia térmica). Eliminación de convección.</i>		
<i>“n” HOJAS – Promueve pérdidas de calor por radiación y conducción a través del aire (mecanismos de transferencia térmica). Eliminación de convección.</i>		<i>Promueve pérdidas de calor por radiación y conducción a través del aire y sólidos (mecanismos de transferencia térmica). Eliminación de convección.</i>		
 3. ABSORCIÓN POR CAVIDADES		 4. ABSORCIÓN CUASIHOMOGÉNEA		
ESPUMA TRANSLUCIDA	PLACAS DE CONDUCTOS MULTICANAL	AEROGEL GRANULAR	AEROGEL MONOLÍTICO	XEROGEL
• Acrílico		• Sílice	• Sílice	• Sílice
<i>Eliminación eficaz de la transferencia de calor por convección</i>		FIBRA	<i>Reduce pérdidas de calor por radiación y conducción a través del aire y sólidos (mecanismos de transferencia térmica).</i>	
		• Vidrio		

Figura 8. Tipos de estructuras de los materiales aislantes translúcidos disponibles en el mercado, basados en la pérdida de calor. Elaboración propia con datos obtenidos de Paneri, Wong, y Burek (2019).

Entre 1900 y 1999, los TIM’s aplicados en la construcción representaban el 14.29 % de la producción total (ver *Gráfica 4, a*). Sin embargo, la producción de los TIM’s aumentó considerablemente durante los siguientes 17 años, debido a los avances tecnológicos que han permitido producir sistemas con un valor U menor a $1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°K}$, transmisión de luz natural mayor al 50 % y costos reducidos (ver *Gráfica 4, b*) (Paneri, Wong, y Burek 2019).

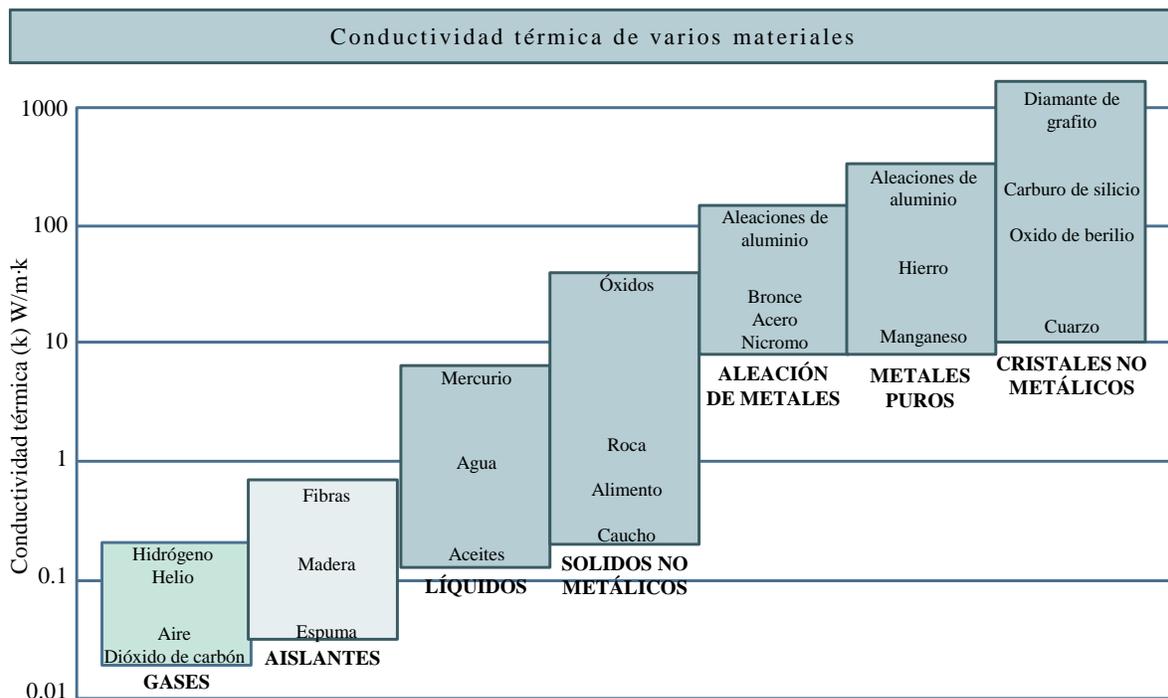


Gráfica 4. a) Porcentaje de aplicación de materiales aislantes translúcidos en diferentes áreas de 1900-1999 y b) del 2000-2017. Elaboración propia con datos obtenidos de Paneri, Wong, y Burek (2019).

2.4 Propiedades térmicas

Las características térmicas de un material se determinan por su reacción ante estímulos provocados por el calor (energía que modifica la temperatura de un cuerpo por el movimiento de sus moléculas), consideradas como un parámetro de rendimiento en espacios interiores (Yunus A. y Afshin J. 2015). Algunas propiedades térmicas son la conductividad térmica, el calor específico, la resistencia térmica, el coeficiente de transferencia de calor, la capacidad calorífica y la difusividad térmica.

La *conductividad o conductancia térmica* (valor k) se refiere como la razón de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura, y sus unidades son $W/m \cdot ^\circ K$. La *Gráfica 5* muestra el rango de conductividad térmica de los materiales aislantes en comparación a materiales de varias categorías. Por el contrario, la *resistencia térmica* (valor R) se refiere a la oposición del flujo de calor, lo que ocasiona una desaceleración en el proceso de transferencia, y se representa como $R_t = \frac{1}{k} (m^2 \cdot K/W)$, donde R_t representa la suma de las resistencias individuales de cada material que constituye un elemento, es decir $R_t = R_1 + \dots + R_n = \frac{L_1}{k_1} + \dots + \frac{L_n}{k_n}$ (Yunus A. y Afshin J. 2015; Fuentes Freixanet 1984).



Gráfica 5. Rango de conductividad térmica de varios materiales a temperatura ambiente. Elaboración propia con datos obtenidos de Yunus A. y Afshin J. (2015).

El *calor específico* (C_p) es “la energía requerida para elevar la temperatura de una unidad de masa de una sustancia en un grado, de una manera específica” y sus unidades son $\text{kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$ (Yunus A. y Afshin J. 2015). El *coeficiente de transferencia de calor* (valor U) es “la capacidad del material para resistir el flujo de calor por unidad de tiempo y superficie entre un material que separa dos espacios con una diferencia de temperatura de más de 1°C ” y su unidad es $\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{K}$ (Guillén Guillén et al. 2018). También conocido como coeficiente de transmisión o transmitancia térmicas.

La *capacidad calorífica* representa la cantidad de calor necesaria para elevar un grado Celsius la temperatura de un cuerpo determinado de masa y se expresa como $C_c = m_c \cdot c_{pc}$, donde C_c representa la capacidad calorífica, m_c la masa y c_{pc} el calor específico del cuerpo. Por último, la *difusividad térmica* es la relación entre el calor conducido a través del material y el calor almacenado por unidad de volumen, se representa como $a = \frac{\text{calor conducido}}{\text{calor almacenado}} = \frac{k}{\rho c_p}$ (m^2/s) y cuanto mayor sea el valor, más rápida será la transferencia de calor al medio (Garduño 2003; Serra y Coch 1991; Yunus y Afshin 2015).

2.5 Propiedades ópticas

Las propiedades ópticas de los TIM's dependen del material, su estructura, espesor, calidad, uniformidad, la longitud de onda, la radiación incidente y el ángulo de incidencia de los rayos solares (Wigginton 2002). Éste último permite regular la intensidad de la radiación solar y la capacidad del material para reflejar una parte de la radiación solar al exterior, absorber otra parte hacia su estructura (una porción se reenvía al exterior y la restante al interior) y transmitir la luz incidente al interior del espacio (ver *Figura 9*) (Dietz 1979). Algunas características ópticas se determinan a partir de los coeficientes anteriores, como el coeficiente de ganancia solar (también conocido como factor solar), el coeficiente de sombra, la selectividad y el índice de reproducción de color.

El *coeficiente de ganancia solar o factor solar* (SHGC o valor G) representa la fracción de radiación solar incidente que se logra transmitir y absorber (porción reenviada al interior) a través del material, en una escala de 0-1 o 0-100 (Martín Monroy 2006; Carlos y Corvacho 2015; Flores Larsen et al. 2010). El *coeficiente de sombra* (SC) es el factor entre el valor G de una composición de acristalamiento y el valor G de un vidrio monolítico de 3 a 4 mm (0.87).

Cabe destacar que cuando más bajo es el coeficiente, menor es la ganancia de calor y mayor la sombra ofrecida. La *selectividad* es el coeficiente entre el factor de transmisión y el valor G, por lo que un valor mayor a 2 permite la entrada del doble de luz natural que de calor al interior. Por último, el *índice de reproducción del color* es la capacidad para mantener los colores visualizados a través del material, en una escala de 1 a 100 (Saint-Gobain 2021).

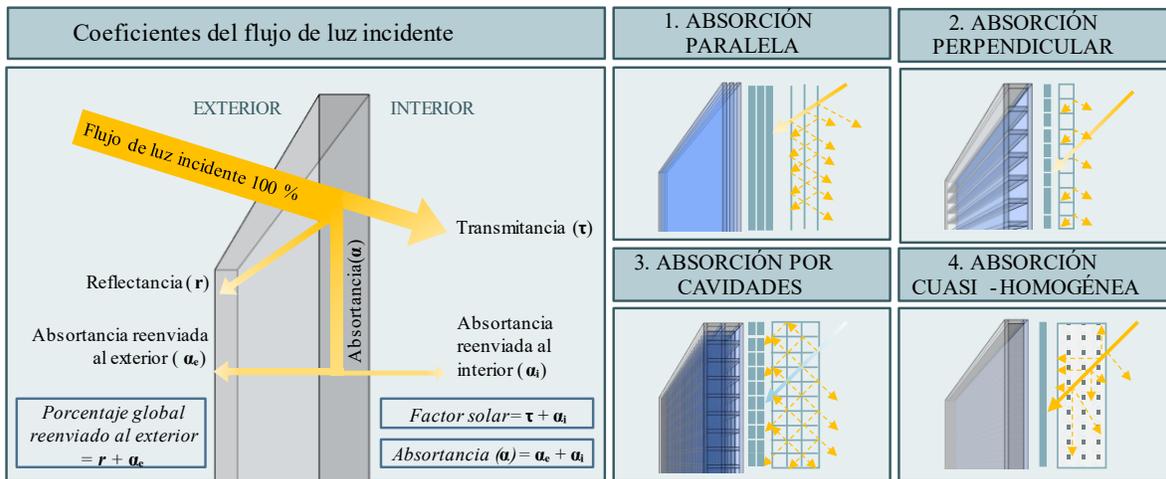


Figura 9. Comportamiento de la radiación solar a través de un acristalamiento y su clasificación según la estructura del material. Elaboración propia con datos obtenidos de Paneri, Wong, y Burek (2019); Saint-Gobain (2021); Martín Monroy (2006).

La estructura de un TIM tiene la característica de absorber la radiación solar de manera perpendicular, paralela, por cavidad o cuasihomogénea y transmitir la luz natural un 45 a 80 % al interior de un espacio, con una reducción aproximada del 8 % por cada capa utilizada. La *absorción paralela* consiste en materiales de múltiples capas que reflejan la radiación solar en cada superficie, lo que ocasiona una pérdida de luz natural por reflexión en cada capa y una menor transmisión en el interior (*Figura 9, 1*). La *absorción perpendicular* se refiere a materiales con estructura de superficies perpendiculares, lo que disminuye las pérdidas de luz natural por reflexión al exterior y aumenta la transmisión al interior (*Figura 9, 2*). La absorción por cavidades integra las dos categorías anteriores, por lo tanto, reduce considerablemente la transmisión de luz natural al interior (*Figura 9, 3*). La absorción *cuasihomogénea* son materiales de estructura porosa que se caracteriza por absorber y transmitir de manera uniforme la radiación solar, lo que permite reducir deslumbramientos y altos contrastes de luz en el interior (*Figura 9, 4*) (Sun, Wilson, y Wu 2018; Paneri, Wong, y Burek 2019; CEI, IDAE y CSCAE 2005; Zeevaert Alcántara 2020).

2.6 Selección de materiales aislantes translúcidos

En el área de materiales, los indicadores son datos e información que permite obtener un valor objetivo de las características y la intensidad de un material, con la finalidad de determinar la selección adecuada a requerimientos particulares. Lechner (2015) señala la importancia de elegir el material de acristalamiento adecuado para un diseño de iluminación diurna exitosa. Wong, Eames y Perera (2007), Atawa, Al-Kattan y Elwan (2015), Dowson et al. (2011) y Orlov et al. (1998) mencionan que el entendimiento y la selección adecuada de los materiales, para una construcción en específico, depende del conocimiento de las propiedades térmicas y ópticas.

Papadopoulos (2005) propone cuatro criterios para evaluar el rendimiento de los materiales aislantes (ver *Figura 10*), el primero describe las propiedades físicas de los materiales propuestos, los cuales pueden tener certificaciones; el segundo analiza las propiedades que intervienen en la salud del ser humano y el medio ambiente; el tercero se refiere a la aplicación del material para la solución de problemas estructurales o su integración específica en la construcción; y el cuarto considera los costos en relación a los parámetros previos.

RENDIMIENTO DE LOS MATERIALES AISLANTES			
1. PROPIEDADES FÍSICAS		2. IMPACTO AMBIENTAL	
COMPORTAMIENTO	CERTIFICACIONES	MEDIO AMBIENTE	SALUD PÚBLICA
Describen el comportamiento del material, como: <ul style="list-style-type: none"> • densidad, • resistencia mecánica, • capacidad de aislamiento térmico, • absorción acústica, • resistencia a la humedad y al fuego, • entre otras. 	Normas específicas y directivas de aplicación internacional como: <ul style="list-style-type: none"> • EN ISO 6946, EN 13162, • EN 13163, EN 13164, • BS 476, 89/106 / EC, • entre otras. 	Describe criterios como: <ul style="list-style-type: none"> • energía primaria incorporada, • emisiones de gases durante su producción, • uso de aditivos contra impactos biológicos, • Clasificación de residuo, • reutilización y reciclabilidad • impacto ambiental 	Factores que se ocupan de la salud pública (como emisiones de polvo y fibras, biopersistencia, toxicidad en caso de incendio, etc.), durante su: <ul style="list-style-type: none"> • Producción • Etapa de uso • Etapa final de disposición del material
3. APLICABILIDAD	4. COSTO	CERTIFICACIONES	
Identificar la aplicabilidad del material en elementos de construcción y la solución de problemas estructurales.	Identificar los costos en función de los parámetros antes mencionados	Normas basadas en el enfoque de Análisis del Ciclo de Vida: <ul style="list-style-type: none"> • ISO 14025-00 	

Figura 10. Criterios de evaluación para el rendimiento de los materiales aislantes. Elaboración propia con datos obtenidos de Papadopoulos (2005).

Las propiedades físicas de un solo tipo de material varían significativamente según la aplicación específica, lo que determina el tipo de material que se debe utilizar. Cabe destacar que las propiedades físicas es el indicador más empleado y el impacto ambiental es el menos utilizado, para evaluar el comportamiento de los materiales aislantes y fijar objetivos para su futuro desarrollo (Papadopoulos 2005).

2.6.1 Evaluación del desempeño térmico.

El desempeño de un material se refiere al cumplimiento de las funciones para las que fue diseñado dentro de parámetros técnicos, económicos y sociales, con base en la relación de las propiedades, la composición y estructura (desde la escala nano y micro), y el proceso de obtención (Vélez Restrepo y Jaramillo 2014). Dicha visión integral de la ciencia y la ingeniería de materiales es considerada una herramienta en el proceso de selección y diseño de materiales (Department of Trade and Industry 2006).

Dowson (2011) menciona que se deben considerar materiales que combinan el valor U más bajo, el valor G y la transmisión más alta para minimizar la ganancia térmica sin bloquear la entrada de luz natural. Guillén, Muciño, Santa Ana y Verduzco (2018) señalan la relevancia de incorporar la difusividad térmica como unidad de análisis para la selección de materiales aislantes. Papadopoulos (2005) determinó los siguientes objetivos que se deben considerar para evaluar el desempeño térmico de materiales aislantes:

- Evaluar los materiales propuestos para alcanzar un valor U determinado de una construcción específica.
- Evaluar las mejoras perceptibles, medibles y definibles de los materiales propuestos en comparación a su última generación o de la competencia, que presenten el mismo desempeño del objetivo anterior y una aplicabilidad en la construcción similar.
- Evaluar los costos de los materiales propuestos con respecto a los materiales de la competencia.

Es importante mencionar que la evaluación anterior debe considerar una conductividad térmica determinada para los materiales propuestos e indicar criterios absolutos para todos los parámetros relacionados, con la evaluación de cada tipo o forma de material (Papadopoulos 2005). Por su parte, Baetens (2013) menciona un conjunto de tres criterios funcionales que un material aislante requiere en una construcción. El primero es la baja conductividad térmica (k). El segundo es la resistencia a la degradación por radiación solar, humedad e impacto mecánico a través del tiempo. El tercero es la facilidad de instalación y la viabilidad económica. Por lo tanto, la caracterización y evaluación de los materiales son acciones valiosas para la toma de decisiones. Éste último puede ser un proceso complicado por la recopilación de información, sin embargo, una adecuada selección requiere de conocer el objetivo principal del proyecto y profundizar en el tema.

2.6.2 Evaluación del desempeño lumínico.

En el diseño lumínico, las decisiones que se toman en el proceso conceptual afectan la calidad y cantidad de luz, costos, vistas, ganancias térmicas y el uso de energía eléctrica. La selección adecuada y evaluación del acristalamiento en una construcción es un factor importante para aumentar la iluminación natural a niveles óptimos. La *Tabla 4* muestra los indicadores para evaluar los materiales propuestos en una construcción, durante los equinoccios de primavera y otoño y los solsticios de invierno y verano (a las 9, 12 y 15 horas). La iluminancia promedio es el indicador más empleado para mostrar el desempeño lumínico del material en una construcción, por la relación de la iluminancia disponible en el área de trabajo y la norma (Leslie, Radetsky, y Smith 2012).

Tabla 4. Criterios de evaluación para el desempeño lumínico de los materiales en una construcción.

INDICADOR	OBJETIVO	DATOS DE ENTRADA
Iluminación promedio	Proveer suficiente iluminación natural en el plano horizontal. La deficiencia dificulta la visibilidad y, en exceso, los deslumbramientos generan discomfort.	Cumplimiento de los requerimientos lumínicos mínimos, por normas nacionales o internacionales, durante el año.
Cobertura de iluminación	Evitar las áreas con poca iluminación y distribuir suficiente luz natural a través del área de trabajo. La falta de iluminación natural se genera con valor $\leq 80\%$.	Porcentaje del área de trabajo que recibe las condiciones de iluminación, con diferentes tipos de cielo.
Luz difusa	Controlar el deslumbramiento al minimizar la luz directa. Evitar la luz natural directa y aprovechar la luz difusa en áreas de trabajo.	Porcentaje de incidencia entre la radiación solar directa y el área de trabajo horizontal, durante el año.
Iluminación autónoma	Minimizar el uso de iluminación artificial para disminuir el consumo de energía eléctrica.	Porcentaje de puntos (resultado de la simulación) en el área de trabajo.
Sistema circadiano	Proveer la iluminación suficiente para estimular el sistema circadiano de los usuarios por la mañana.	CS_{prom} = calcular cada valor de iluminancia por los 12 datos (4 días/3 horas) simulados al año, para cielos despejados y nublados.
Área de la ventana	Minimizar el ventanaje para controlar los costos de la construcción.	Representar por porcentaje: área total de todos los vanos entre el área del piso.
Vistas al exterior	Permitir la conexión entre el usuario y el exterior.	Material transparente: Vistas al cielo y/o piso. Material translúcido: No existen vistas
Ganancias térmicas	Reducir la ganancia de energía térmica requerida al interior y aumentar el confort a través de la ventana.	Resultados de la simulación generados por software. Considerar solo si se utiliza como estrategia de diseño.

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de Leslie, Radetsky y Smith (2012).

Reim et al. (2005) establecen el coeficiente de transmitancia alto como indicador para evaluar el desempeño lumínico de un TIM y combinan el valor U bajo como complemento de la evaluación. Por su parte, Saint-Gobain (2021) indica que la adecuada selección es uno de los factores que determinan el rendimiento de los vidrios, por la correspondiente evaluación de la transmisión lumínica y la cantidad de luz natural que ingresa al interior del espacio (factor solar). Buratti y Moretti (2011) determinaron tres criterios (transmisión lumínica, factor solar y transmitancia térmica) para comparar el desempeño de TIM's y ventanas convencionales. Lo anterior indica los parámetros a considerar en el proceso de evaluación del desempeño térmico y lumínico, para seleccionar el TIM adecuado y cumplir con los objetivos específicos de cada proyecto.

Los vanos en las construcciones son elementos que tienen la menor resistencia térmica, lo que ocasiona un aumento en el consumo energético de sistemas de climatización e iluminación artificial. Existe una gran variedad de materiales que cumplen diferentes funciones, por lo que es importante evaluar sus propiedades térmicas y lumínicas para seleccionar el material adecuado. En el proceso de selección, es importante plantear los requisitos del proyecto para considerar los indicadores adecuados, proponer diversos materiales semejantes y comparar la evaluación de sus propiedades. El indicador más utilizado y apropiado para evaluar el rendimiento de materiales aislantes es la variedad de sus propiedades físicas, sin embargo, también es de gran interés comparar el impacto ambiental, su efectividad en la aplicabilidad y el costo. Para el desempeño térmico y lumínico, los criterios de selección más empleados son el valor U bajo, valor G y transmisión alto, para evaluar y comparar la ganancia térmica obtenida, iluminancia promedio, cobertura de iluminación, control de deslumbramientos con luz difusa, iluminación autónoma, estimulación del sistema circadiano, área de vanos y vistas al exterior. Los materiales de absorción cuasihomogénea (como el aerogel) tienen la capacidad de distribuir la iluminación natural de manera uniforme, evita deslumbramientos, altos contrastes de luz; además de controlar las ganancias/perdidas de calor y luz natural por su estructura porosa.

CAPÍTULO 3.

Instrumentos de medición para la envolvente del cerramiento arquitectónico

“La arquitectura es el juego sabio, correcto y magnifico de los volúmenes bajo la luz (...)”

Le Corbusier en 1920 (Benton 2007)

La radiación solar es un elemento climático que influye en diversos fenómenos al interaccionar con la atmósfera y la envolvente arquitectónica (Zeevaert Alcántara 2020; Ávila Ramírez y Arias Orozco 2015). La incidencia de la radiación solar en la superficie de los materiales de la envolvente arquitectónica, durante el día, produce aumento de temperatura y ganancias de calor en los espacios interiores. Por consiguiente, es importante que el arquitecto comprenda los factores ambientales que interactúan con la envolvente arquitectónica y su influencia en el espacio habitable.

En consecuencia, los modelos, de tipo gráficos, físicos, matemáticos o simulación, se han convertido en herramientas de diseño que permiten analizar el desempeño de un edificio bajo condiciones atmosféricas específicas. De acuerdo con Fuentes (1984), existen diferentes tipos de modelos que se ajustan a cualquier necesidad; como son los modelos gráficos, experimentales, matemáticos y de simulación por computadora.

La ZMCM tiene la mayor cantidad de demarcaciones territoriales y municipios en el país. La ZMCM está conformada por 76 demarcaciones, 16 alcaldías de la Ciudad de México (CDMX), 59 municipios del Estado de México y 1 del Estado de Hidalgo. El crecimiento desmedido e irregular de la mancha urbana en la ZMCM es el resultado de la diferencia entre las políticas de desarrollo urbano y el incremento poblacional y sus necesidades (económicas y productivos) (SEDATU, CONAPO e INEGI 2018).

La ZMCM está delimitada por elevaciones topográficas de origen volcánico, como la Sierra de Tepotztlán y Tezontlalpan (al norte), la Sierra Rio Frío y de Nevada (al oriente), la Sierra del Ajusco-Chichinauhtzin (al sur), la Sierra de las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo (al poniente). La *Figura 11* muestra las limitaciones de la ZMCM, la cual forma parte de la Cuenca del Valle de México, con el estado de Hidalgo en el norte, Tlaxcala y Puebla en el oriente, Morelos en el sur y la Cuenca del Panuco en el poniente.



Figura 11. Cartografía Geoestadística Urbana y Rural de la zona metropolitana de la CDMX. Elaboración propia con datos obtenidos de Gutiérrez Chong y Albarran Ramos (2018); SEDATU, CONAPO e INEGI (2018)s; Martínez Schulte y López Gutiérrez (2016).

3.1 La atmósfera y la radiación solar

De acuerdo con Pabón et al. (2001), la atmósfera es una capa gaseosa que envuelve a la superficie terrestre y se divide en cinco capas: la troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera y exosfera. La troposfera y estratosfera son las capas más importantes para entender el sistema climático y representan el 99 % de la masa total de la atmósfera. En la troposfera se presenta la mayor parte de los fenómenos meteorológicos, por contener una parte considerable de la masa atmosférica y de vapor de agua. En el caso de la estratosfera, se caracteriza por ser la capa que nos protege de la radiación ultravioleta (UV). La radiación solar es un factor externo (natural) que determina o modifica los elementos del clima (como son la temperatura, humedad, nubosidad, precipitación, presión atmosférica y viento) al interactuar con el tope de la atmósfera terrestre (Fuentes Freixanet 1984).

3.1.1 Atenuación de la radiación solar en su paso por la atmósfera.

Diversos elementos influyen en el proceso de atenuación de la radiación solar al atravesar la atmósfera terrestre (ver *Figura 12*). De acuerdo con García y Pilatowsky (2017), la radiación solar sufre procesos de extinción a través de las distintas capas atmosféricas, por diversos elementos como el ozono (O₃), moléculas de aire, aerosoles suspendidos en el aire (partículas sólidas o líquidas), nubes (gotas de agua y cristales de hielo) y vapor de agua (H₂O). La atenuación de la radiación solar por los elementos influye en la cantidad de energía solar disponible en la superficie terrestre.

Existen tres mecanismos de interacción entre la radiación solar y una partícula de la masa atmosférica (camino óptico recorrido por la radiación solar). La *dispersión* se presenta cuando la radiación solar incide en una molécula de aire o partículas suspendidas en la atmósfera, donde una parte es redirigida de manera aleatoria y otra es devuelta al espacio. La *absorción* sucede cuando la intensidad de la radiación cambia (disminuye) al interactuar con gases atmosféricos y se reemite en energía térmica. La atenuación más importante se presenta en el espectro ultravioleta (UV) e infrarrojo (IR). Por último, la *reflexión* ocurre cuando la radiación solar es absorbida y, posteriormente, reemitida con una trayectoria igual al ángulo de incidencia (Tejeda Martínez y Gómez Azpeitia 2015).

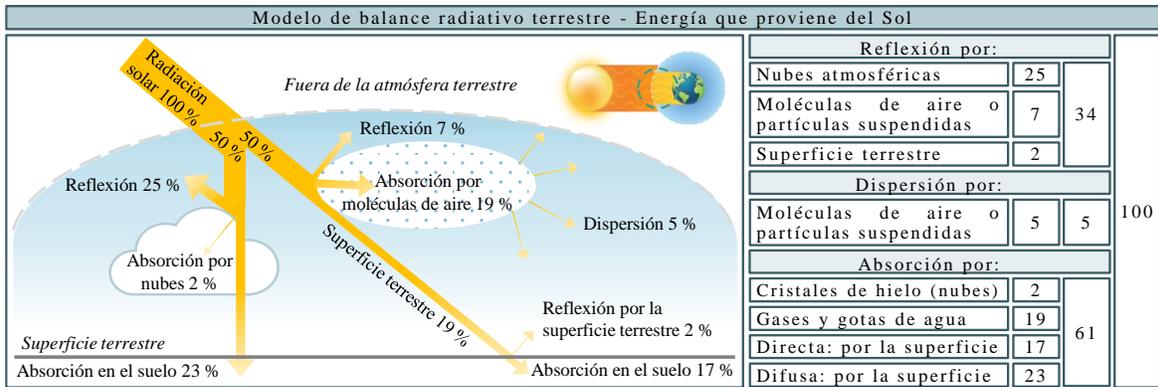


Figura 12. Paso y atenuación de la radiación solar incidente por la atmosfera terrestre. Modelo de balance radiativo terrestre. Elaboración propia con datos obtenidos de Gómez Mendoza (2014); Lira-Oliver (2017); Guadarrama Gándara (2017).

3.1.2 Tipos de radiación solar incidente.

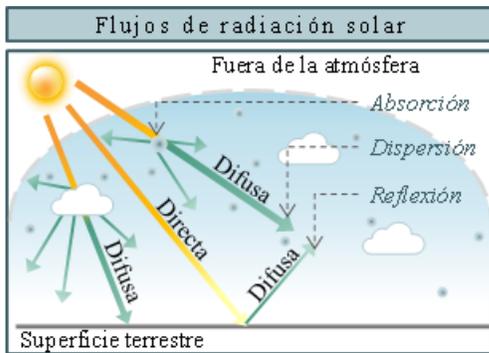


Figura 13. Tipos de flujos de radiación solar. Elaboración propia con datos obtenidos de Guadarrama Gándara (2017).

Los flujos de radiación solar son producto del proceso de atenuación de la radiación solar al atravesar la atmósfera e incidir en la superficie terrestre. Existen dos tipos de radiación solar incidente: directa, difusa o reflejada (ver Figura 13). La *radiación directa* es aquella que se recibe directamente del disco solar, sin sufrir cambios por los elementos de la masa atmosférica. La *radiación difusa o reflejada* es la parte dispersada por los elementos de la masa atmosférica, los aerosoles suspendidos en la atmósfera (turbiedad) y el albedo del suelo. La *radiación global* se considera como la sumatoria de las dos anteriores (Tejeda Martínez y Gómez Azpeitia 2015).

De acuerdo con Pattini (2006), la iluminancia se refiere al flujo luminoso incidente en una superficie, expresada en luxes (lx). En un espacio interior, la luz natural se clasifica en directa, indirecta y difusa. La *luz solar directa* es la porción de *radiación directa* que incide, a través de un vano, en un lugar específico y se caracteriza por ocasionar deslumbramientos, altos contrastes y aumentos de temperatura. La *luz solar indirecta* ocurre cuando la *radiación directa* incide al interior por reflexión en muros, pisos o techos, sin producir deslumbramientos y ganancias térmicas considerables. La *luz natural difusa* es la porción de *radiación difusa* que incide al interior con, aproximadamente, la misma intensidad. Por lo tanto, la iluminancia, en una superficie horizontal exterior no obstruida, caracteriza la luz natural disponible de un espacio interior.

3.1.3 Tipos de cielo.

De acuerdo con Kittler, Perez y Darula (1997), los parámetros para identificar el tipo de cielo son la cantidad y turbidez de la contaminación; las características de la cubierta nubosa; y el movimiento del Sol en la bóveda celeste, pues cambia con la posición del sol durante el día y la latitud del sitio. La cubierta nubosa se caracteriza por el tipo de nubes y cubierta, así como la distribución de las nubes en la bóveda celeste. Asimismo, el rango y la frecuencia de ocurrencia de los niveles de iluminancia de un lugar determinado son relevantes para determinar el tipo de cielo (ver *Figura 14*):

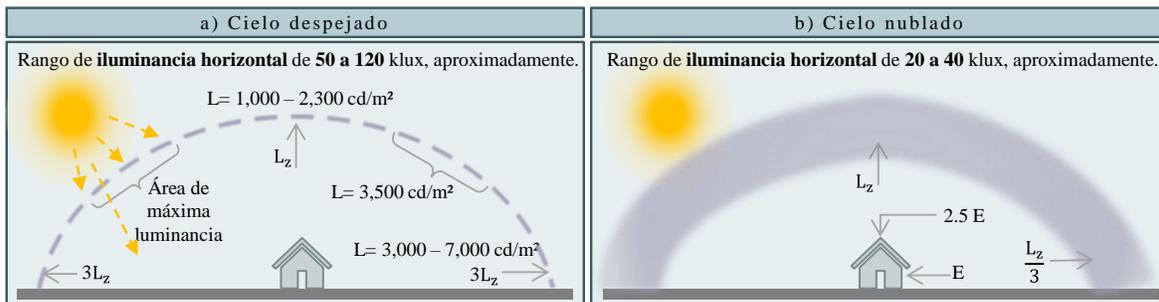


Figura 14. Condiciones de luminancia (L) en la bóveda celeste con un a) cielo despejado y b) nublado, en la CDMX. Elaboración propia con datos obtenidos de Muhammad (1983); Pattini (2006); Guadarrama Gándara (2020).

El *cielo despejado* se presenta cuando la cubierta nubosa cubre menos del 30 % de la bóveda celeste y su composición es la luz directa y difusa. La distribución de la iluminancia no es uniforme y tiende a ser 3 veces mayor en el horizonte que en el cenit. En la CDMX, los rangos de iluminancia horizontal son de 50 a 120 klx, aproximadamente (ver *Figura 15, a*).

En el *cielo parcialmente nublado*, la cubierta nubosa cubre del 30-70 % de la bóveda celeste. La distribución de la iluminancia proviene de la luz directa del sol y la reflejada por la superficie terrestre. Las nubes pueden variar de ligeras a densas y cubrir/descubrir el Sol en periodos cortos de tiempo, por lo tanto, la cantidad lumínica cambia rápida y constantemente. Los rangos lumínicos del presente tipo de cielo son complejos de ejemplificar, por lo que no existe un modelo sencillo (ver *Figura 15, b*).

El *cielo nublado* tiene más del 70 % de cubierta nubosa (nubosidad densa) y tiende a cambiar más lento que los anteriores. El cenit de un cielo nublado es 3 veces más luminoso que el horizonte, por ende, la distribución de la luminancia no es uniforme. La principal contribución de la iluminancia proviene del componente difuso. En la CDMX, el rango de iluminancia es de 20 a 40 klx, aproximadamente (ver *Figura 15, c*) (Pattini 2006; IES 2021).

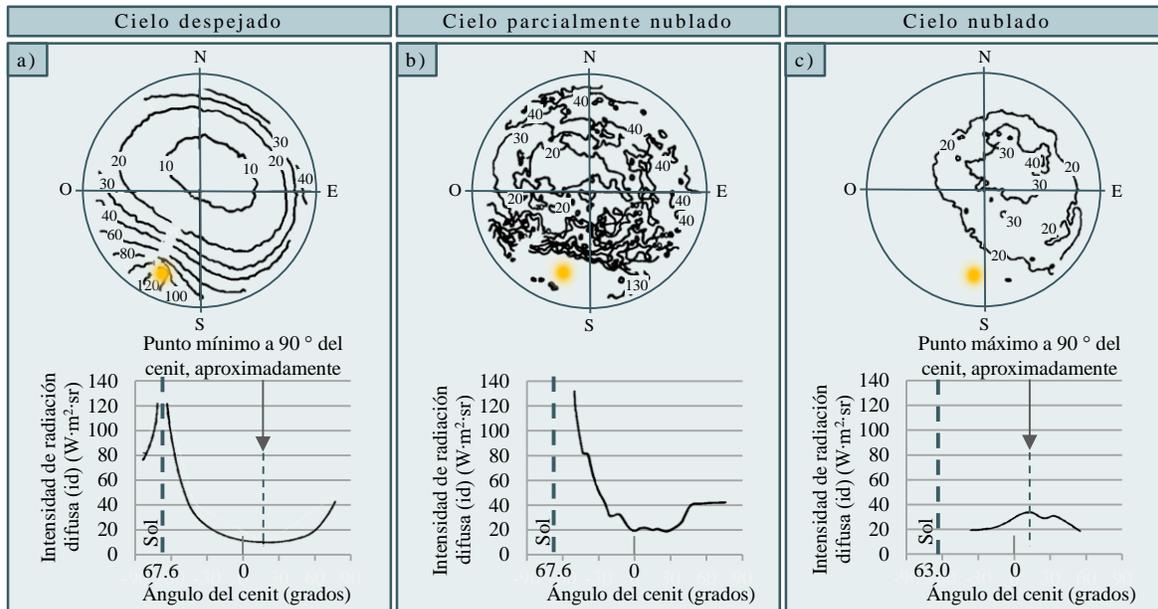


Figura 15. Variación angular de la intensidad de radiación difusa, en a) cielo despejado, b) parcialmente nublado y c) nublado. Elaboración propia con datos obtenidos de Muhammad (1983); Pattini (2006).

3.2 La radiación solar y el cerramiento arquitectónico

La luz natural transmitida al interior ha desempeñado un papel fundamental para revelar espacios y desarrollar nuestras actividades diurnas. La calidad y cantidad adecuada de iluminancia propicia el ahorro energético; resalta los elementos de un espacio con atmósferas particulares; crea sensación de bienestar (confort visual y térmico) y propicia la salud de las personas. Por lo tanto, las técnicas y formas de construir se deben modificar en función de factores que se relacionan con la radiación y el diseño de la envolvente arquitectónica, como la latitud, la topografía, el albedo, la orientación y los materiales (Arias Orozco y Ávila Ramírez 2004; Guadarrama Gándara y Bronfman Rubli 2016; Zeevaert Alcántara 2020).

3.2.1 Latitud y topografía

La latitud es un parámetro que determina la cantidad de radiación incidente en superficies horizontales y verticales durante las diferentes épocas del año; mientras que la topografía, influye en el efecto sobre la energía solar recibida y, posteriormente, emitida en radiación de onda larga. La cantidad de radiación directa recibida en un plano inclinado (terrenos con pendiente) depende del ángulo de incidencia de los rayos solares, es decir la posición del sol con respecto a la superficie (altura y azimut solar de la superficie), y la inclinación de la superficie con respecto al plano horizontal. En un terreno urbanizado (pavimentado), la superficie tiene una mayor oscilación térmica con respecto a un terreno natural, por la cantidad de energía solar absorbida y reemitida al ambiente en energía térmica.

En la CMDX (lat. 19.33°), la orientación e inclinación de una superficie con respecto a la horizontal son factores que determinan la cantidad de radiación solar directa incidente. En el solsticio de invierno (a las 12 h), un terreno con pendiente orientado hacia el sur, sureste o suroeste recibe una mayor cantidad de radiación que una superficie orientada al este, oeste y norte; mientras que, en el solsticio de verano, ocurre lo contrario. En las orientaciones anteriores, la radiación solar incidente se comporta de manera similar. En los equinoccios, los valores de radiación solar son intermedios entre las mediciones de los solsticios, evidenciando que una superficie con 30° de pendiente y orientación sur, suroeste o sureste es la más favorecida (Serra Florensa y Coch Roura 2001; Garduño 1998; Zeevaert Alcántara 2020).

3.2.2 Albedo.

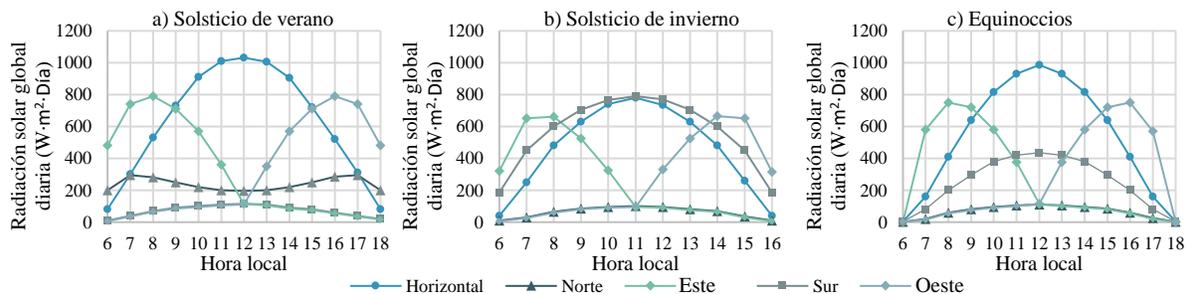
El albedo es la capacidad de un material de reflejar la radiación solar incidente en él. Por lo tanto, el ángulo de incidencia de la radiación solar es un factor que ocasiona la variación del albedo y se incrementa con ángulos agudos. El valor típico del albedo de la Tierra es del 30 % y su composición es la sumatoria del albedo de la superficie terrestre, la atmósfera y de las nubes. En el caso de los TIM's, como el PTFE, tienen un valor del albedo superior al 70 % por lo que son de alta reflectividad; mientras que en el aerogel ocurre lo contrario por su baja densidad, con un valor del 12 % (Villegas 1990; Buratti y Moretti 2011; Jiangsu VEIK Technology & Materials 2022).

El albedo puede tener un efecto considerable sobre la distribución de iluminancia, particularmente en grandes superficies interiores. Los factores que influyen en el albedo de una superficie son la blancura del color base, la rugosidad, su edad y el grado de suciedad. En un edificio, el techo y las paredes de color claro (albedo >70 %) aumentan la intensidad de luz natural más profundamente y reducen el contraste entre las ventanas brillantes y otras superficies (Garduño 1998; Zeevaert Alcántara 2020; Martín Monroy 2006; Lechner 2015; Cerdá 2019).

3.2.3 Orientación.

La orientación contribuye el 80 % en un diseño pasivo (Zeevaert Alcántara 2020). La orientación otorga los mejores resultados en invierno con estrategias de calefacción y en verano con estrategias de sombreado, debido a las ganancias solares o las ganancias/pérdidas de calor por ventilación. Este es una de las variables más importantes para obtener la cantidad de luz natural requerida al interior, pues considera la trayectoria del sol durante el año.

En la CDMX, durante el solsticio de invierno, la radiación solar incide con mayor intensidad en la superficie vertical orientada al sur y en el plano horizontal disminuye. En el solsticio de verano, la radiación solar aumenta considerablemente en el plano horizontal en comparación a las superficies verticales; y en los equinoccios, la superficie horizontal recibe el doble de radiación que el plano vertical orientado al sur (ver *Gráfica 6*). La iluminancia en una superficie horizontal exterior no obstruida es muy importante, por su influencia en la cantidad y grado de variación de luz natural disponible en un edificio. La iluminancia horizontal depende del sol, la bóveda celeste, las obstrucciones naturales (plantas, terreno, montañas) y artificiales (edificios y construcciones) del ambiente (Fuentes Freixanet 1984; Balcomb y Jones 1988; Pattini 2006; Zeevaert Alcántara 2020).



Gráfica 6. Radiación solar global diaria en un cielo despejado con 20 % de albedo, en la CDMX. Elaboración propia con datos obtenidos de Zeevaert Alcántara (2020).

3.2.4 Sistema envolvente.

La función principal de la envolvente arquitectónica, compuesta por materiales opacos, transparentes y/o translúcidos, es separar el medio ambiente exterior del interior. Por lo tanto, la superficie exterior de los materiales es el primer control en el flujo de la radiación solar. Es importante analizar los flujos de energía en la envolvente arquitectónica para controlar las condiciones térmicas y lumínicas en un espacio (Guillén Guillén et al. 2018).

Los *materiales opacos* de la envolvente arquitectónica tienen la característica de reflejar, absorber y/o transmitir la radiación solar de onda corta durante el día y, durante la noche, emite la radiación como onda larga al interior. La temperatura, en la superficie exterior del material, sufre un retraso y decremento antes de emitirse al interior. Este fenómeno depende de las propiedades térmicas de los materiales (conductividad, densidad y calor específico) y su espesor. A partir de las propiedades térmicas, se puede determinar la resistencia térmica, difusividad, efusividad y admitancia, los cuales definen la transferencia de calor y capacidad de almacenamiento térmico.

Los *materiales transparentes o translúcidos* tienen la característica de transmitir la mayor cantidad de radiación solar de onda corta al interior de un espacio y de absorber y reflejar la radiación solar de onda larga. La radiación de onda larga, transmitida a través del material, es almacenada al interior del espacio y, por lo tanto, la temperatura comienza a aumentar. Las propiedades ópticas-solares (reflexión, transmisión, absorción y refracción) dependen de la composición del material (como el espesor, la calidad, la transparencia, el color, etc.) y de las características de la radiación incidente (como la longitud de onda y el ángulo de incidencia) (Lechner 2015; Zeevaert Alcántara 2020; Wigginton 2002; Fuentes Freixanet 1984).

3.3 Instrumentos de medición

Debido a la complejidad de los fenómenos anteriores, es importante considerar la relación entre la radiación solar y el cerramiento arquitectónico. Los efectos producidos por el medio ambiente, en el cerramiento arquitectónico, pueden ser analizados con diversos métodos y técnicas, la adecuada aplicación de éstos permite tomar las acciones o cambios necesarios en el transcurso del estudio. Los instrumentos de investigación son la herramienta concreta y operativa que facilita la recolección de los datos.

Para la elaboración de instrumentos, el investigador necesita la claridad de los siguientes conceptos: el constructo teórico, la medición, la confiabilidad y validez. El constructo es un concepto medible a través de sus indicadores. La medición tiene como objetivo la relación entre los indicadores (respuestas observadas) y los conceptos (no observables). La confiabilidad se refiere a que un instrumento dará los mismos resultados a un objeto medido repetidamente. Por último, la validez depende del objetivo de la medición, la población y el contexto de aplicación, por lo que un instrumento es válido *para qué o en función de qué* (Messick 1993; Kerlinger y Howard 2002; Creswell 2009; Babbie 2016).

Para realizar mediciones, el diseño del instrumento se divide en cuatro fases. La primera consiste en las consideraciones teóricas, la definición de los objetivos y los conceptos. El segundo es someter a un juicio de expertos la primera redacción del instrumento para su validación. El tercero es la selección de la muestra para la prueba piloto y la administración del instrumento. Finalmente, el cuarto proceso es la validación para asegurar que la información obtenida sea válida y permita una efectiva toma de decisiones (Soriano Rodríguez 2014).

A continuación, se muestran diferentes modelos que se ajustan a distintas necesidades del investigador para recopilar información de la envolvente arquitectónica.

3.3.1 Modelos gráficos.

Los modelos gráficos son métodos de representación gráfica que describen información de un modelo real. Los arquitectos los utilizan con frecuencia los modelos gráficos por su practicidad y presentación clara, lo que facilita su interpretación, a pesar de no proporcionar información precisa o exacta. Los *diagramas solares de trayectoria y posición* son convenientes para el diseño, análisis y evaluación de sistemas y dispositivos de control, orientación y ubicación de los espacios, análisis de obstrucciones, entre otros. Los *diagramas solares energéticos* estiman de forma cuantitativa la energía solar (Fuentes Freixanet 1984). La *Figura 16* muestra la representación gráfica de los diferentes modelos gráficos, para el análisis lumínico de una envolvente arquitectónica.

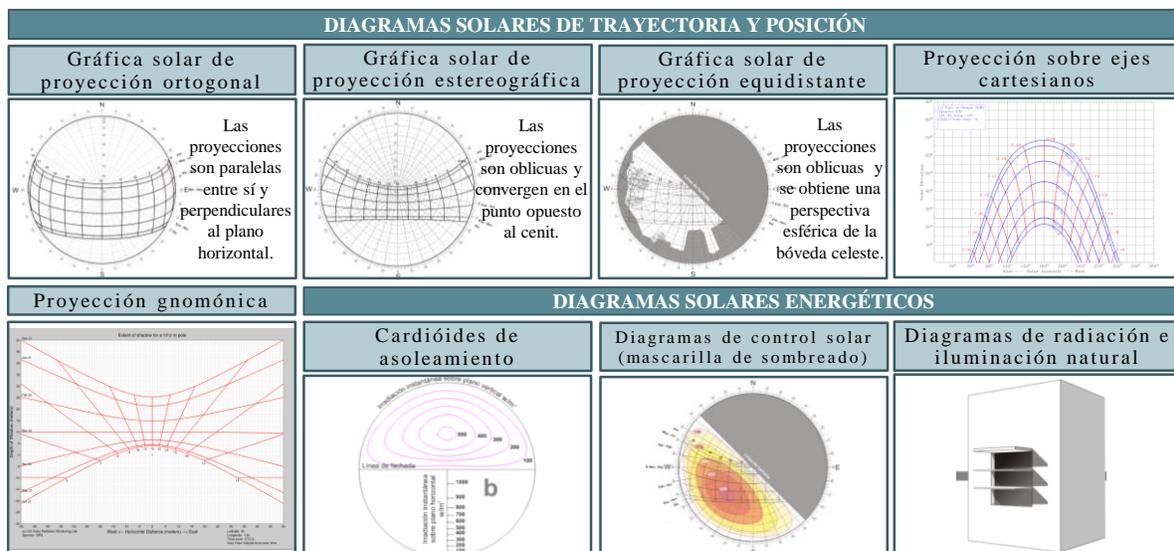


Figura 16. Representación gráfica de los diferentes modelos gráficos.
Elaboración propia con datos obtenidos de Tejeda Martínez y Gómez Azpeitia (2015) y UO (2022).

3.3.2 Modelos experimentales.

Dollens (2003) define a los modelos a escala como un modelo de comunicación (maquetas) de ideas y emociones, los cuales confinan un espacio por medio de formas, símbolos y materiales comunicativos. La maqueta es muy utilizada por los arquitectos para experimentar el proceso del proyecto arquitectónico, sin embargo, han adquirido una nueva aplicación. Según Meneses (2016), los modelos no pretenden ser una réplica de los edificios, sino áreas o espacios cuyo interés especial es el análisis de la incidencia de luz natural.

Los modelos a escala proporcionan una visión cuantitativa y cualitativa del desempeño del edificio, por medio de sistemas como proyección gnomónica, heliodón, helioscopio, termoheliodón, equipos de monitoreo en sitio o cajas adiabáticas móviles (ver *Figura 17*) (Fuentes Freixanet 1984). Para el análisis lumínico, el investigador Lechner (2015) recomienda utilizar el heliodón en modelos a escala durante el proceso de diseño, por la variedad de modelos y precios para cada necesidad.

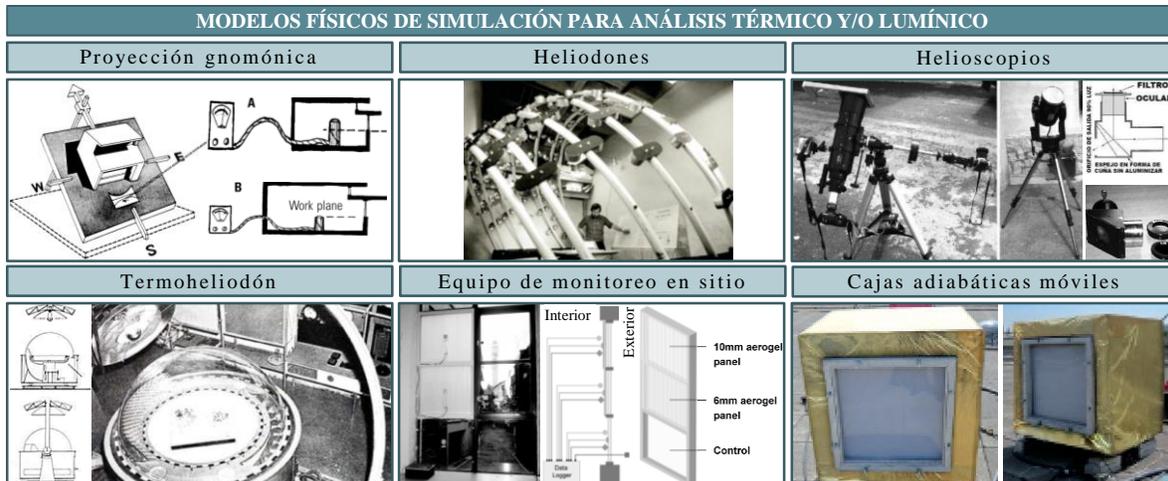


Figura 17. Representación gráfica de los diferentes modelos físicos de simulación.

Elaboración propia con datos obtenidos de Schiler y Japee (1997); Lechner (2015); Bullon i Lahuerta y del Castillo Alarcos (2010); Victor Olgay (1998).

Los valores medidos en modelos a escala son semejantes a los registrados en el sitio, pues la luz natural no tiene dimensiones escalares, por lo que no requiere de correcciones en análisis de iluminancia, conducción térmica, resistencia estructural, acústica o ventilación. En el caso del análisis lumínico, las maquetas pueden analizarse bajo un cielo natural o artificial, en caso de analizar un cielo uniformemente cubierto, con o sin sensores ubicados a la altura del plano de trabajo o área de interés (Arias y Ávila 2004; Pattini 2007).

Para Meneses (2016), Arias y Ávila (2004), la comparación de resultados obtenidos con otros métodos alternativos es una de varias técnicas para determinar el desempeño del método experimental. Los modelos matemáticos y de simulación por computadora son los más utilizados, para realizar un análisis comparativo de resultados como proceso de validación. La definición de un periodo de estudio para la visualización de los datos es un proceso muy importante, el cual depende del objetivo de la investigación. La visualización global de los datos puede ser muy útil, pues se puede observar los cambios de los parámetros establecidos en las diferentes etapas del día y temporadas del año.

3.3.3 Modelos matemáticos.

Rodríguez y Steegmann (2013) definen a un modelo matemático como la descripción (en lenguaje matemático) de un fenómeno físico. Un modelo matemático proporciona información precisa y son utilizados principalmente para fines técnicos, como balances de energía, análisis y evaluación de materiales constructivos y su transferencia térmica, diseño de sistemas, entre otros. Asimismo, un modelo matemático permite analizar el comportamiento de la energía solar, como la de trayectoria y posición solar y de energía.

Para el cálculo de transferencia térmica y la iluminación natural interior de la envolvente, los modelos matemáticos permiten el análisis rápido de varias configuraciones de materiales y aperturas para verificar o modificar diferentes conceptos de diseño. Los modelos matemáticos pueden determinar el rendimiento de la envolvente arquitectónica en un periodo (día y hora) y sitio determinado. Además, la mayoría de las técnicas de modelización están disponibles en programas de cómputo comerciales que se ajustan a diversas necesidades (Fuentes Freixanet 1984).

Los trabajos de cálculos lumínicos basados en modelos matemáticos pueden presentar desventajas con respecto al comportamiento real del edificio o un modelo a escala. Las simplificaciones asumidas por la complejidad del fenómeno físico ocasionan el límite de uso y reducen su exactitud y precisión. Los modelos matemáticos están limitados por la cantidad de casos que han sido analizados para desarrollar el método. Por lo tanto, es importante identificar el modelo que se adecue a la investigación, además de conocer sus procesos de validación para obtener un grado de confiabilidad de los resultados obtenidos (Pattini 2006).

3.3.4 Modelos de simulación por computadora.

Shannon (1988) define a la simulación como el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y observarlo, con la finalidad de aprender su comportamiento o evaluar diversas estrategias para el funcionamiento del sistema. La simulación por computadora se refiere a un modelo simbólico que está implementado en un lenguaje computacional. La simulación por computadora se compone de un modelo, conjunto de ecuaciones reglas lógicas o un modelo estadístico; el evaluador, proceso que resuelve el modelo; y la interfaz, parte que interactúa con el usuario y presenta los resultados.

Los modelos de simulación por computadora son convenientes cuando los experimentos son imposibles por impedimentos económicos, de seguridad, calidad o éticos. Los programas son herramientas que ayudan a proveer información sobre los efectos energéticos-ambientales de configuraciones espaciales durante el proceso de diseño. Además, los programas reproducen el comportamiento de un edificio con una precisión muy alta, ajustándose a cada necesidad de respuesta.

En cambio, una simulación puede presentar desventajas con respecto a un modelo matemático, real o a escala. Un problema es la validación de los resultados obtenidos por el simulador, pues se debe conocer si los resultados parten de datos que sean útiles para calcular condiciones similares (cielos típicos) del sitio a analizar. Esto quiere decir que los rangos de error o variación con respecto a los datos de referencia (reales) pueden ser muy amplios. Por lo tanto, el grado de precisión que puede alcanzar un programa es menor a las evaluaciones en modelos a escala o reales. Del mismo modo, el modelo puede estar erróneo o se pueden cometer errores en su manejo, provocando resultados incorrectos (Tarifa 2001; Pattini 2007; Meneses Bedoya 2015; Serra y Coch 2000).

Los modelos a escala son la herramienta con el mayor grado de precisión para analizar el comportamiento de un edificio de manera cuantitativa y cualitativa. Las mediciones pueden ser validadas por medio de la comparación de datos con respecto a un modelo de referencia. Éste puede ser el modelo matemático, pues ofrece información precisa y es utilizado para fines técnicos. Un factor importante para determinar el periodo de medición es la visión de cambio (tiempo) que se quiere obtener de los parámetros establecidos.

CAPÍTULO 4.

Método de estudio para el análisis térmico y lumínico de materiales aislantes translúcidos en cubiertas

“El aprendizaje verdadero tiene que ver con descubrir la verdad y no con la imposición de una verdad oficial, pues esta última opción no conduce al desarrollo de un pensamiento crítico e independiente”.

Chomsky (2001)

La cubierta translúcida es un agente dinámico que interactúa con diferentes fenómenos atmosféricos, los cuales cambian durante el tiempo, para cumplir funciones específicas. Se instaló una estación meteorológica para obtener mediciones en tiempo real de la temperatura, humedad relativa e iluminancia del ambiente. Posteriormente, se realizó el análisis climático del sitio de estudio, identificando a mayo, como el mes más cálido, con un registro promedio de 22.2 °C, 43.9 % de HR y 65 klx (a las 12:00 h) y a enero, como el mes más frío, con un registro promedio de 16.6 °C, 45.3 % de HR y 74 klx (a las 12:00 h). Se utilizó la base de datos del programa Meteororm 8.1 para los valores de humedad relativa mensuales, debido a que las mediciones de la estación meteorológica no fueron confiables por presencia de humedad dentro de los sensores.

Los parámetros para diseñar los módulos de prueba se definieron a partir del análisis de otros casos de estudio y algunas construcciones con cubierta curva. Se decidió construir tres modelos físicos experimentales con dimensiones exteriores de 60x70x63 cm (ancho, largo y altura), ubicados en una parte elevada del sitio de estudio para evitar obstrucciones y con una orientación norte-sur.

Los tres módulos de prueba se construyeron para cada material de estudio, con la finalidad de analizar y comparar el desempeño térmico y lumínico del aerogel y PTFE (aislantes translúcidos no convencionales) respecto al PVC (elemento comparativo). Estos fueron localizados en el área centro de la ZMCM y ubicados en una parte elevada del sitio de estudio, para evitar obstrucciones de elementos, a partir del análisis de sombras por modelos gráficos.

El análisis climático se realizó con datos de temperatura e iluminancia global, obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio, con un periodo de registro entre datos de un minuto durante un año (abril 2021-marzo 2022) (ver *Figura 18, a*). Los valores de la humedad relativa se adquirieron mediante un archivo epw generado con el programa Meteororm 8.1, con un periodo de registro entre 2000 y 2019 (ver *Figura 18, b*). El programa anterior elaboró estimaciones mensuales a partir de las estaciones meteorológicas más próximas al sitio (como en Mexico City/Licenci (9 km), México Central/Tacub (20 km) y Puebla (101 km)). La representación gráfica de los valores fue elaborada en el software MATLAB, versión R2021b para uso académico.

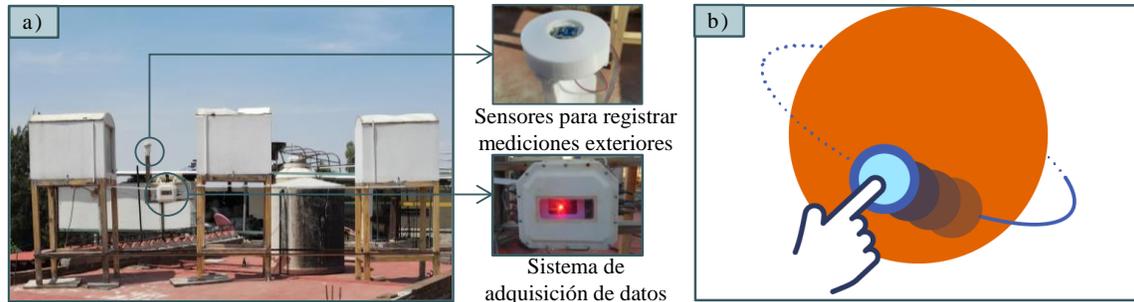


Figura 18. a) Estación meteorológica instalada en sitio y b) software de base de datos climatológicos Meteororm versión 8.1. Elaboración propia con fotografías de Bastida R., Sandra P 2022 (izquierda) e imagen obtenida de Meteotest AG et al. (2022) (derecha).

4.1 Descripción del caso de estudio

Nezahualcóyotl es uno de los municipios del Estado de México que forma parte de la ZMCM (ver *Figura 19*). En 2010, el municipio registró la mayor densidad media de población urbana de la ZMCM, con 226.8 habitantes por hectárea y una tendencia de tasa de crecimiento decreciente. Referente al clima, el municipio presenta un clima semiseco templado y verano cálido con lluvias (BS1k). En la temporada cálida (abril-junio), la temperatura máxima oscila entre 30 y 32 °C y en la temporada fría (diciembre-febrero), la temperatura máxima varía de 26 a 28 °C (Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda del Estado de México y H. Ayuntamiento de Nezahualcóyotl 2005; SEDATU, CONAPO e INEGI 2018).

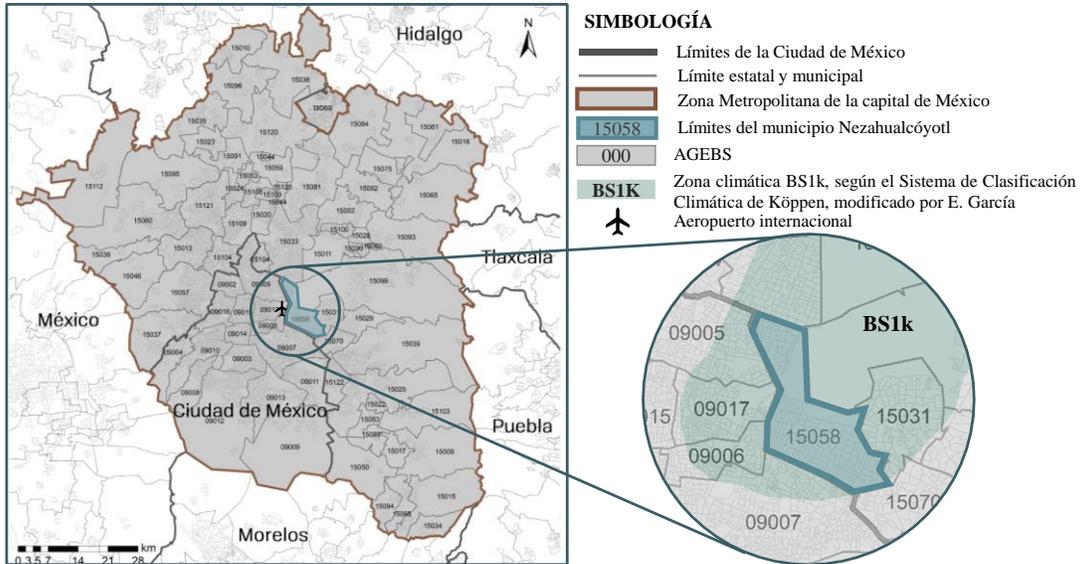


Figura 19. Localización del municipio Nezahualcóyotl en la ZMCM. Elaboración propia con datos obtenidos de CONAGUA (2018) y mapa obtenido de Gutiérrez Chong y Albarran Ramos (2018).

El sitio de estudio se encuentra en la zona norte de Nezahualcóyotl, localizado en el nororiente de la CDMX y en el oriente del Estado de México; colinda con los municipios de Ecatepec de Morelos al norte y Texcoco al oriente; y por las alcaldías Venustiano Carranza al sur y Gustavo A. Madero al poniente. El área que se utilizó se encuentra en la azotea de una vivienda con dos niveles, ubicada en la Plazuela 5 de Avenida de las 3 Culturas, manzana 20, lote 38, en la colonia Plazas de Aragón, con las coordenadas 19.481488 N, 99.032190 W, a una altitud de 2,236 msnm (ICACC y DGRU 2009) (ver *Figura 20*).

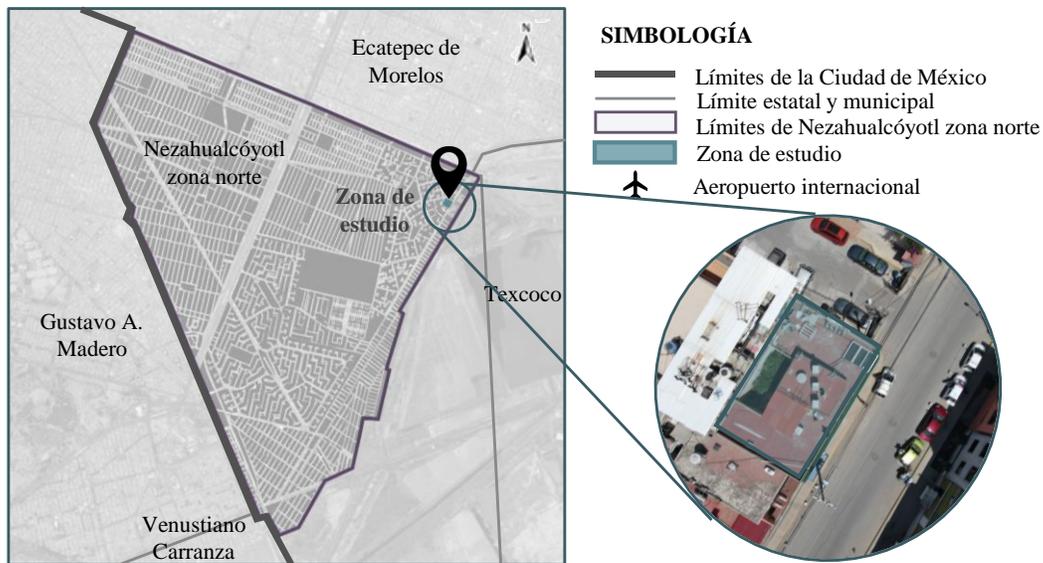


Figura 20. Ubicación de la zona de estudio en la zona norte de Nezahualcóyotl y la vista aérea de la cubierta de la vivienda. Elaboración propia con mapa de Google Earth (Versión 9.165.0.1) y INEGI (2022); Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda del Estado de México y H. Ayuntamiento de Nezahualcóyotl (2005) y fotografía de Bastida R., Sandra P 2022 (derecha).

4.2 Análisis del clima

Se realizó el análisis climático de la zona de estudio para observar el comportamiento térmico y lumínico, identificar los meses con las mediciones más altas y bajas, y los rangos de confort térmico mensual del periodo de estudio. Las siguientes tablas y representaciones gráficas indican el comportamiento del clima, como la temperatura, la humedad relativa, la iluminancia global y los ángulos de sombra, a través del análisis y el procesamiento de datos.

4.2.1 Temperatura y zona de confort mensual.

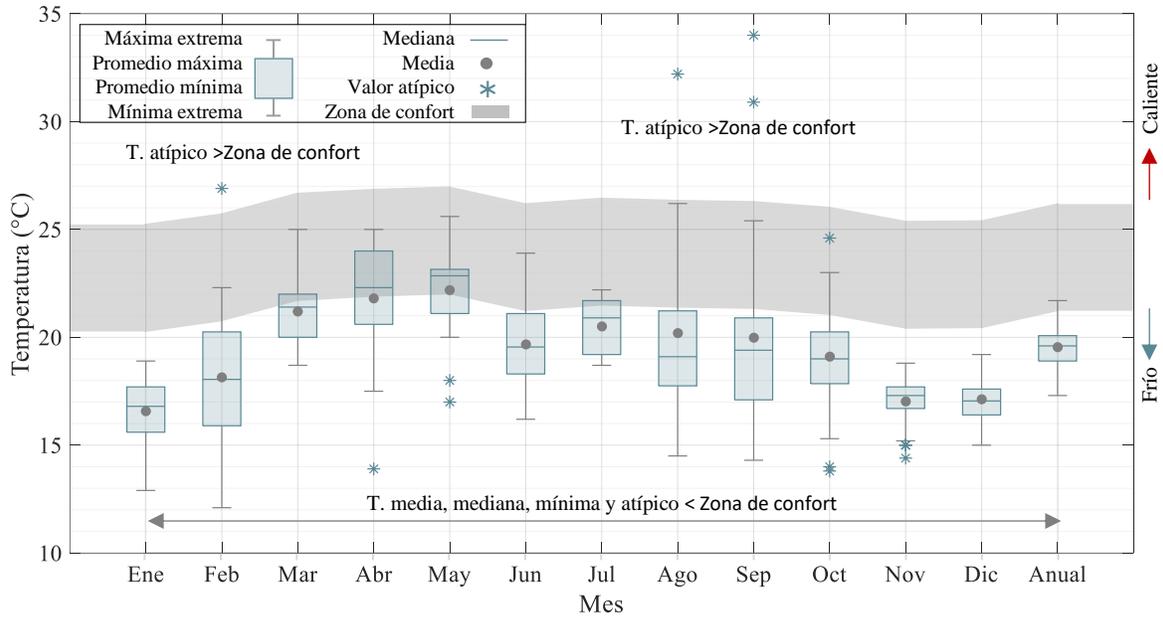
De acuerdo con Godoy (2012), la temperatura exterior es un parámetro que influye en la temperatura operativa óptima del espacio interior. Para identificar las temperaturas calientes o frías, se calculó la zona de confort térmico mensual, con el modelo matemático de ASHRAE 55 (2017), una amplitud de 5 °C y un índice de aceptabilidad del 90 % (ver *Tabla 2*). De acuerdo con los datos registrados, la temperatura media anual es de 19.5 °C, con una oscilación anual promedio de 4.4 °C (ver *Tabla 5*). En el mes más frío (enero) se presenta una medición media mensual de 16.6 °C, con una oscilación de 6.0 °C. El mes caluroso (mayo), el registro promedio mensual es de 22.2 °C, con una oscilación de 5.6 °C.

Las mediciones que se encuentran dentro de la zona de confort pertenecen a la temperatura media mensual de mayo y la temperatura mediana mensual de marzo a mayo, mientras que los meses restantes se encuentran por debajo del límite de confort térmico mensual calculado (ver *Gráfica 7*). En consecuencia, la zona de estudio presenta la necesidad de aplicar estrategias de diseño de calentamiento, con el fin de incrementar la temperatura de los espacios interiores, durante los meses con registros menores al valor mínimo del confort mensual calculado.

Tabla 5. Mediciones de temperatura exterior, media mensual en grados Celsius. Media, máximos y mínimos mensuales.

DATOS MENSUALES DE TEMPERATURA EXTERIOR EN SITIO (°C)													
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Media	16.6	18.1	21.2	21.8	22.2	19.7	20.5	20.2	20.0	19.1	17.0	17.1	19.5
Máx. extrema	18.9	22.3	25.0	25.0	25.6	23.9	22.2	26.2	25.4	23.0	18.8	19.2	21.7
Mín. extrema	12.9	12.1	18.7	13.9	20.0	16.2	18.7	14.5	14.3	15.3	15.2	15.0	17.3
Oscilación	6.0	10.2	6.3	11.1	5.6	7.6	3.5	11.7	11.1	7.7	3.6	4.1	4.4
$\bar{X}_{máx}$	17.7	20.25	21.9	24.0	23.15	21.1	21.7	21.22	20.9	20.25	17.7	17.6	20.08
$\bar{X}_{mín}$	15.6	15.9	20.0	20.6	21.1	18.3	19.2	17.75	17.1	17.85	16.7	16.4	18.9
Mediana	16.8	18.05	22.0	22.3	22.85	19.55	20.9	19.1	19.4	19	17.3	17.05	19.6
Máx. Confort	25.2	25.7	26.7	26.9	27.0	26.2	26.5	26.4	26.3	26.0	25.4	25.4	26.2
Mín. Confort	20.2	20.7	21.7	21.9	22.0	21.2	21.5	21.4	21.3	21.0	20.4	20.4	21.2

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.



Gráfica 7. Rangos de temperatura media mensual y zona de confort térmico mensual. Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

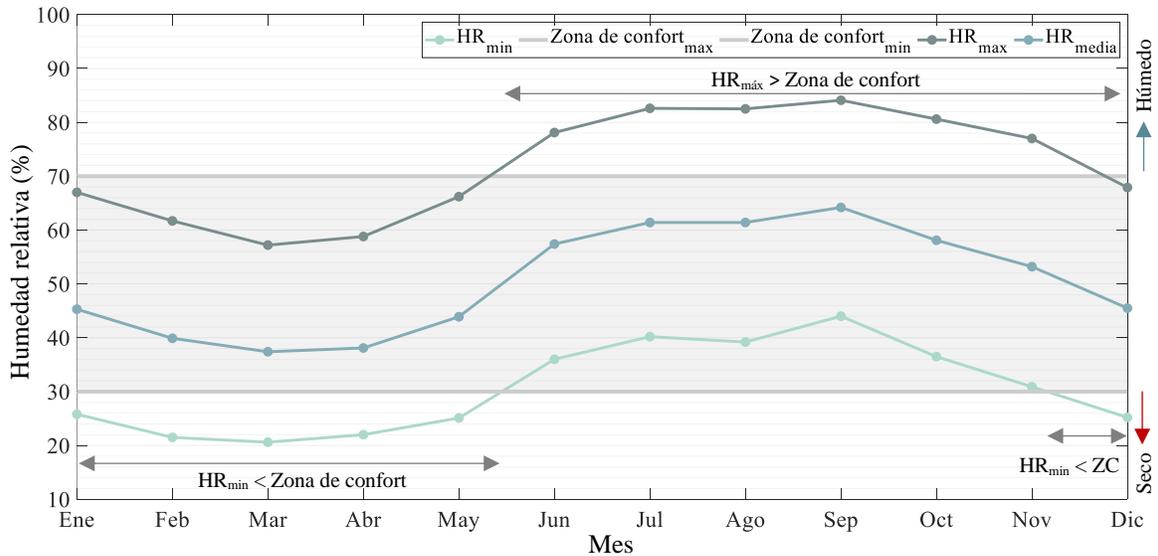
4.2.2 Humedad relativa mensual.

El parámetro de referencia para el confort de humedad relativa es de 50 %, con un rango óptimo de ± 20 %, es decir, entre el 30 y 70 % (Yunus A. y Afshin J. 2015). Con base en los datos de Meteororm 8.1, la humedad relativa media anual es de 50.48 %, con una oscilación de 41.39 % (ver Tabla 6). El mes más seco (marzo) presenta un registro de 37.4 %, mientras que el mes más húmedo (septiembre) es de 64.2 %. La humedad relativa media mensual se encuentran dentro de la zona de confort. Las mediciones que se encuentran fuera del rango de confort pertenecen a la humedad relativa máxima de junio-noviembre, con valores mayores a 70 %, y la humedad relativa mínima de diciembre-mayo, que desciende por debajo del límite de confort de 30 % (ver Gráfica 8). Por lo tanto, la zona de estudio presenta la necesidad de aplicar estrategia de diseño para los valores anteriores, con el objetivo de deshumidificar los espacios durante junio-noviembre y humidificar durante diciembre-mayo.

Tabla 6. Mediciones de humedad relativa exterior, media mensual en porcentaje. Media, máximos y mínimos mensuales.

DATOS MENSUALES DE HUMEDAD RELATIVA EXTERIOR EN SITIO (%)													
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Media	45.3	39.9	37.4	38.1	43.9	57.4	61.4	61.4	64.2	58.1	53.2	45.5	50.48
Máxima	67.0	61.7	57.2	58.8	66.2	78.1	82.6	82.5	84.1	80.6	77.0	67.9	71.98
Mínima	25.8	21.5	20.6	22.0	25.1	36.0	40.2	39.2	44.0	36.5	30.9	25.2	30.58
Oscilación	41.2	40.2	36.6	36.8	41.1	42.1	42.4	43.3	40.1	44.1	46.1	42.7	41.39
Máx. Confort	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70
Mín. Confort	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos del archivo epw generado en Meteororm 8.1 (periodo de registro del 2000-2019).



Gráfica 8. Mediciones de humedad relativa mensual, valores máximos, mínimos y rango de confort. Elaboración propia con datos obtenidos del archivo epw generado en Meteornorm 8.1 (periodo de registro del 2000-2019).

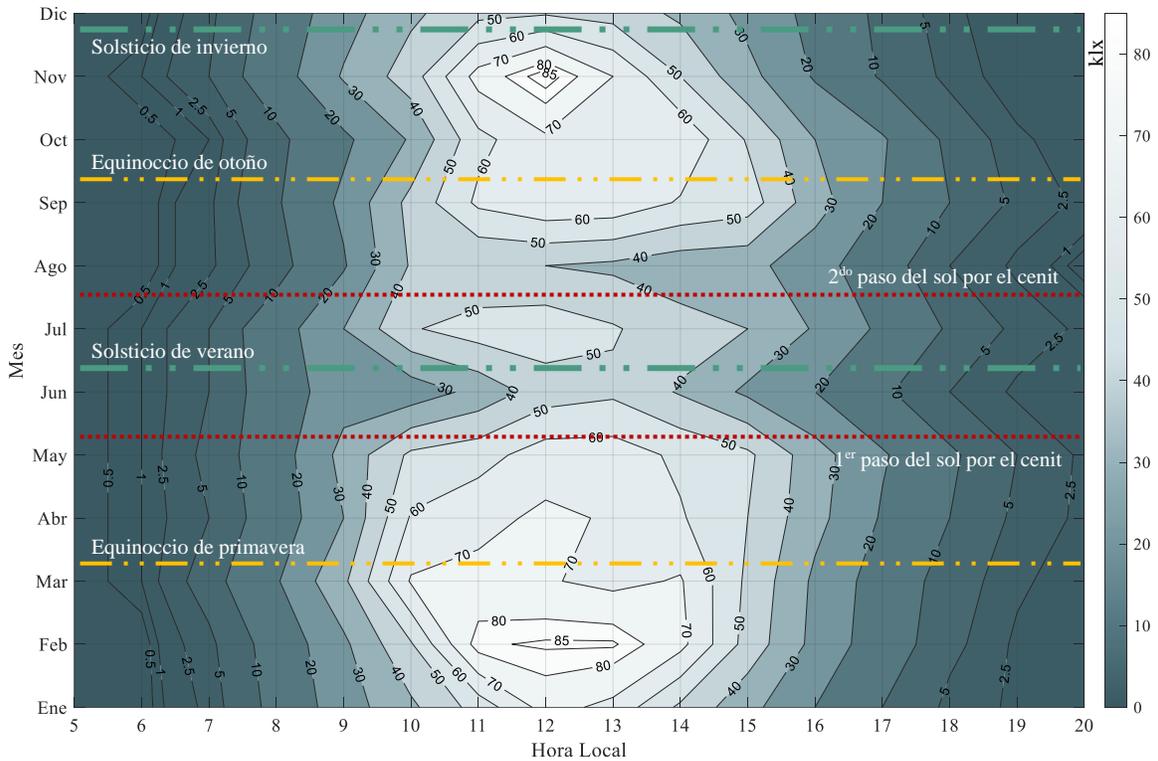
4.2.3 Iluminancia global media horaria.

La Tabla 7 presenta los promedios horarios de iluminancia global en el sitio de las 5:00 a las 20:00 horas en tiempo local, así como los promedios, máximos y mínimos anuales, para representar la variación de las mediciones durante los meses de estudio. La iluminancia global media anual es de 26 klx, con una media máxima de 66 klx. Los registros más altos se presentan entre las 10:00 y 13:00 h durante el periodo de estudio, con valores que varían de 40 a 89 klx. La Gráfica 9 contiene isolíneas para representar el comportamiento de las mediciones medias horarias de los meses analizados. La iluminancia global máxima es en noviembre (con 89 klx) a las 12:00 h y la mínima en agosto (con 41 klx) a las 10:00 h.

Tabla 7. Mediciones de iluminancia global en sitio, media horaria en klx. Promedios, máximos y mínimos mensuales.

MEDIA HORARIA DE ILUMINANCIA EXTERIOR EN SITIO (klx)																			
Hora local	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	M	Máx.	Mín.
Enero	0	0	3	12	25	38	54	74	67	48	33	20	10	4	2	1	24	74	1
Febrero	0	0	4	13	28	49	84	86	86	73	46	27	14	6	2	1	32	86	1
Marzo	0	1	7	19	38	71	73	71	67	71	48	28	15	7	3	1	32	73	1
Abril	0	1	5	14	30	61	67	72	69	61	50	33	19	10	4	2	31	72	2
Mayo	0	1	6	15	33	52	56	65	65	58	52	34	21	11	5	2	30	65	2
Junio	0	1	5	14	26	24	33	45	48	39	28	20	11	5	2	1	19	48	1
Julio	0	1	5	15	30	49	55	56	51	44	40	29	18	9	4	2	26	56	2
Agosto	0	0	2	7	19	41	40	40	38	34	33	24	13	5	2	0	19	41	0
Septiembre	0	0	2	9	22	43	62	68	67	59	55	34	20	10	4	2	29	68	2
Octubre	0	0	1	8	18	31	57	68	67	68	49	30	21	8	3	1	27	68	1
Noviembre	0	1	5	15	31	45	74	89	70	50	33	19	9	4	1	1	28	89	1
Diciembre	0	0	4	13	26	38	47	49	46	38	27	17	8	3	1	1	20	49	1
Media	0	0	4	13	27	45	59	65	62	53	41	26	15	7	3	1	26	66	
Máxima	0	1	7	19	38	71	84	89	86	73	55	34	21	11	5	2		89	
Mínima	0	0	1	7	18	24	33	40	38	34	27	17	8	3	1	0			

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.



Gráfica 9. Mediciones de iluminancia global exterior, media horaria en klx.
Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

De acuerdo con el análisis anterior, se definieron las temporadas de estudio a partir de las temperaturas más bajas y altas. La finalidad de definir meses de diseño es para obtener una muestra de estudio y analizar de manera específica los materiales, además de realizar la visión global (anual) de los parámetros. Debido a problemas técnicos en los sensores, los meses de estudio para la temporada fría son noviembre y diciembre, con registros mensuales de 17.0 y 17.1 °C en temperatura, 53.2 y 45.5 % de humedad relativa y valores máximos de iluminancia global de 89 y 49 klx a las 12:00 h. Los meses para la temporada cálida son abril y mayo, con mediciones mensuales de 21.8 y 22.2 °C en temperatura, 38.1 y 43.9 % en humedad relativa y valores máximos de 72 y 65 klx en iluminancia, a las 12:00 h.

4.2.4 Ángulos de sombra.

El modelo gráfico permite observar la trayectoria aparente del sol, el ángulo y longitud de las sombras en la zona de estudio. El análisis de sombras determina el área apropiada para ubicar los módulos de prueba y así aminorar la obstrucción de cualquier elemento. La *Figura 21* muestra la trayectoria solar del 21 de diciembre (solsticio de invierno) y 21 de mayo (solsticio de primavera), a partir del cálculo horario en tiempo solar verdadero (TSV).

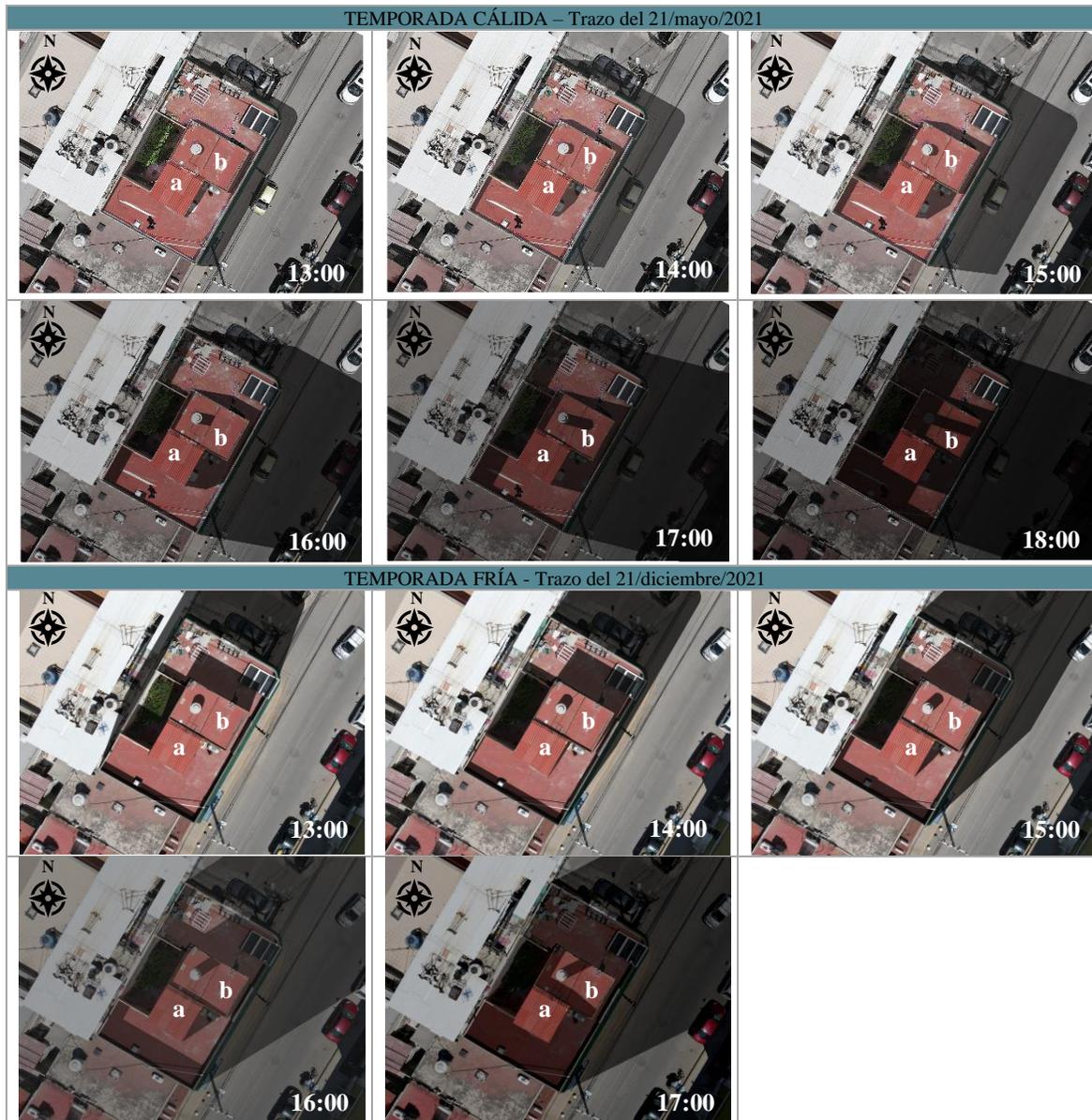


Figura 21. Análisis de sombras horarias a partir del TSV de los meses representativos (mayo y diciembre), en la zona de estudio. Elaboración propia con imágenes de Bastida R. Sandra P. 2022.

El 21 de mayo, las sombras inciden hacia el sureste y muestran obstrucciones considerables en la azotea de la vivienda a partir de las 17:00 h en TSV. El 21 de diciembre, las sombras inciden hacia el noreste y su longitud cubren a las superficies de manera evidente a partir de las 14:00 h en TSV. La cubierta de la lavandería (ver *Figura 21, elemento a*) es la superficie que se encuentra despejado de sombras en los dos días de estudio, sin embargo, la estructura no permite la carga de elementos externos a su peso. La azotea de las escaleras (ver *Figura 21, elemento b*) es el segundo elemento más alto y con menos obstrucciones de elementos, por lo tanto, se seleccionó para emplazar los módulos de prueba (ver *Figura 22*).

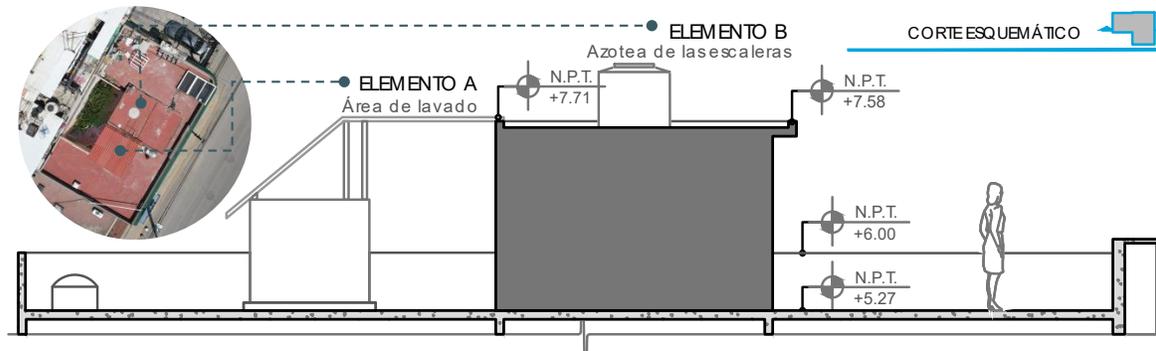


Figura 22. Corte esquemático con los elementos más altos del sitio de estudio.
Elaboración propia con fotografía de Bastida R. Sandra P. 2022.

4.3 Modelo experimental

Durante el proceso de estudio, el modelo experimental se ubicó en la cubierta de una vivienda de 2 niveles con orientación noreste-suroeste, en la avenida de las 3 culturas dentro de la plazuela 5 en la colonia plazas de Aragón del municipio Nezahualcóyotl (ver *Figura 23*). La construcción colinda con una vivienda de 3 niveles del lado oeste y una vivienda de 2 niveles en el sur. Debido a lo anterior, el plano horizontal se encuentra parcialmente obstruido de la radiación solar durante la puesta de sol.

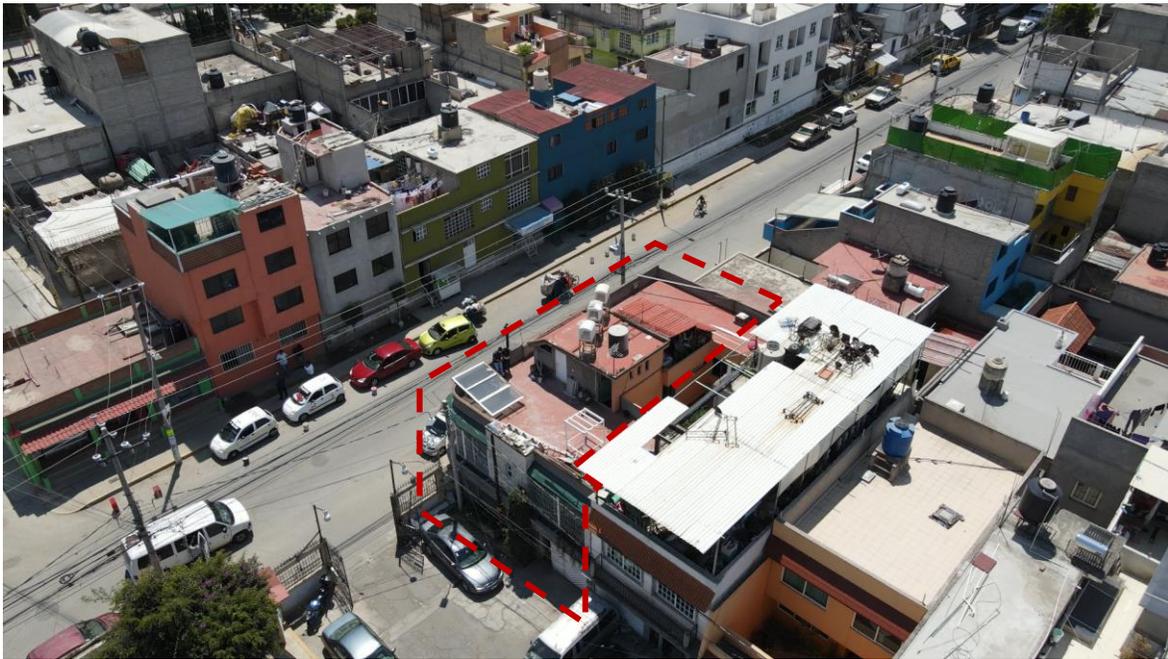


Figura 23. Vista aérea de la vivienda donde se ubica el modelo experimental.
Elaboración propia con fotografía de Bastida R., Sandra P. 2021.

En enero de 2021, los 3 módulos de prueba se emplazaron con una orientación nort-sur y se instalaron los materiales de estudio. El emplazamiento del modelo experimental se determinó a partir de la orientación de la ventana de los módulos, para permitir que la diferencia de mediciones dependa principalmente de los materiales de estudio (el aerogel, PTFE y PVC), ubicados en la cubierta. El periodo de monitoreo comenzó en abril de 2021, incluyendo el registro de la iluminancia y temperatura del ambiente y en el interior de cada módulo, además de las superficies de los materiales.

A continuación, los siguientes gráficos muestran los planos arquitectónicos del sitio de estudio, como es la planta de azotea y 2 secciones arquitectónicas (transversal y longitudinal).

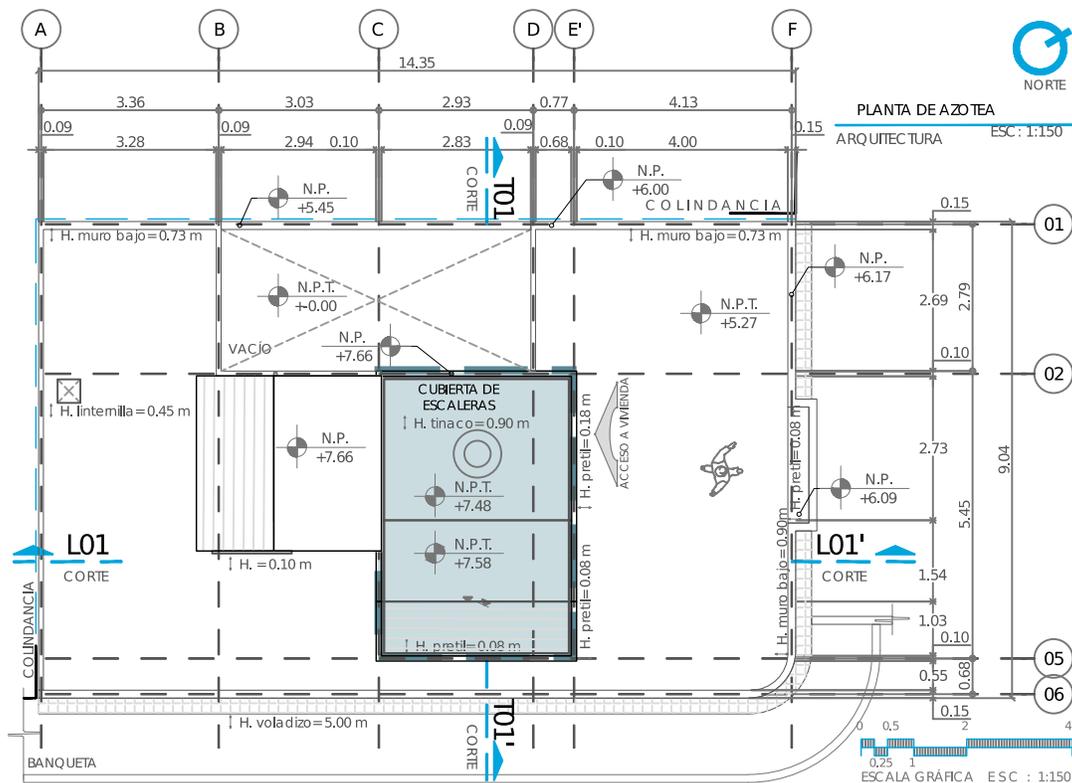


Figura 24. Planta arquitectónica del sitio de estudio y la ubicación del área seleccionada.

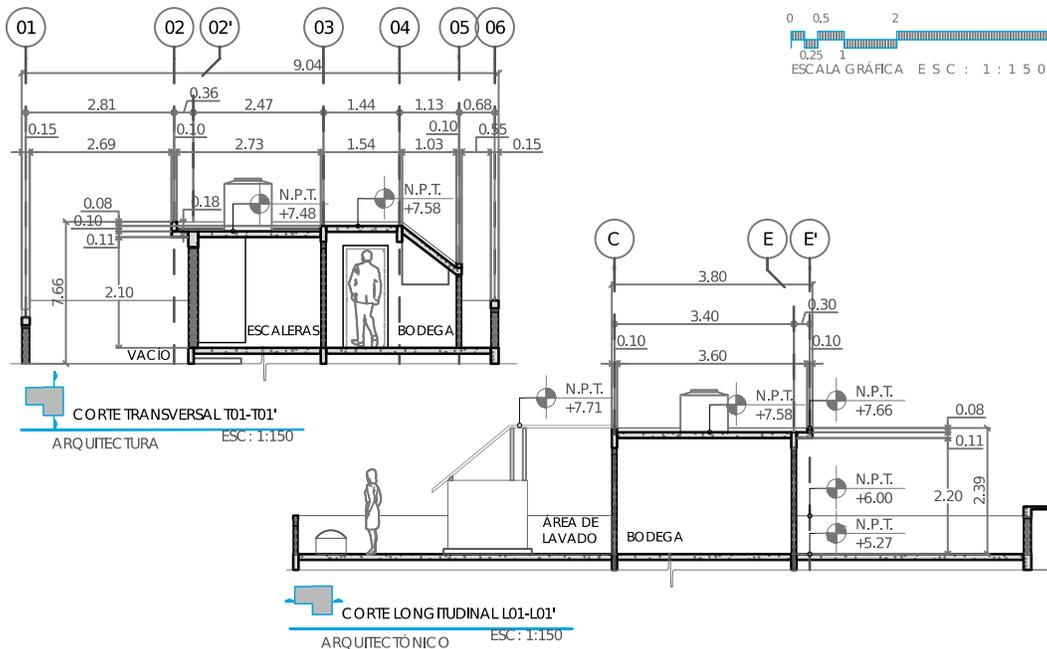


Figura 25. Cortes arquitectónicos del sitio de estudio y el área seleccionada.

4.3.1 Identificación de variables de estudio.

La presente investigación estableció dos categorías de variables y una de valores predefinidos: independiente, dependiente y constante. La variable independiente se considera como la supuesta causa en una relación entre variables. La variable dependiente es el efecto producido por dicha causa (consecuencia), por lo que solo se mide para analizarlo (no se manipula). La constante tiene un valor fijo, el cual no cambia, y son aquellas que se interponen de manera equivalente en las variables independientes, las cuales repercuten en las variables dependientes (Hernandez Sampieri, Fernandez Collado, y Baptista Lucio 2014).

Las variables independientes son la conductividad térmica (en $W/m \cdot ^\circ K$), el valor U (en $W/m^2 \cdot ^\circ K$) y la transmitancia (en %) de los materiales translúcidos de estudio (el aerogel, el PTFE y PVC), instalados en la cubierta de estructura curva de cada módulo de prueba. Las condiciones interiores de los módulos fueron monitoreadas durante un año, para analizar los cambios en las diferentes estaciones del año.

Las variables dependientes se dividen en tres tipos. El primero se refiere a las propiedades térmicas y ópticas de los materiales de estudio respecto a un superaislante, como la conductividad térmica (en $W/m \cdot ^\circ K$), el valor U (en $W/m^2 \cdot ^\circ K$) y la transmitancia (en %). El segundo es el desempeño térmico de las cubiertas translúcidas y se caracteriza por el tiempo dentro de la zona de confort térmico (en min), las unidades de enfriamiento (en $^\circ C$) y la fluctuación térmica diaria (en $^\circ C$). El tercero es el desempeño lumínico de las cubiertas y se caracteriza por el tiempo dentro y debajo de la zona de confort lumínico (en min).

Las constantes son las condiciones ambientales (la temperatura en $^\circ C$ e iluminancia en klx) y la ubicación geográfica de la zona de estudio. Estos repercuten en las condiciones interiores de un edificio comercial, por lo que el desempeño térmico y lumínico de los materiales de estudio en cubiertas translúcidas son el efecto de la relación entre las variables independientes y constantes (ver *Tabla 8*).

Tabla 8. Definición de variables de investigación.

Tipo	Observación		Unidad de medida	Símbolo
Independiente	Propiedades térmicas y ópticas de los materiales	Conductividad térmica del aerogel	$W/m \cdot ^\circ K$	x_1
		Coefficiente de transferencia de calor (valor U) del aerogel	$W/m^2 \cdot ^\circ K$	x_2
		Transmitancia de luz visible del aerogel	%	x_3
		Conductividad térmica del PTFE	$W/m \cdot ^\circ K$	x_4
		Coefficiente de transferencia de calor (valor U) del PTFE	$W/m^2 \cdot ^\circ K$	x_5
		Transmitancia de luz visible del PTFE	%	x_6
		Conductividad térmica del PVC	$W/m \cdot ^\circ K$	x_7
		Coefficiente de transferencia de calor (valor U) del PVC	$W/m^2 \cdot ^\circ K$	x_8
		Transmitancia de luz visible del PVC	%	x_9
Dependiente	Propiedades respecto a un superaislante	Conductividad térmica	$W/m \cdot ^\circ K$	y_1
		Coefficiente de transferencia de calor (valor U)	$W/m^2 \cdot ^\circ K$	y_2
		Transmitancia de luz visible	%	y_3
	Desempeño térmico de las cubiertas translúcidas	Tiempo promedio diario dentro de la zona de confort térmico	min	y_4
		Tiempo dentro de la zona de confort térmico	min	y_5
		Unidades de enfriamiento	$^\circ C$	y_6
		Fluctuación térmica diaria	$^\circ C$	y_7
	Desempeño lumínico de las cubiertas translúcidas	Tiempo promedio diario dentro de la zona de confort lumínico	min	y_8
		Tiempo dentro de la zona de confort lumínico	min	y_9
		Tiempo promedio diario debajo de la zona de confort lumínico	min	y_{10}
		Tiempo debajo de la zona de confort lumínico	min	y_{11}
Constante	Condiciones ambientales	Temperatura exterior	$^\circ C$	z_1
		Iluminancia exterior	klx	z_2
	Ubicación	Coordenadas del sitio de estudio	$^\circ \prime \prime$	z_3

Fuente: Elaboración propia.

El objetivo de identificar las variables de estudio es observar, medir y registrar el efecto que produce las propiedades térmicas y ópticas de los materiales de estudio (aerogel, PTFE y PVC) en el desempeño térmico y lumínico de las cubiertas de los módulos de prueba, respecto las condiciones ambientales del sitio de estudio.

A continuación, la *Figura 26* muestra la relación entre las variables independientes y dependientes y las constantes.

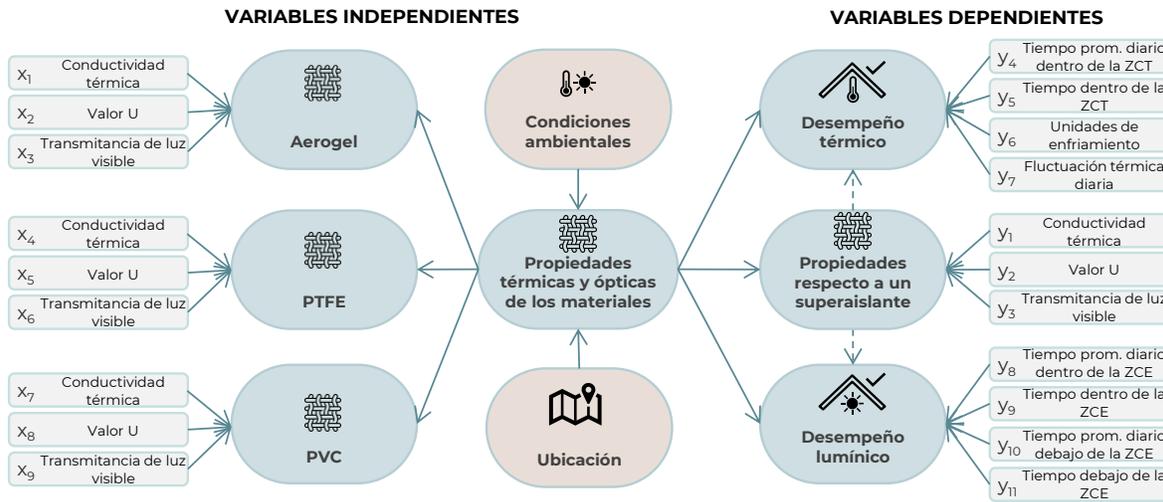


Figura 26. Relación de las variables independientes y dependientes y las constantes. Elaboración propia. Simbología: Los recuadros color café representan las constantes y los azules las variables de estudio (ver *Tabla 8* para la simbología).

4.3.2 Tamaño de la muestra.

El tamaño de la población, para la observación específica de las variables, se delimitó a partir de la literatura revisada. Las temporadas de estudio se consideraron a partir de la temperatura exterior más baja y alta (mediciones extremas). En el tema anterior (análisis del clima) se concluyó que los meses de estudio son noviembre y diciembre, para la temporada fría, y abril y mayo, para la temporada cálida. Asimismo, se propone analizar los tres tipos básicos de cielo (despejado, parcialmente nublado y nublado), pues es un factor que influye en la temperatura e iluminancia interior.

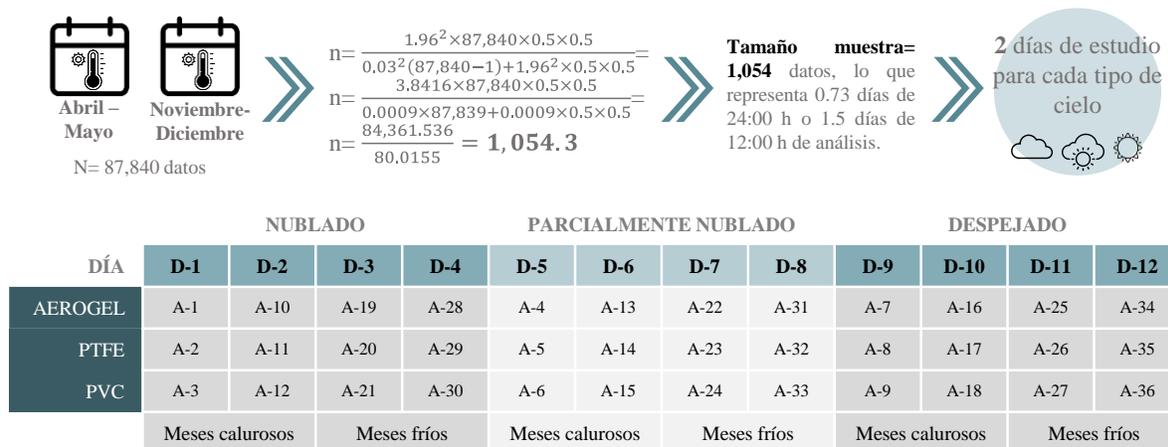
Debido a la cantidad de datos recopilados, la (Ec. 4.1) determina el número de días de estudio para cada tipo de cielo, en las temporadas de estudio, con un nivel de confianza del 95 % y un error de muestra del 3 % (Martínez Bencardino 2012).

$$(Ec. 4.1) \quad n = \frac{Z_{\alpha}^2 \times N \times p \times q}{e^2(N-1) + Z_{\alpha}^2 \times p \times q} \quad \text{donde}$$

n tamaño de la muestra,
N tamaño de la población= 87,840 datos,
p proporción que se espera encontrar= 0.5,

q proporción que no se espera encontrar (1-p) = 0.5,
e margen de error máximo= 3 %,
Z nivel de confianza= 95 % (valor de 1.96).

La *Figura 27* indica el proceso para determinar el tamaño de la muestra para cada temporada de estudio. Las temporadas tienen un tamaño de población de 87,840 datos para cada variable independiente de estudio (iluminancia y temperatura interior). La *(Ec. 4.1)* determinó que el tamaño de la muestra es de 1,054 datos, lo que representa 0.73 días de estudio para un análisis de 24:00 h o 1.5 días para un análisis de 12:00 h. La investigación consideró analizar 2 días de estudio (análisis de 24:00 h) para cada tipo de cielo en los meses calurosos y fríos, es decir, 12 días de estudio en total.



DÍA	NUBLADO				PARCIALMENTE NUBLADO				DESPEJADO			
	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	D-9	D-10	D-11	D-12
AEROGEL	A-1	A-10	A-19	A-28	A-4	A-13	A-22	A-31	A-7	A-16	A-25	A-34
PTFE	A-2	A-11	A-20	A-29	A-5	A-14	A-23	A-32	A-8	A-17	A-26	A-35
PVC	A-3	A-12	A-21	A-30	A-6	A-15	A-24	A-33	A-9	A-18	A-27	A-36
	Meses calurosos		Meses fríos		Meses calurosos		Meses fríos		Meses calurosos		Meses fríos	

Figura 27. Definición del tamaño de la muestra para los días de estudio de cada tipo de cielo. Elaboración propia.

De acuerdo con lo anterior, se realizarán 36 análisis para cada variable de estudio (temperatura e iluminancia interior), lo que representa un total de 51,840 de datos analizados (el 19.7 % de cada temporada).

4.3.3 Definición de los días de estudio.

El parámetro de referencia para definir los tres tipos básicos de cielo (despejado, parcialmente nublado y nublado) es el análisis de la distribución de iluminancias a partir de las mediciones en sitio. Los meses de estudio fueron analizados para clasificar cada día por tipo de cielo. La muestra de estudio recopila 2 días representativos de cada tipo de cielo en las temporadas cálida y fría, por lo que se tiene un total de 12 días (ver *Tabla 9*).

Tabla 9. Mediciones de iluminancia y temperatura de los días de estudio, media horaria en klx y °C.

		Media horaria de los días de estudio																		
Hora local		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	M		
Cielo despejado	05/04/2021	klx	0	0	3	12	27	64	75	82	78	58	36	23	14	7	3	1	30	
		°C	4	4	7	15	22	26	31	34	34	29	28	26	25	23	21	20	19	
	30/05/2021	klx	0	1	6	10	33	64	68	74	76	71	48	25	13	7	3	1	31	
		°C	13	15	19	24	28	31	33	34	34	37	31	25	23	23	22	21	23	
	01/11/2022	klx	0	1	7	20	35	58	118	140	116	73	43	24	11	4	2	1	29	
		°C	5	7	14	21	25	28	30	31	31	30	29	25	20	18	16	15	19	
	06/11/2022	klx	0	1	7	18	34	51	106	136	102	65	40	23	11	5	2	1	35	
		°C	5	6	11	18	24	27	30	32	32	31	27	21	17	15	14	18	18	
Cielo parcialmente nublado	20/04/2021	klx	0	0	5	14	30	69	69	68	69	63	58	43	26	13	6	2	33	
		°C	8	8	14	22	28	32	33	35	38	36	35	33	29	26	24	22	23	
	05/05/2021	klx	0	1	5	15	32	56	60	62	52	40	25	15	8	4	2	1	24	
		°C	15	16	19	22	25	29	32	32	31	29	25	22	20	17	15	15	20	
	16/11/2022	klx	0	1	6	16	31	43	67	84	64	47	31	18	9	4	1	1	23	
		°C	4	5	11	18	24	28	30	31	32	32	29	26	18	16	14	13	17	
	17/11/2022	klx	0	0	4	14	28	42	62	80	61	46	32	19	9	4	1	1	22	
		°C	7	7	11	19	25	29	30	29	31	29	28	23	20	18	16	15	18	
Cielo nublado	02/04/2021	klx	0	4	13	23	45	42	43	46	44	43	35	23	12	5	2	1	24	
		°C	11	13	15	18	22	22	25	27	27	28	28	26	21	17	15	14	17	
	13/05/2021	klx	0	1	7	17	29	28	28	37	54	50	50	36	23	12	5	2	24	
		°C	14	14	16	19	21	20	20	24	26	25	25	22	21	19	17	16	17	
	28/11/2021	klx	0	0	3	13	27	41	51	53	48	40	29	17	8	3	1	1	21	
		°C	9	9	11	15	21	26	29	32	32	32	30	26	21	18	17	16	16	
	17/12/2021	klx	0	0	3	11	24	37	45	46	43	31	18	12	6	2	1	0	20	
		°C	8	7	11	17	23	27	30	31	31	26	19	20	16	14	13	12	16.2	

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

Nota: Las celdas con fondo azul representan los días seleccionados para analizar su distribución horaria de iluminancia en la Gráfica 10.

En la Gráfica 10 se muestra la distribución de iluminancia exterior de tres días representativos de abril, desde el amanecer hasta el anochecer, en donde se aprecia la diferencia de niveles y el comportamiento de un día despejado (gráfico izquierdo), parcialmente nublado (gráfico central) y nublado (gráfico derecho). El 05 de abril, la distribución de la iluminancia no presenta obstrucciones considerables por nubes, por lo que tiende a ser uniforme, y alcanza valores mayores a 80 klx. Por el contrario, en el 02 de abril, las condiciones de la cubierta nubosa ocasionan que la distribución sea irregular, con una medición máxima de 46 klx.



Gráfica 10. Distribución horaria de valores de iluminancia exterior medidos en el mes de abril en Nezahualcóyotl, Edo. Méx.; correspondiente a un cielo despejado (izquierdo), parcialmente nublado (centro) y nublado (derecho). Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

4.3.4 Materiales aislantes translúcidos de estudio.

La presente investigación analizó tres materiales translúcidos utilizados en cubiertas translúcidas de estructura curva y gran claro, para construcciones pertenecientes al sector comercial. Se propuso evaluar dos materiales no convencionales con propiedades de absorción solar de tipo *cuasihomogénea* (el aerogel de forma granular) y *perpendicular* (el PTFE) y un material comparativo y de control (el PVC).

El aerogel es considerado como un material *superaislante*, es decir que su conductividad térmica es menor a $0.02 \text{ W/m}\cdot\text{°K}$ (Cuce et al. 2014). El material dispersa de manera uniforme la radiación solar, aminora las pérdidas térmicas y la transmitancia en el interior de un espacio. El PTFE es un termoplástico de estructura de panal, que permite absorber la radiación solar de forma perpendicular. En consecuencia, las pérdidas de reflectancia óptica disminuyen y la transmitancia y pérdidas térmicas aumentan. Asimismo, el material se caracteriza por resistir temperaturas extremas, a la exposición de agentes químicos y solventes (Lonas Lorenzo 2017; Wong, Eames, y Perera 2007).

El PVC se seleccionó como elemento de control para comparar las mediciones y analizar el desempeño de los materiales no convencionales. La membrana es un tejido termoplástico, compuesta de plástico (elemento base), carbono, hidrógeno y cloro, muy resistente, flexible y reciclable (Lonas Lorenzo 2017).

A continuación, la *Tabla 10* indica las propiedades térmicas y ópticas de los materiales.

Tabla 10. Propiedades mecánicas, térmicas y ópticas de los materiales de estudio.

PARÁMETROS	PVC	PTFE	Aerogel
Proveedor	Mercado libre-LonaFlex	Jiangsu VEIK Technology & Materials Co., Ltd	Aerogel Technologies, Cabot
País de origen	Hidalgo, México	Jiangsu, China	EUA
Costo por m ²	19.45 USD/m ²	50 USD/m ²	140 USD/ pieza
Formato	membrana	membrana	manta
Espesor del material (e) mm	0.54	0.3 ± 0.05	3.5
Densidad kg/m ³	0.68	0.5 ± 0.05	70
Conductividad térmica (k) W/m·°K	0.18	0.25	0.023
Calor específico (Cp) kJ/kg·°C	0.88	1	1
Transmitancia (%)	9	30	20% a 8mm
Reflectancia (%)	81	70 ± 10	12
Absortancia (%)	10	-	-
Expectativa de vida (años)	25	30	25

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de Birdair (2014); Aerogel Technologies (2022) y Cerdá Talón (2019).

4.3.5 Diseño de los módulos de prueba.

El modelo experimental analiza 3 materiales empleados en cubiertas de estructura curva: el aerogel, PTFE y PVC. Se elaboró un estudio sobre modelos físicos y espacios de uso comercial con cubiertas que proveen luz natural para identificar los criterios mínimos de un módulo de prueba. Cabe destacar que, la geometría y dimensión de los módulos es determinada por el formato de compra del aerogel en manta (60.96 cm x 76.2 cm x 3.5 mm), el tamaño más reducido respecto a los tres materiales de estudio (ver *Tabla 10*).

Este estudio identificó dos criterios para el diseño de los módulos a partir del análisis de 6 modelos físicos experimentales, 19 nuevos centros comerciales y 50 existentes en la ZMCM (Chen et al. 2018; Alonso et al. 2013; Sánchez Benítez 2017; Buratti y Moretti 2011; Li et al. 2019; Cotana et al. 2014). El primer criterio consiste en aislar las superficies del módulo para mantener las condiciones térmicas estables en el interior y destinar, e instalar de manera similar a la vida real, una superficie para el material de estudio. El segundo es configurar la envolvente del modelo respecto a la relación vano/macizo de las áreas comunes en los centros comerciales analizados, es decir, una proporción de 1:2.5 (ver *Figura 28*).

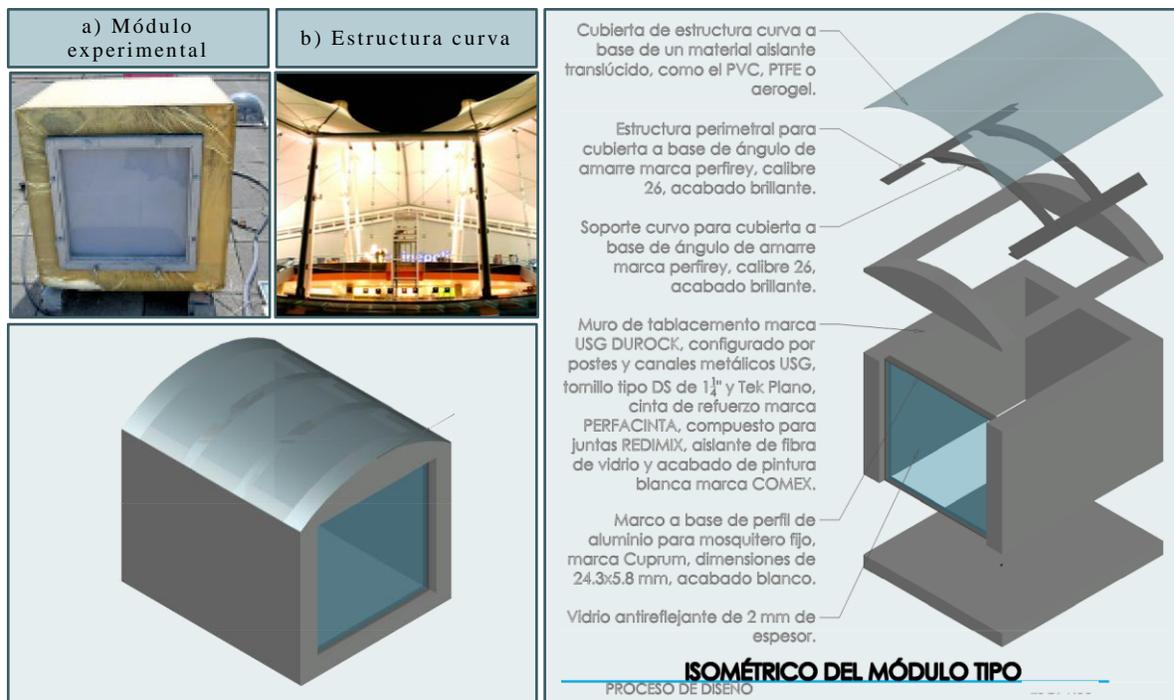


Figura 28. Condiciones de diseño para la configuración del espacio experimental e isométrico del módulo experimental. Elaboración propia con fotografías obtenidas de Alonso et al. (2013) y Birdair (2021a).

Las dimensiones interiores de los modelos son 0.46 m de ancho, 0.59 m de largo y 0.57 m de alto, con una superficie de 0.27 m² y volumen de 0.14 m³. Las dimensiones exteriores son 0.60 m de ancho, 0.70 m de largo y 0.63 m de alto, con una superficie exterior total de 2.34 m², de los cuales 1.68 m² son de superficies opacas y 0.66 m² de superficies translúcidas y transparentes, es decir, una proporción vano/macizo de 1:25. La cubierta translúcida tiene una superficie de 0.45 m² y se compone de un material de estudio con una estructura metálica (ver *Figura 29*). A continuación, la *Figura 30* muestra el proceso de construcción de un módulo tipo.

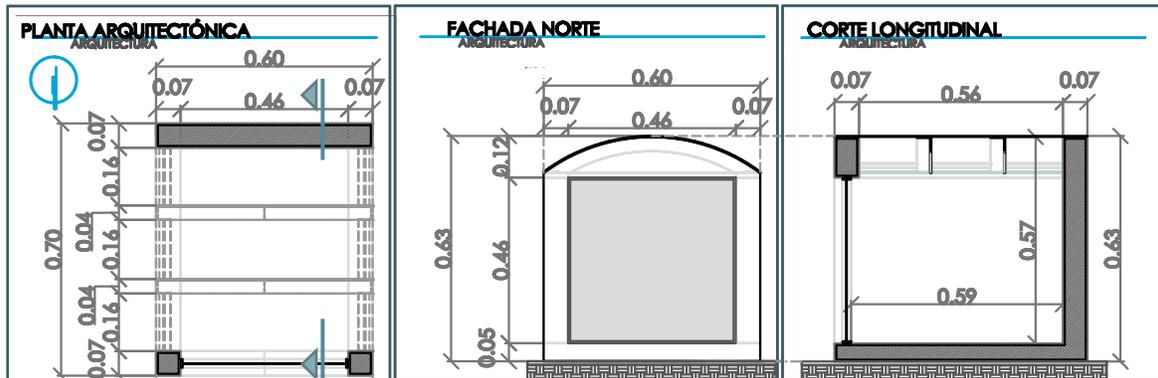


Figura 29. Planta arquitectónica, fachada norte y corte longitudinal del modelo tipo para el método experimental
Elaboración propia.



Figura 30. Procesos de construcción de los módulos de prueba.
Elaboración propia con fotografías de Bastida R., Sandra P. 2021.

La primera y segunda etapa consiste en construir la estructura (a base de canales y postes metálicos USG) e instalar el aislante de fibra de vidrio. Posteriormente, los últimos tableros de tablamiento, marca DUROCK, fueron atornillados para confinar el aislante con tornillos tipo TEK plano. Los muros fueron pintados a dos manos con pintura de color blanco mate, marca COMEX. Finalmente, las ventanas fueron elaboradas con perfil de mosquitero de color blanco y vidrio antirreflejante de 2 mm.

La *Tabla II* muestra el espesor, densidad, conductividad térmica, resistencia térmica y valor U (características físicas) de los materiales que conforman la envolvente de los módulos de prueba. Las superficies verticales y la superficie horizontal inferior (piso) están construidas con paneles de tablamiento marca USG DUROCK, aislada con fibra de vidrio, y su valor U es de 0.25 W/h·m²·°K. La cara de experimentación de cada módulo de prueba difiere entre ellos por los diferentes materiales de estudio. La cubierta tipo 1, compuesta por la membrana de aerogel, presentó el valor U más bajo respecto a las demás cubiertas, con un valor de 3.15 W/h·m²·°K, por la baja conductividad del material.

Tabla II. Propiedades de los materiales del sistema envolvente.

ELEMENTO	Espesor (e) m	Densidad (δ) kg/m ³	Conductividad térmica (k) W/m·°K	Resistencia térmica (espesor/k)	Valor U W/h·m ² ·°K
MURO: FACHADA ESTE, SUR Y OESTE					Área total= 1.25 m ²
Tablamiento marca USG DUROCK	0.0254	921.66	0.099	0.257	0.25
Postes metálicos USG	0.00076	2800	160	4.75 E-06	
Aislante termoacústico de fibra de vidrio USG	0.04	14	0.011	3.636	
Aplanado marca Sika BaseCoat	0.01	2200	1.547	0.006	
Pintura blanca COMEX					
<i>Espesor total</i>	0.0762				
VENTANA FACHADA NORTE					Área total= 0.2 m ²
Cristal antirreflejante	0.002	2.5	0.147	0.014	6.53
Perfil de mosquitero en color blanco	0.023	2702	236	9.74E-05	
<i>Espesor total</i>	0.025				
CUBIERTA DE ESTRUCTURA CURVA (TIPO 1)					Área total= 0.45 m ²
Membrana translúcida de aerogel	0.0035	70	0.023	0.152	3.15
Canales metálicos USG	0.00076	2800	160	4.75 E-06	
<i>Espesor total</i>	0.0043				
CUBIERTA DE ESTRUCTURA CURVA (TIPO 2)					Área total= 0.45 m ²
Membrana translúcida de PTFE	0.0003	0.5	0.250	0.001	6.00
Canales metálicos USG	0.00076	2800	160	4.75 E-06	
<i>Espesor total</i>	0.0011				
CUBIERTA DE ESTRUCTURA CURVA (TIPO 3)					Área total= 0.45 m ²
Membrana translúcida de PVC	0.00054	0.68	0.180	0.003	5.93
Canales metálicos USG	0.00076	2800	160	4.75 E-06	
<i>Espesor total</i>	0.0013				

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de Giugliano (2003); Mehler Technologies (2013); Aerogel Technologies 2022; Jiangsu VEIK Technology & Materials (2022).

4.1.1 Parámetros de medición e instrumentación.

La *Tabla 12* muestra el tiempo mínimo entre muestras, el rango de medición, la resolución y la precisión de cada sensor. Los parámetros para diseñar la instrumentación de los módulos experimentales parte de los requerimientos mínimos de iluminancia (lx), humedad relativa (%) y temperatura (°C) que necesita el experimento. Los sensores MAX44009 y DHT22 fueron calibrados respecto a un instrumento de referencia, certificado por organizaciones especializadas (ver *Anexo B*. Calibración de estaciones meteorológicas).

Tabla 12. Especificaciones de los sensores de iluminancia, humedad relativa y temperatura.

PARÁMETRO	SENSOR DE LUZ MAX44009 ESP32 I2C	SENSOR DE HUMEDAD RELATIVA DHT22 (AM2302)	SENSOR DE TEMPERATURA DHT22 (AM2302)
Rango de medición	0.045 lux - 188,000 lux	0 - 100% RH	-40°C - 80 °C
Resolución	0448 lx	0.1% RH	0.1° C
Precisión	-	2% RH	< ± 0.5 °C
Comunicación	PC	Digital	Digital
Tiempo	1 minuto entre muestras	1 minuto entre muestras	1 minuto entre muestras
No. de sensores	4	4	7
Instrumento de referencia	LI210R	UNI-T UT333	UNI-T UT333
Certificado	Instituto de Geofísica	Laboratorio particular	Laboratorio particular

Fuente: Elaboración propia con datos de Adafruit (2021); LI-COR (2023); Analog Devices (2023).

La *Figura 31* muestra la distribución del cableado y la instalación de los sensores interiores y exteriores. Se implementó un código para identificar los sensores ubicados el exterior (M-0), los sensores del interior (M-1) y los sensores sobre la superficie del material (M-1.1). Las mediciones registradas son recopiladas en un microcontrolador ATmega 328 (módulo de adquisición de datos), el cual transmite ondas de radiofrecuencia para almacenarse en un módulo con una memoria SD. La base de datos se recopila en un archivo formato .txt y se procesa en el programa Excel.

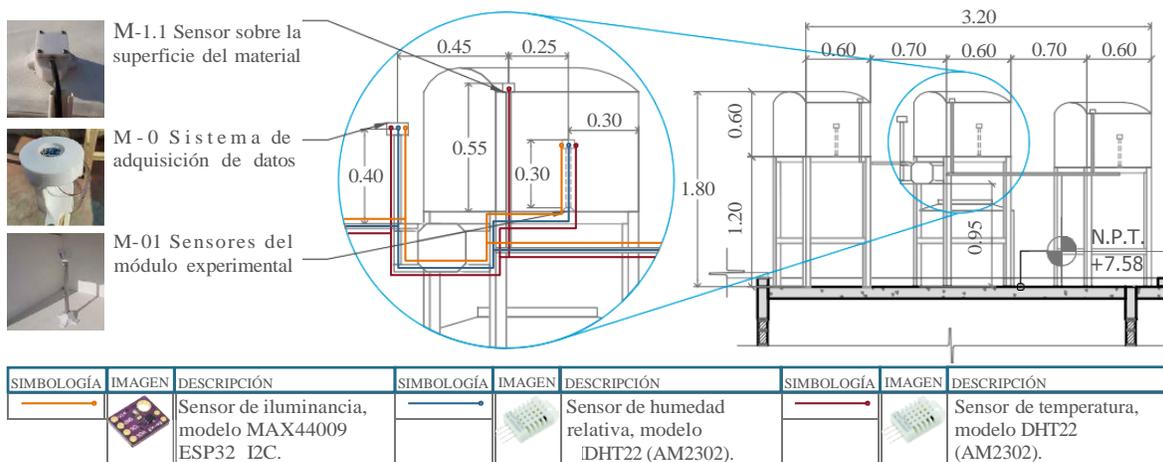


Figura 31. Diagrama de la distribución de sensores en un módulo de prueba. Elaboración propia.

Los sensores se integraron en módulos de PLA, diseñados y construidos en una TRONXY-impresora 3D XY-2 Pro-Titan FDM. Los módulos interiores se ubicaron en el centro de la superficie, a una altura de 0.30 m, conformados por dos sensores (MAX44009 y DHT22) que miden la temperatura, humedad relativa y la iluminancia. Los módulos sobre la superficie del material se colocaron a una altura de 0.55 m sobre el nivel de la base (soporte de las maquetas), conformados por un sensor de temperatura (DHT22). Por último, el módulo exterior se encuentra a una altura 0.40 m sobre el nivel de la base, integrados por dos sensores (MAX44009 y DHT22) que miden la temperatura, humedad relativa y la iluminancia. El módulo de adquisición de datos almacena un registro cada minuto, por lo que un sensor recopila 1,440 datos en un día y, en un año, un total de 525,600 datos.

Los módulos con sensores de humedad presentaron una falla técnica durante el experimento, pues permanecieron con humedad dentro del módulo, ocasionando que las mediciones no fueran confiables. Por lo anterior, los valores de humedad relativa fueron omitidos en el análisis térmico de los módulos de prueba.

4.1.2 Emplazamiento.

La *Figura 32* muestra el proceso para evaluar el emplazamiento adecuado y, de este modo, evitar áreas sombreadas de edificios o elementos circundantes en los módulos de prueba. El análisis, por modelo gráfico, se realizó a partir del cálculo de ángulos de sombra y la incidencia de rayos solares en el área de estudio, con el programa AutoCAD versión 2020. El área de emplazamiento tiene una dimensión de 3.61 m de ancho y 4.27 m de largo, a una altura de 7.48 m sobre el nivel de banqueta.

Los módulos tienen una base de madera de 1.2 m de alto, lo que da una altura total de 8.68 m en la base de cada módulo. La distancia entre cada uno (de 0.80 m) fue la mínima permisible para emplazar el modelo experimental y evitar áreas sombreadas. La ventana de los módulos fue orientada al norte, para que la diferencia de mediciones de iluminancia en el interior dependa principalmente de los materiales de estudio (ubicados en la cubierta), debido a que tiene poca incidencia solar durante el año, niveles lumínicos bajos, relativamente constantes y homogéneos (Guadarrama Gándara 2020). Por lo tanto, el modelo experimental tiene una orientación norte-sur. Los módulos fueron diseñados con las mismas condiciones ambientales y arquitectónicas para obtener una mayor confiabilidad de las mediciones.

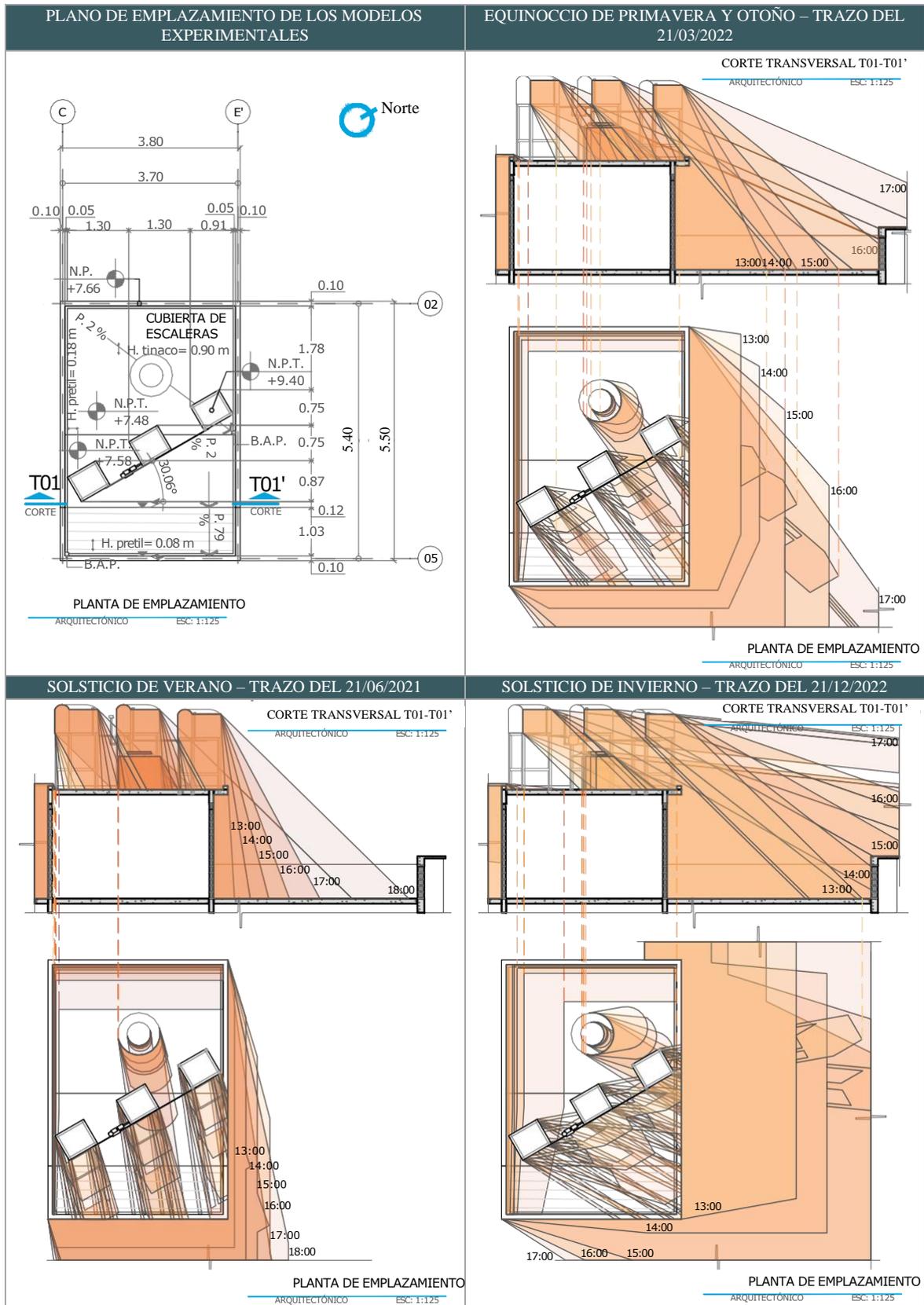


Figura 32. Emplazamiento de los módulos, los ángulos de sombras y la incidencia de rayos solares en el área de estudio. Elaboración propia.

CAPÍTULO 5. Comportamiento térmico y lumínico de la cubierta

“Optimizing the building envelope for the climate can substantially reduce the size of the mechanical system.”

ASHRAE Energy Design Guide for Small
to Medium Office Buildings

Se diseñó un método para definir y contrastar el desempeño térmico y lumínico del aerogel, PTFE y PVC, en cubiertas de estructura curva de tres módulos de prueba, durante un ciclo climatológico (un año); respecto a las condiciones climáticas de la ZMCM (temperatura e iluminancia) y a rangos de confort térmico y lumínico en el horario operativo de un edificio de uso comercial.

El método se desarrolla en dos etapas para analizar las mediciones de los módulos de prueba, a partir de un análisis estadístico descriptivo (representaciones gráficas y tablas) y, posteriormente, en una herramienta de evaluación (Matriz de Leopold).

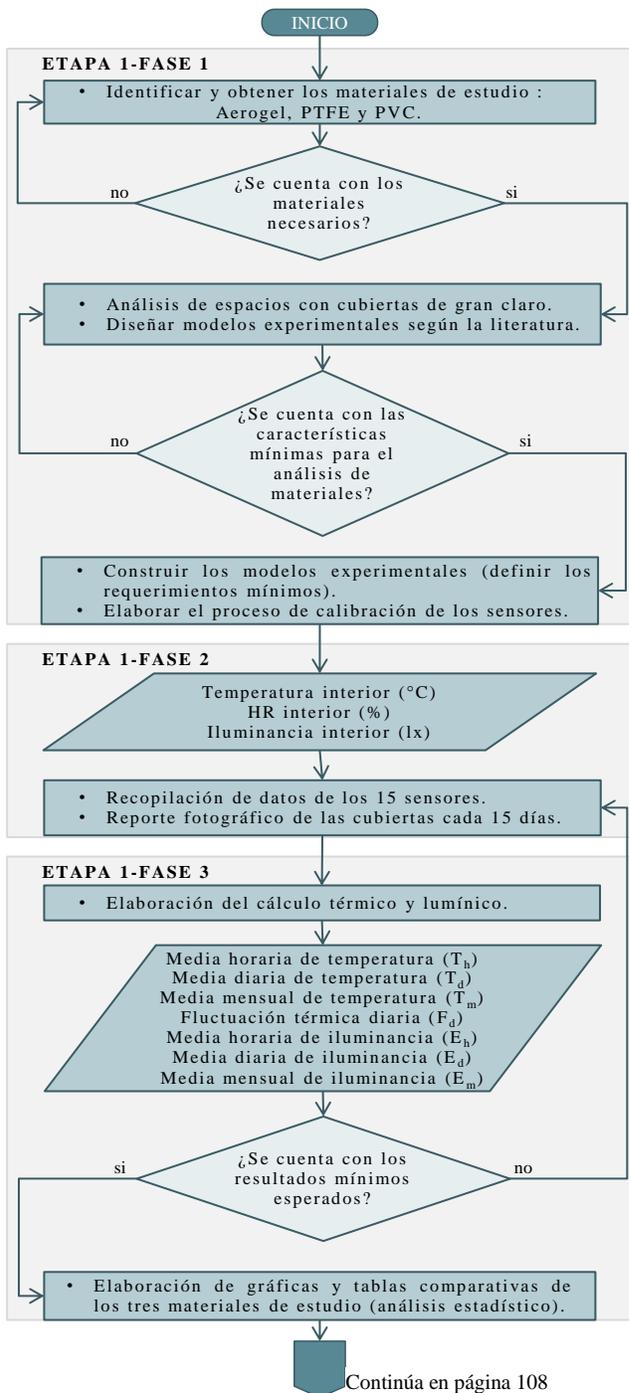


Figura 33. Diagrama de flujo para analizar las mediciones del modelo experimental, a partir del análisis estadístico. Elaboración propia.

variables de salida y, posteriormente, mostrar los datos en gráficas y tablas comparativas. El análisis de datos, a partir de gráficas, se elaboró de acuerdo con la metodología de la Dra. Ilse García Villalobos, en su tesis de maestría “La vegetación como sistema térmico en la naturación extensiva de cubiertas” (García Villalobos 2011).

La *Figura 33* muestra el diagrama de flujo de procesos para obtener mediciones de las condiciones interiores de los módulos de prueba (temperatura e iluminancia), con materiales aislantes translúcidos en las cubiertas (aerogel, PTFE y PVC), y realizar un análisis estadístico descriptivo. La primera etapa del diagrama agrupa tres fases. La primera consistió en analizar, diseñar y construir el modelo experimental. Esta fase se desarrolló en el capítulo anterior.

Las siguientes fases se desarrollan en el presente capítulo. La segunda fase consiste en identificar y recopilar las variables de entrada, por medio del módulo instrumentado (módulo de prueba con sensores integrados). Asimismo, se elabora un reporte fotográfico cada 15 días, con la finalidad de registrar y analizar los cambios físicos de los materiales de estudio, durante el periodo del mes de abril del 2021 al mes de marzo del 2022.

En la tercera fase se realiza los cálculos matemáticos para obtener las

5.1 Comportamiento general de la cubierta

El modelo experimental fue diseñado para monitorear, registrar y observar mediciones de temperatura e iluminancia en el interior de los módulos de prueba, durante el periodo de estudio, con el objetivo de analizar los efectos que producen en el desempeño térmico y lumínico de los materiales de estudio (ganancia térmica e iluminancia promedio respecto al rango de confort térmico y lumínico). El análisis general de las cubiertas permite identificar el desempeño anual de los materiales, mientras que el análisis específico identifica el desempeño de los materiales en los diferentes tipos de cielo; esto es con la finalidad de comparar el rendimiento de los no convencionales (aerogel y PTFE) respecto al PVC.

Las constantes que se definieron para el análisis térmico y lumínico de las cubiertas translúcidas son los rangos de confort térmico mensuales y los niveles de iluminancia óptimos. Los rangos de confort térmico mensuales se calcularon a partir de la fórmula de Auliciems (2007) y se pueden consultar en la *Tabla 5*. Los niveles de iluminancia recomendados para edificios de uso comercial, de acuerdo con USGBC (2022), es entre 300 y 3,000 lux. Cabe destacar que, los rangos de confort térmico y lumínico fueron identificados en las gráficas para mostrar el tiempo dentro y fuera de la zona de confort durante el horario operativo de un centro comercial. Este último tiene un horario promedio de servicio de 11:00 a 21:00 h, es decir, 600 minutos de operación.

La *Figura 34* muestra la ubicación del modelo experimental en la zona de estudio, la trayectoria de los sensores desde el módulo de adquisición de datos inalámbrico hasta el interior de los módulos de prueba y la superficie de los materiales de estudio. El sistema de adquisición de datos transmite ondas de radiofrecuencia hacia un módulo de recepción de datos, ubicado en el interior de la recámara 1, lo más cercano al modelo experimental.

Los sensores de temperatura, en la superficie exterior del PTFE y aerogel, tuvieron un problema técnico. El primer sensor perdió datos durante septiembre y el segundo en noviembre-marzo. Por ende, el análisis comparativo de los datos en las 3 cubiertas se realiza en la temporada cálida; mientras que en la temporada fría solo el PTFE y PVC. El análisis se realiza en los días representativos de cada tipo de cielo con los resultados más críticos.

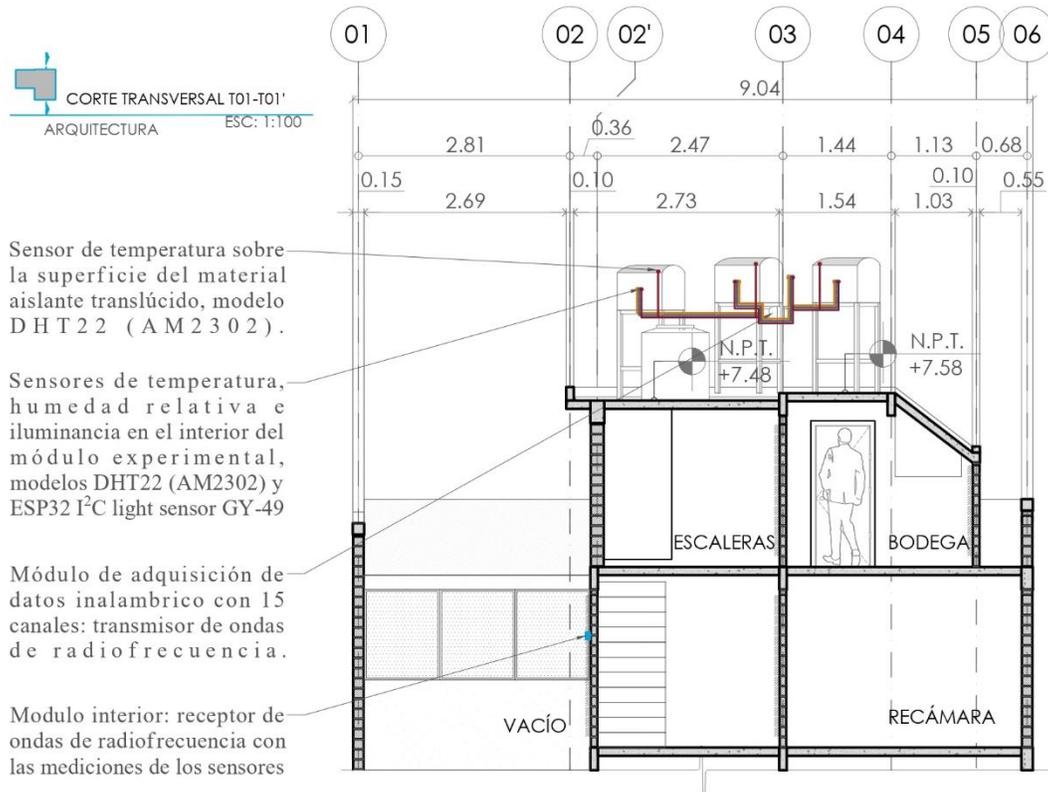


Figura 34. Corte arquitectónico transversal de la vivienda con la ubicación del modelo experimental e instrumentación. Elaboración propia.

5.1.1 Análisis térmico anual.

La temperatura registrada en los módulos de prueba se encuentra por 90 min (minutos) aproximadamente dentro de la zona de confort térmico (ZCT) en un día promedio, es decir, el 15 % del total del horario operativo. Asimismo, la temperatura de los módulos permanece por 420 min calientes y 90 min fríos (superiores e inferiores a la ZCT), representando el 70 y 15 % del horario operativo respectivamente. Los módulos con aerogel y PVC tienen una diferencia entre el valor máximo de confort y el máximo horario de 12 °C; mientras que, en el módulo con PTFE, la diferencia de valores es de 14 °C (ver *Tabla 13*).

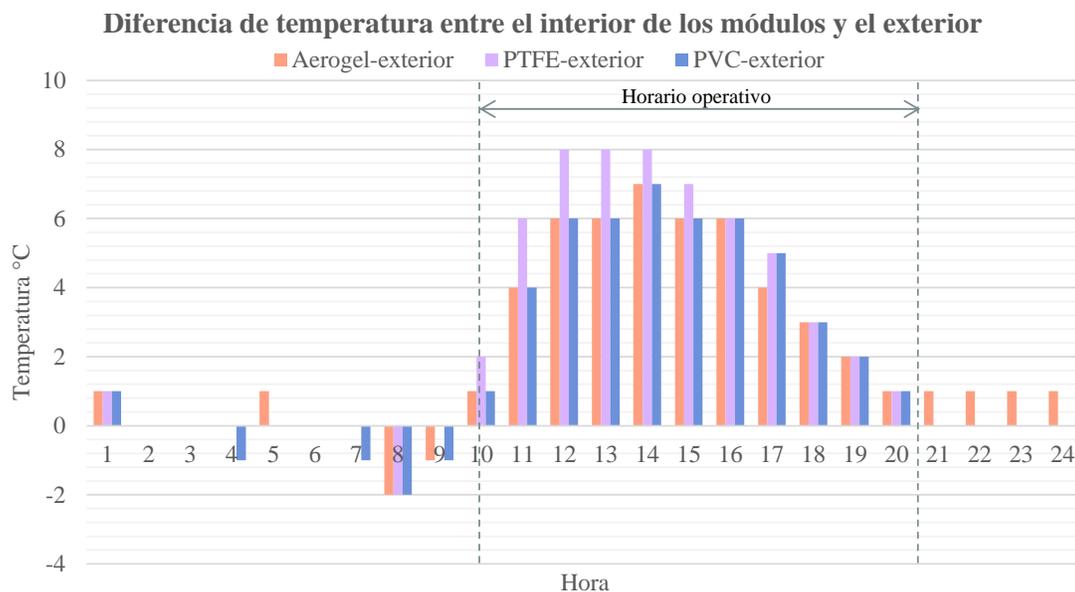
Tabla 13. Mediciones de temperatura exterior e interior, media horaria en grados Celsius (°C). Media, máximos y mínimos.

DATOS PROMEDIOS POR HORA DE TEMPERATURA DE UN DÍA PROMEDIO EN EL SITIO (°C)																									
																									Exterior
Hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	\bar{x}
\bar{x}	12	12	11	11	10	10	12	18	23	27	29	31	32	31	30	27	24	21	19	18	16	15	14	13	19
Máx.	16	15	15	14	14	14	18	23	26	30	33	35	35	36	35	33	29	26	23	21	19	18	17	17	23
Mín.	8	7	6	6	6	5	7	14	20	23	27	28	29	28	25	23	20	18	16	15	13	12	10	9	16
Fluct.	8	8	8	8	8	9	11	8	6	8	7	7	6	8	11	10	9	8	7	7	6	6	7	8	8
																									Aerogel
Hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	\bar{x}
\bar{x}	13	12	11	11	11	10	12	16	22	28	33	37	38	38	36	33	28	24	21	19	17	16	15	14	21
Máx.	16	15	15	14	14	14	17	22	28	32	36	40	43	44	43	41	36	31	26	23	19	18	17	17	26
Mín.	8	7	6	6	5	5	6	11	16	20	28	33	36	35	28	27	22	18	18	16	13	12	11	9	16
Fluct.	8	8	8	9	9	9	11	12	12	12	9	8	7	9	15	14	14	12	8	7	6	6	7	7	9
																									PTFE
Hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	\bar{x}
\bar{x}	13	12	11	11	10	10	12	16	23	29	35	39	40	39	37	33	29	24	21	19	16	15	14	13	22
Máx.	15	15	14	14	14	14	17	23	28	33	39	42	44	45	44	40	35	30	25	22	19	18	17	16	26
Mín.	8	7	6	5	5	5	6	11	18	24	31	35	37	30	30	28	23	20	18	16	13	12	10	9	17
Fluct.	8	8	8	9	9	9	12	13	11	9	8	7	7	15	14	12	12	10	8	6	5	6	6	7	9
																									PVC
Hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	\bar{x}
\bar{x}	13	12	11	10	10	10	11	16	22	28	33	37	38	38	36	33	29	24	21	19	16	15	14	13	21
Máx.	15	15	14	14	14	14	16	22	27	32	37	41	43	42	42	39	34	30	25	22	19	18	17	16	25
Mín.	8	7	6	5	5	4	5	10	18	25	30	34	36	30	31	28	23	20	18	16	13	12	10	9	17
Fluct.	8	8	9	9	9	9	11	11	9	7	7	7	7	12	11	12	11	10	8	7	6	6	7	7	9

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

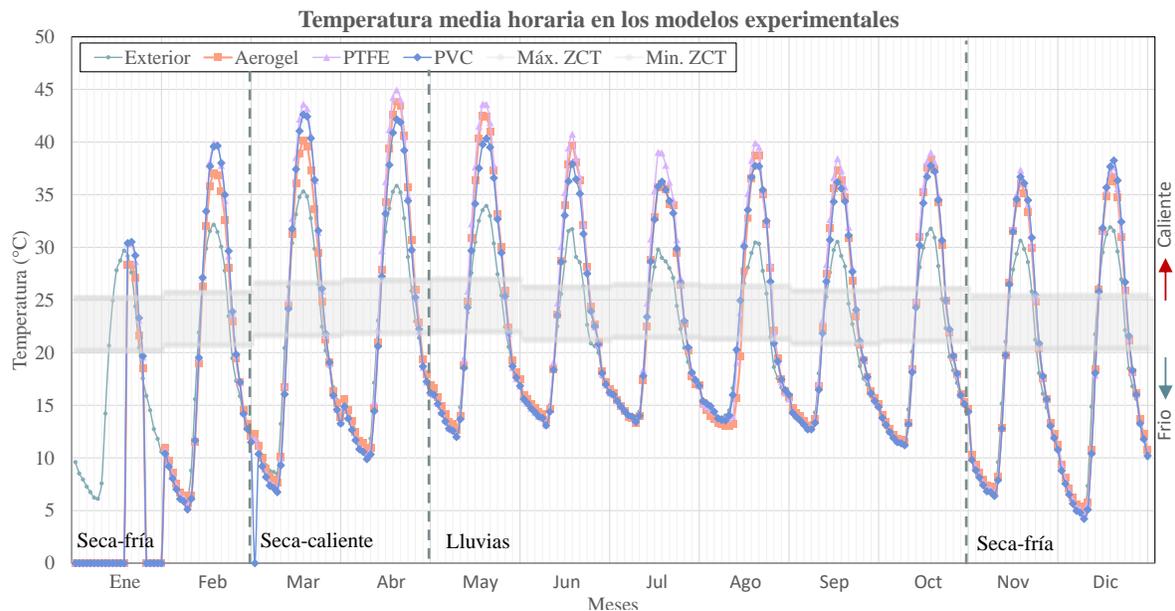
Notas: color rojo para valores >26.1 °C (>ZCT), color blanco para valores de 21.1-26.1 °C (ZCT) y color azul para valores <21.1 °C (<ZCT)

La Gráfica 11 muestra la diferencia de temperatura entre el interior de los módulos de prueba y el exterior, en datos promedio anuales por hora (ver valores en Tabla 13). La diferencia de temperatura entre el interior de los módulos y exterior es considerable durante el horario operativo de un edificio de uso comercial, alcanzando un incremento máximo del 26 %. La temperatura, en el interior del módulo con PTFE, aumenta considerablemente respecto al exterior entre las 11:00 y 15:00 h, con una diferencia máxima de 8 °C (desde las 12:00 y 14:00 h). La temperatura, en el interior del módulo con aerogel y PVC, presentan una diferencia semejante y un incremento máximo de temperatura del 23 % (de 7 °C).



Gráfica 11. Diferencia de temperatura entre el interior de los módulos de prueba y el exterior. Datos promedio anuales por hora. Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

En la *Gráfica 12*, la temperatura promedio registrada en el interior de los módulos presenta valores superiores respecto a la temperatura ambiente en los meses de estudio. La mayor diferencia entre la temperatura en el interior de los módulos y el ambiente se presenta en junio y la menor diferencia en noviembre, con un máximo de 8.6 y 6.0 °C, respectivamente. Los módulos presentan la mayor fluctuación térmica diaria promedio en marzo (temporada seca-caliente); mientras que en julio ocurre lo contrario (temporada de lluvias). Asimismo, los módulos presentan valores promedio por hora semejantes en octubre; mientras que en marzo ocurre lo contrario.



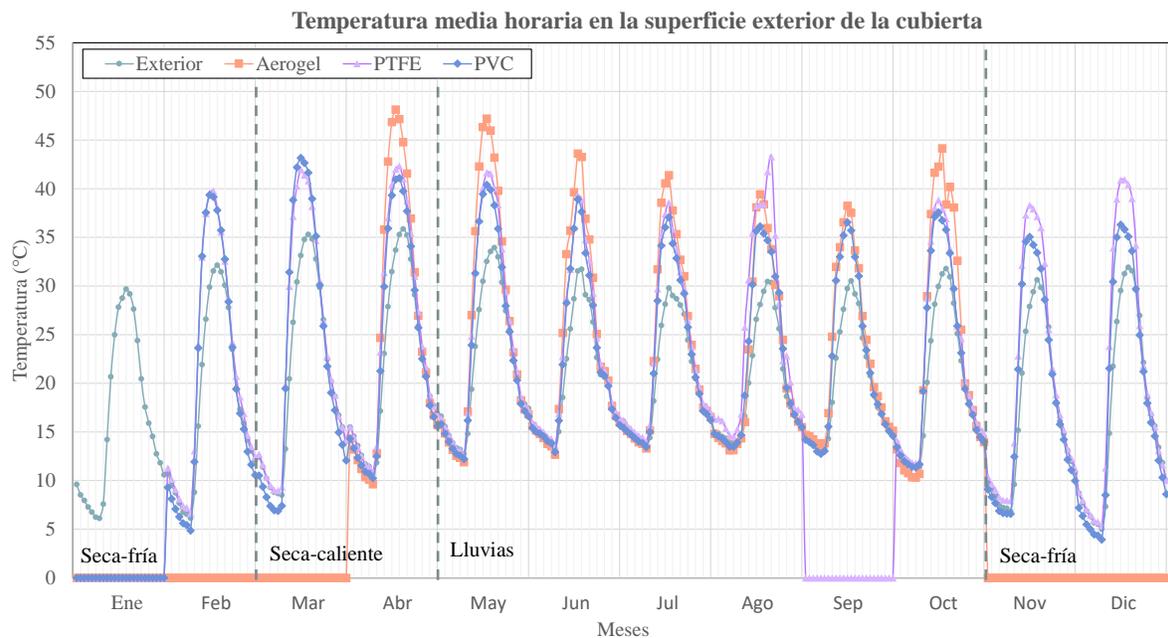
Gráfica 12. Distribución de la temperatura promedio por hora de los módulos de prueba durante el periodo de estudio. Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

La temperatura promedio máximo en el interior del módulo con aerogel alcanza un registro máximo de 44 °C en abril y un mínimo de 35 °C en septiembre; en el módulo con PTFE, el máximo es de 45 °C en abril y un mínimo de 37 °C en noviembre y, en el módulo con PVC, el máximo es de 43 °C en marzo y un mínimo de 36 °C en noviembre.

La temperatura interior promedio se encuentra por mayor tiempo en la ZCT en junio, con alrededor de 180 min en el módulo con PTFE y 240 min en los módulos con aerogel y PVC (el 30 y 40 % del total del horario operativo, respectivamente). Por el contrario, la temperatura interior promedio se encuentra por menor tiempo en febrero para el módulo con aerogel, diciembre para el módulo con PVC (temporada seca-fría) y agosto para el módulo con PTFE (temporada de lluvias), con un tiempo aproximado de 120 min, es decir el 20 %.

La temperatura promedio máxima diaria en los módulos con aerogel y PTFE, durante el horario operativo, presenta la mayor diferencia entre el valor máximo de confort y el valor máximo mensual en abril con 17.0 y 18.1 °C respectivamente y, en el módulo con PVC, se presenta en marzo con 16.0 °C. Por el contrario, la temperatura promedio máxima diaria en los módulos con aerogel y PVC, durante el horario operativo, presenta la menor diferencia entre el valor máximo de confort y el valor mínimo mensual en julio con 9.6 y 9.8 °C respectivamente y, en el módulo con PTFE, se presenta en noviembre con 12.0 °C.

En la *Gráfica 13*, la temperatura en la superficie exterior de las cubiertas presenta valores superiores respecto a la temperatura ambiente en los meses de estudio. La mayor diferencia entre la temperatura en la superficie exterior de las cubiertas y el exterior se presenta en mayo y la menor diferencia en septiembre, con un máximo de 15.9 y 9.4 °C, respectivamente. La temperatura en la superficie exterior de las cubiertas presenta la mayor fluctuación térmica diaria promedio en abril con 38.5 °C (temporada seca-caliente); mientras que en septiembre ocurre lo contrario con 24.8 °C (temporada de lluvias). Asimismo, la temperatura en la superficie exterior de las cubiertas presenta valores promedio por hora semejantes en julio; mientras que en agosto ocurre lo contrario.



Gráfica 13. Comparación anual de la temperatura media horaria sobre la superficie de los materiales aislantes translúcidos. Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

5.1.2 Análisis lumínico anual.

La iluminancia, en los tres módulos de prueba, permanece por 180 min dentro de la zona de confort lumínico (ZCE) en un día promedio, es decir, el 30 % del horario de servicio. Asimismo, la iluminancia de los módulos se encuentra arriba de la ZCE por 360 min, lo que representa el 60 % del horario de servicio, alcanzando valores superiores a 3,000 lx. En los minutos promedio restantes, el espacio interior de los módulos de prueba presenta la necesidad de utilizar iluminación artificial para alcanzar los valores de iluminancia requeridos (mínimo 300 lx) (ver *Tabla 14*).

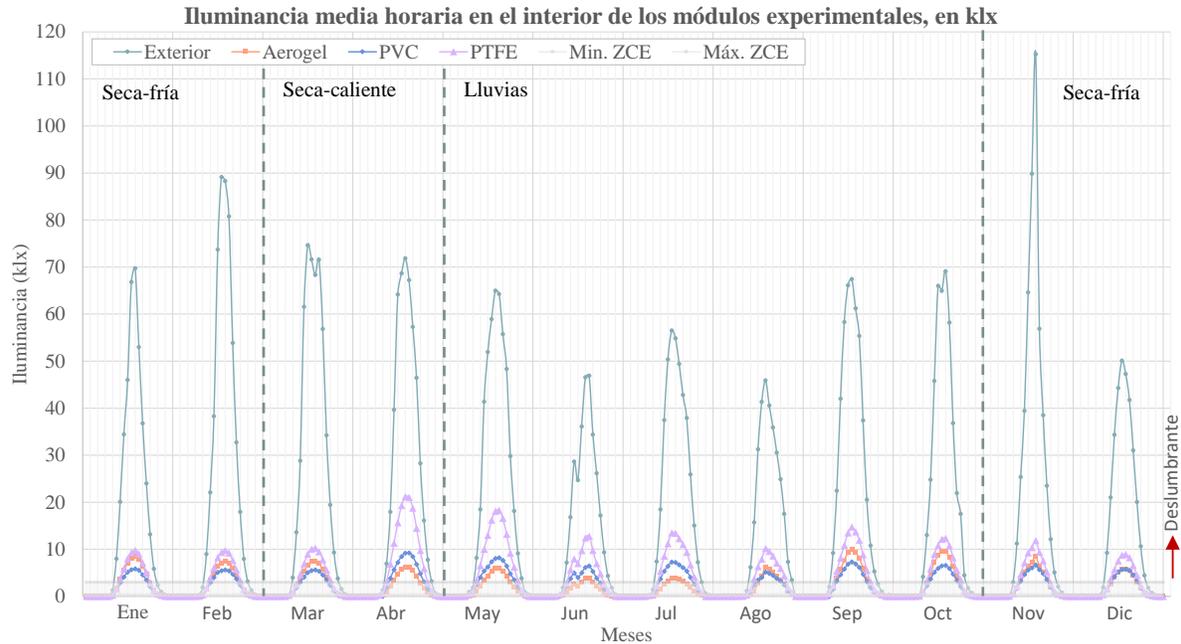
Tabla 14. Mediciones de iluminancia exterior e interior, media horaria en kilolux (klx). Media, máximos y mínimos.

DATOS PROMEDIOS POR HORA DE ILUMINANCIA DE UN DÍA PROMEDIO EN EL SITIO (KLX)																		
																	Exterior	
Hora	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	Máx.
\bar{x}	0	0	3	10	22	40	55	63	67	57	43	31	19	10	4	2	0	68
Máx.	0	2	9	22	42	62	75	90	115	81	57	48	30	18	9	4	1	115
Mín.	0	0	0	1	6	16	25	36	46	41	31	20	11	4	2	1	0	46
Fluctuación	0	2	9	21	36	46	50	54	69	40	26	28	19	14	7	3	1	69
																	Aerogel	
Hora	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	Máx.
\bar{x}	0	0	0	2	3	4	6	6	7	6	5	4	2	1	1	0	0	7
Máx.	0	0	2	4	6	8	9	10	10	8	6	5	4	3	1	1	0	10
Mín.	0	0	0	0	0	1	2	3	4	4	3	2	1	1	0	0	0	4
Fluctuación	0	0	2	4	5	7	7	7	6	5	3	3	2	2	1	0	0	7
																	PTFE	
Hora	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	Máx.
\bar{x}	0	0	1	3	5	8	10	12	13	12	10	7	5	3	1	1	0	13
Máx.	0	1	2	5	8	11	16	19	21	21	19	15	10	6	3	1	0	21
Mín.	0	0	0	0	2	4	6	8	9	8	7	5	2	1	0	0	0	9
Fluctuación	0	1	2	5	7	8	9	11	12	13	12	10	7	5	3	1	0	13
																	PVC	
Hora	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	Máx.
\bar{x}	0	0	1	2	3	5	6	6	7	6	5	4	3	2	1	0	0	7
Máx.	0	0	1	3	5	6	7	8	9	9	8	7	5	4	2	1	0	9
Mín.	0	0	0	0	1	2	3	4	5	5	4	3	2	1	0	0	0	5
Fluctuación	0	0	1	3	4	3	4	4	4	4	4	3	3	2	1	0	0	4

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

Simbología: valores mayores a 3 klx (>ZCE) en rojo, valores entre 0.3 y 3 klx (ZCE) en gris y valores menores a 0.3 klx (<ZCE) en azul.

En la *Gráfica 14*, la iluminancia promedio registrada en el interior de los módulos presenta valores inferiores respecto a la iluminancia exterior en los meses de estudio. La mayor diferencia entre la iluminancia en el interior de los módulos y el exterior, durante la culminación del sol, se presenta en noviembre y la menor diferencia ocurre en junio, con un aproximado de 103 y 34 klx, respectivamente.



Gráfica 14. Distribución anual de la iluminancia media horaria mensual interior de los módulos de prueba. Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

La iluminancia promedio registrada en la culminación del sol, en el interior del módulo con aerogel, alcanza un registro máximo de 10 klx en septiembre y octubre y mínimo de 4 klx en junio y julio; en el módulo con PTFE, el promedio máximo es de 21 klx en abril y el mínimo de 9 klx en diciembre y, en el módulo con PVC, el promedio máximo es de 9 klx en abril y el mínimo de 5 klx en agosto.

La iluminancia interior promedio se encuentra por mayor tiempo dentro de la ZCE en junio, con 300 min para el módulo con aerogel, 180 min para el módulo con PTFE y 240 min para el módulo con PVC (el 50, 30 y 40 % del horario operativo, respectivamente). Por el contrario, la iluminancia promedio se encuentra por menor tiempo en diciembre con 120 min para el módulo con aerogel; en mayo con 60 min para el módulo con PTFE y en enero, abril-mayo y octubre con 120 min para el módulo con PVC (el 20, 10 y 20 %, respectivamente).

El módulo con aerogel, durante el horario operativo, presenta la mayor diferencia entre el valor máximo de confort y la iluminancia máxima promedio en septiembre con 7 klx; mientras que, en los módulos con PTFE y PVC, se presenta en abril con 18.2 y 6.3 klx, respectivamente. Por el contrario, el módulo con aerogel presenta la menor diferencia entre el valor máximo de confort y la iluminancia máxima promedio en julio con 1 klx; para el módulo con PTFE, en diciembre con 6 klx y, para el módulo con PVC, en agosto con 2.2 klx.

5.1.3 Reporte fotográfico anual.

La *Figura 35* muestra las fotografías mensuales de la superficie exterior del aerogel, PTFE y PVC en la cubierta de los módulos de prueba. Las fotografías fueron capturadas cada 15 días por medio de un dispositivo móvil, con una cámara de 25 megapíxeles y un foco de apertura de 1.7. Esto permite registrar y analizar los posibles cambios físicos de los materiales de estudio, como la descomposición por radiación solar (presencia de fisuras y/o grietas), la adherencia de partículas de polvo y el color, durante el periodo abril del 2021-marzo del 2022. Los módulos de prueba recibieron un mantenimiento periódico de una vez a la semana, para retirar las partículas de polvo y suciedad de las cubiertas.



Figura 35. Reporte fotográfico mensual sobre la superficie exterior de los materiales durante el periodo de estudio. Elaboración propia con fotografías de Sandra P. Bastida R. 2022.

La cubierta de aerogel presentó la mayor descomposición durante el periodo de estudio. Tres meses después de iniciar la experimentación, el material comenzó a presentar una abertura pequeña en la superficie exterior cerca de la fachada norte; mientras que en octubre se originaron más de una fisura en la misma área. En noviembre, las aberturas comienzan a aumentar su tamaño y a propagarse hasta el centro de la cubierta; mientras que en diciembre se presenta la primera grieta en el lado norte del material. En cambio, el PTFE y PVC no mostraron desgaste durante el periodo de estudio, pues no presentaron fisuras o grietas en la superficie exterior.

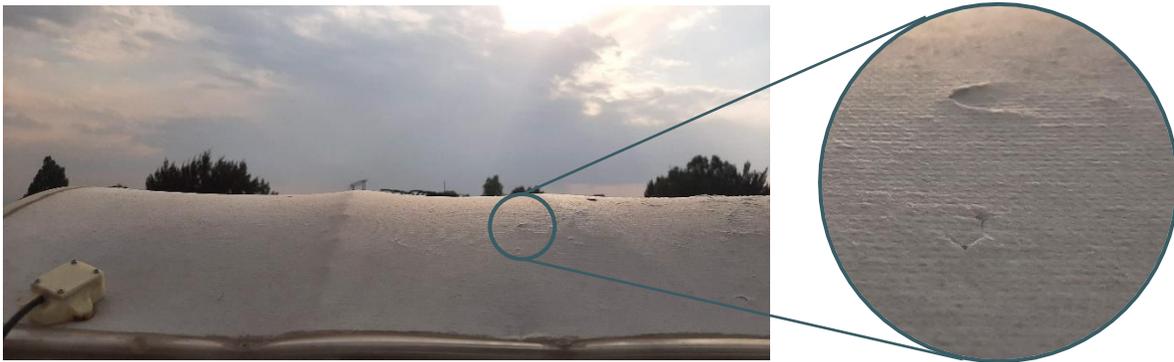


Figura 36. Detalle de fisuras en la superficie exterior de la manta de aerogel. Fotografías de Sandra P. Bastida R. 2022.

La cubierta de PVC mostró una mayor adherencia a las partículas de polvo en la superficie exterior respecto al aerogel y PTFE. En un periodo de 7 días, entre el proceso de limpieza de las cubiertas, el material presentó una mayor cantidad de polvo que en los materiales restantes. Esto influyó en el periodo de mantenimiento que requirió la cubierta de PVC durante el periodo de estudio, el cual fue más constante que los demás (3 veces a la semana). El aerogel presentó dificultades para elaborar el proceso de limpieza, debido a su estructura porosa en la superficie exterior, exigiendo un mayor tiempo en el mantenimiento. Por el contrario, la cubierta con PTFE presentó la menor adherencia de partículas de polvo y tiempo de mantenimiento durante la experimentación.

La cubierta de aerogel presentó el mayor cambio de color durante la experimentación por la suciedad y polvo acumulado y la exposición a la radiación sola, respecto a las cubiertas restantes; mientras que en la cubierta de PTFE ocurrió lo contrario. De acuerdo al sistema de color de Munsell, los colores identificados en la superficie exterior de las cubiertas, durante el inicio y final de la experimentación, son 10RP 9/1 y 10BG 8/1 en el aerogel, 10RP 8/1 y 5PB 9/1 en el PTFE y N 8.75/ y N 9.5/ (escala de valores neutros) en el PVC (Munsell Color

Company 2023a). Estos cambios de color en la superficie del material son homogéneos, por lo que representan el 100 % de la composición de la cubierta (ver *Figura 37*).

Cabe destacar que, el reporte fotográfico muestra diferentes tonalidades de color en la superficie exterior de los materiales de estudio durante la experimentación, debido a la disponibilidad lumínica por el tipo de cielo durante en el horario de la captura y la cantidad de polvo.

INICIO			FINAL		
Aerogel	PTFE	PVC	Aerogel	PTFE	PVC
SISTEMA DE COLOR DE MUNSELL					
10RP 9/1	10RP 8/1	N 8.75/ (Escala de valores neutros)	10BG 8/1	5PB 9/1	N 9.5/ (Escala de valores neutros)

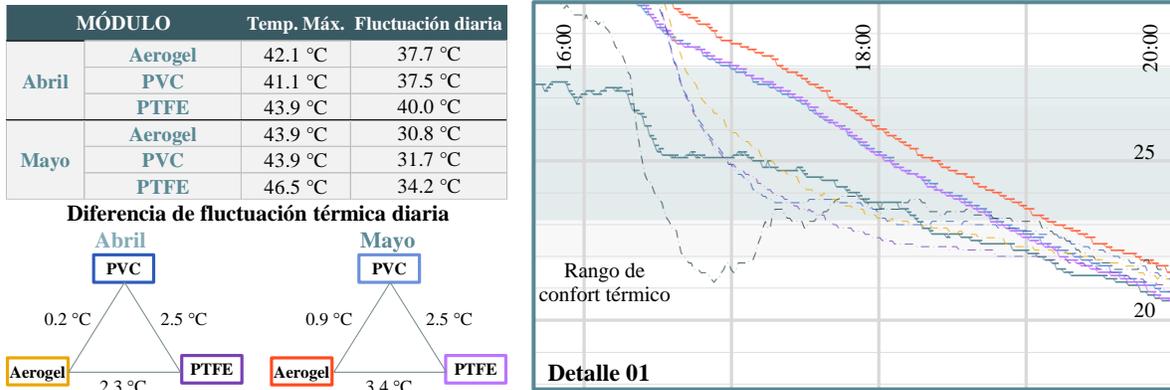
Figura 37. Comparación de colores de las cubiertas respecto a la Tabla de color Munsell, al inicio y final de la experimentación. Elaboración propia con fotografías de Sandra P. Bastida R. 2022 y datos obtenidos de Munsell Color Company (2023b); Werth (2023).

5.2 La cubierta durante la temporada cálida

Se realizó un análisis estadístico de las mediciones, obtenidas por los módulos de prueba instrumentados, para analizar, caracterizar y comparar las condiciones térmicas y lumínicas durante los días de estudio de la temporada cálida (correspondientes a los meses de abril y mayo).

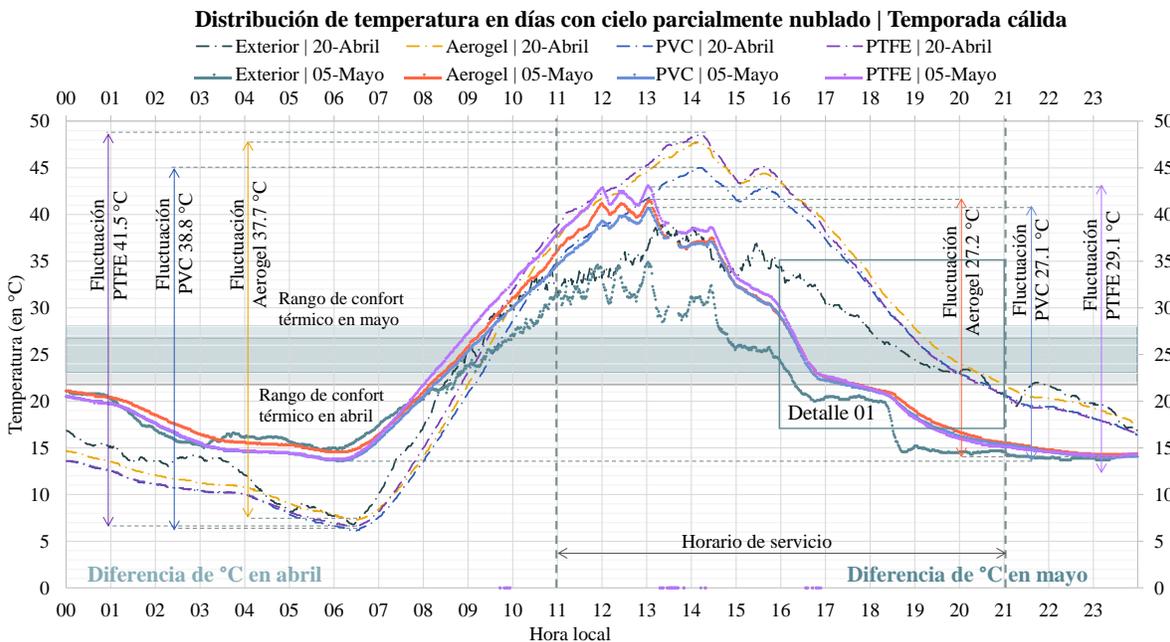
La caracterización del comportamiento térmico consiste en el análisis de la distribución de temperatura interior y sobre la superficie exterior de la cubierta y la comparación de la fluctuación térmica diaria de los tres módulos de prueba en los tres tipos de cielo. El análisis de la distribución térmica, en cada día de estudio, identifica la tendencia diaria de temperatura, temperatura máxima, fluctuación térmica diaria, diferencia de fluctuación térmica diaria entre los tres módulos de prueba y el tiempo dentro/debajo de la zona de confort térmico.

La caracterización del comportamiento lumínico se refiere al análisis de la distribución de iluminancia interior; con el objetivo de identificar la tendencia diaria para cada tipo de cielo, iluminancia máxima, diferencia de iluminancia máxima entre los tres módulos de prueba y el tiempo dentro/debajo de la zona de confort lumínica.



Gráfica 16. Detalle de la distribución de temperatura y diferencia de fluctuaciones térmicas en días con CD, temporada cálida. Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

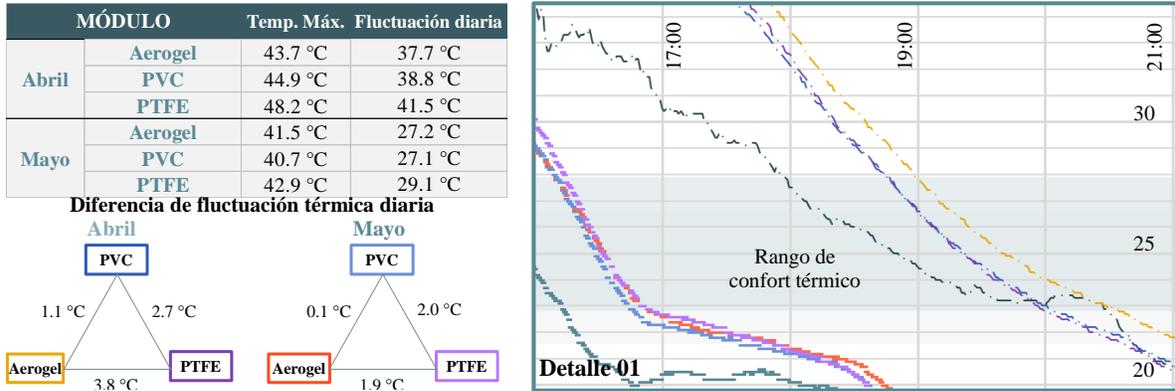
La temperatura interior en los días representativos con *cielo parcialmente nublado* (CPN) muestra una tendencia a aumentar de manera uniforme en la mañana-miércoles y, en el mediodía-atardecer, los cambios de temperatura son irregulares (ver *Gráfica 17*). Los días identificados como CPN en la temporada cálida son el 20 de abril y el 05 de mayo.



Gráfica 17. Comparación de la distribución de temperatura de los módulos de prueba en días con CPN, temporada cálida. Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio, 2022.

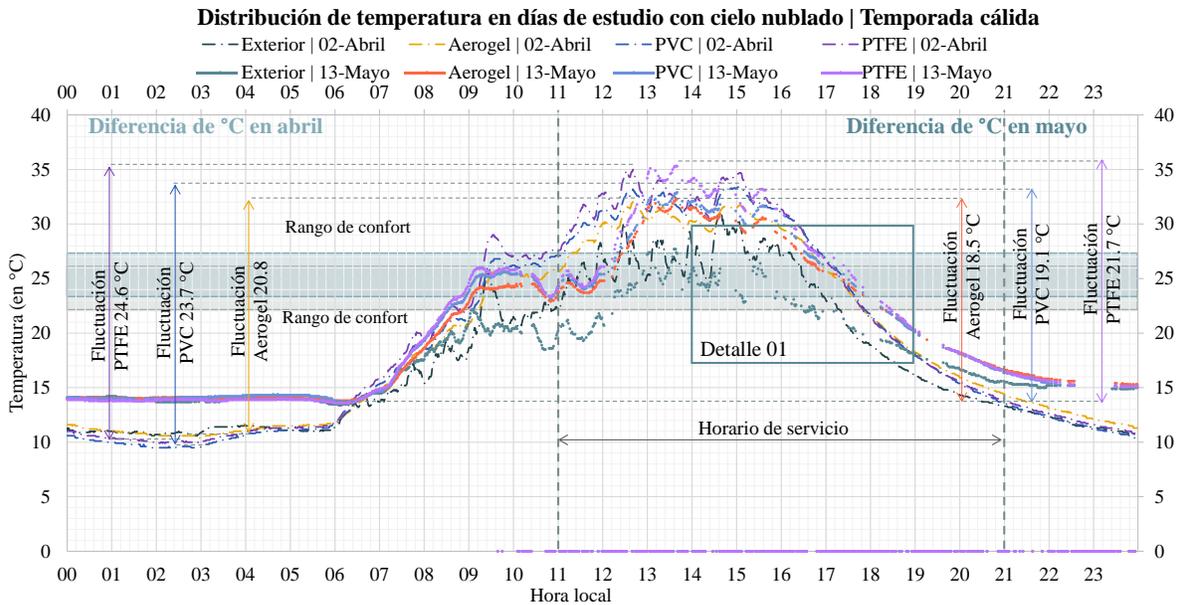
El 20 de abril, la temperatura interior permanece dentro de la ZCT por 108 min en el módulo con aerogel, 99 min en el PVC y 91 min en el PTFE (el 18, 16.5 y 15.2 % del horario operativo, respectivamente). La temperatura interior se encuentra debajo de la ZCT por 1 min en el aerogel, 24 min en el PVC y 32 min en el PTFE. La temperatura máxima presenta la menor diferencia respecto a la ZCT en el módulo con PVC (18.1 °C); mientras que, la mayor diferencia es en el PTFE (21.6 °C).

El 05 de mayo, la temperatura permanece dentro de la ZCT por 77 min en el módulo con aerogel, 63 min en el PVC y 72 min en el PTFE, representando el 12.8, 10.5 y 12 % del horario operativo, respectivamente. La temperatura se encuentra debajo de la ZCT por 208 min en el aerogel, 222 min en el PVC y 209 en el PTFE. La temperatura máxima presenta la menor diferencia entre la ZCT en el PVC (13.7 °C); mientras que, la mayor diferencia se presenta en el PTFE (16.1 °C) (ver *Gráfica 18*).



Gráfica 18. Detalle de la distribución de temperatura y diferencia de fluctuaciones térmicas en días con CPN, temporada cálida. Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

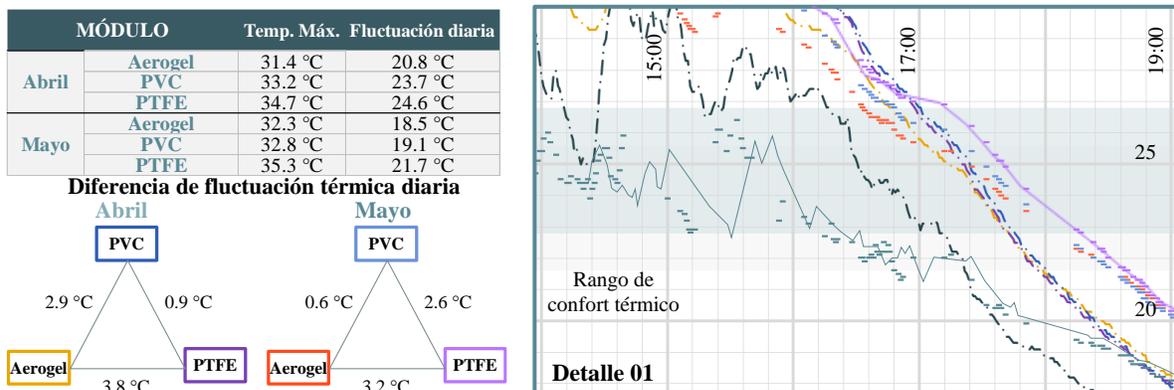
La temperatura interior, en los días representativos con un *cielo nublado* (CN), muestra una tendencia a incrementar y disminuir de manera constante durante el día; por lo tanto, la cantidad de horas frías aumenta durante el horario de servicio (ver *Gráfica 19*). Los días identificados como CN en la temporada cálida son el 02 de abril y el 13 de mayo.



Gráfica 19. Comparación de la distribución de temperatura de los módulos de prueba en días con CN, temporada cálida. Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

El 02 de abril, la temperatura permanece dentro de la ZCT por 85 min en el módulo con aerogel, 59 min en el PVC y 57 min en el PTFE, representando el 14.2, 9.8 y 9.5 % del horario operativo, respectivamente. La temperatura se encuentra debajo de la ZCT por 185 min en el aerogel, 182 min en el PVC y 186 en el PTFE. La temperatura máxima presenta la menor diferencia entre la ZCT en el aerogel (5.2 °C); mientras que, la mayor diferencia se presenta en el PTFE (8.1 °C).

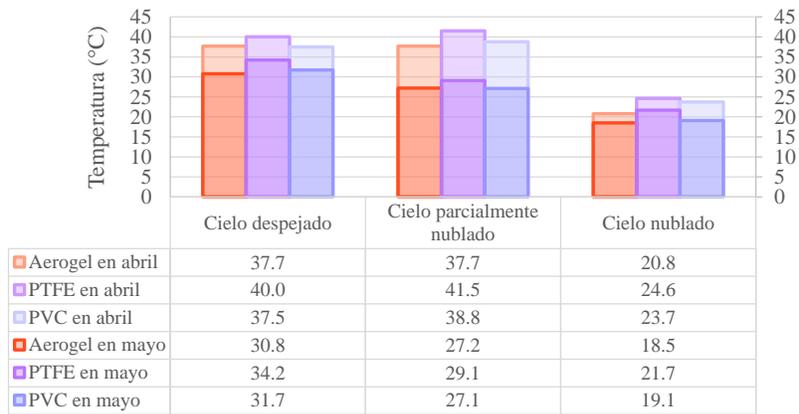
El 13 de mayo, la temperatura permanece dentro de la ZCT por 195 min en el módulo con aerogel, 182 min en el PVC y 168 min en el PTFE, representando el 32.5, 30.3 y 28 % del horario operativo, respectivamente. La temperatura se encuentra debajo de la ZCT por 157 min en el aerogel y PVC y 150 min en el PTFE. La temperatura máxima presenta la menor diferencia entre la ZCT en el módulo con aerogel (5.3 °C); mientras que, la mayor diferencia se presenta en el PTFE (8.3 °C) (ver *Gráfica 20*).



Gráfica 20. Detalle de la distribución de temperatura y diferencia de fluctuaciones térmicas en días con CN, temporada cálida. Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

La fluctuación térmica diaria en los módulos de prueba es considerablemente variante en los tres tipos de cielo (ver *Gráfica 21*). La fluctuación térmica diaria, en los tres tipos de cielo, es menor en el módulo con aerogel que en los módulos restantes, con un valor promedio de 28.7 °C. La fluctuación térmica promedio, en el módulo con aerogel, es de 34.2 °C en CD, 32.4 °C en CPN y 19.6 °C en CN.

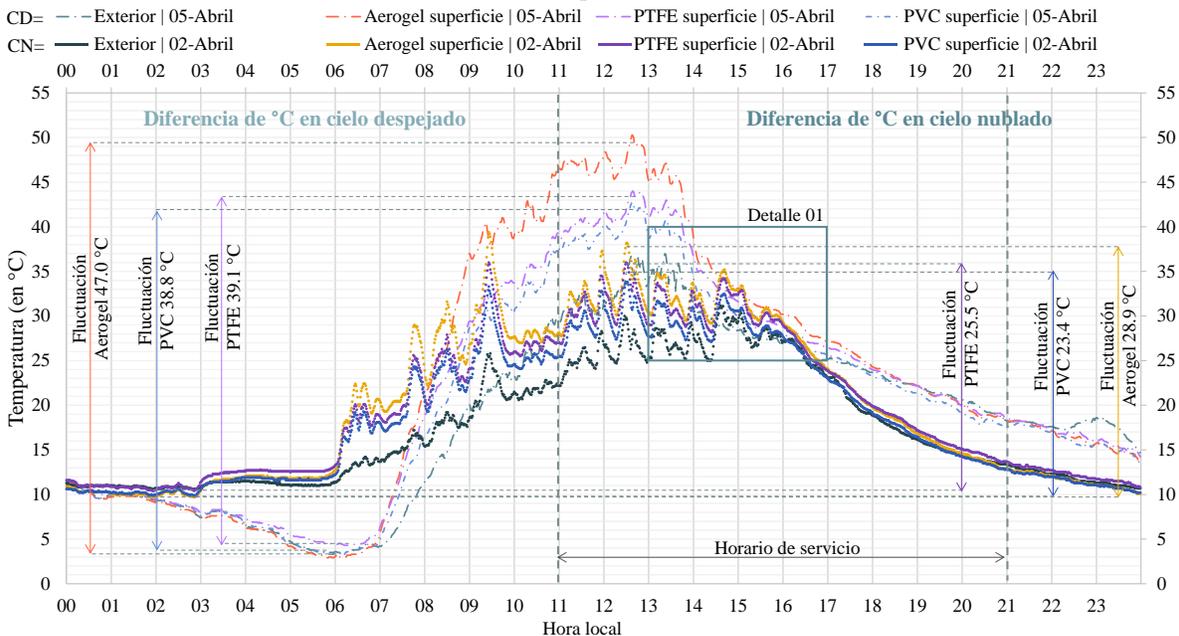
Comparativa de fluctuación de temperaturas interiores entre materiales



Gráfica 21. Comparación de la fluctuación térmica diaria del interior de los módulos en la temporada cálida. Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

La temperatura, en la superficie exterior de las cubiertas, muestra una tendencia a un mayor aumento en el amanecer, durante los días con cielo despejado y nublado; mientras que, en el horario operativo, la temperatura disminuye considerablemente y los valores comienzan a ser semejantes entre los módulos (ver *Gráfica 22* y *Gráfica 23*). Los días que se seleccionaron para analizar la distribución de la temperatura sobre la superficie exterior de la cubierta de los módulos son el 05 de abril (CD) y el 02 de abril (CN).

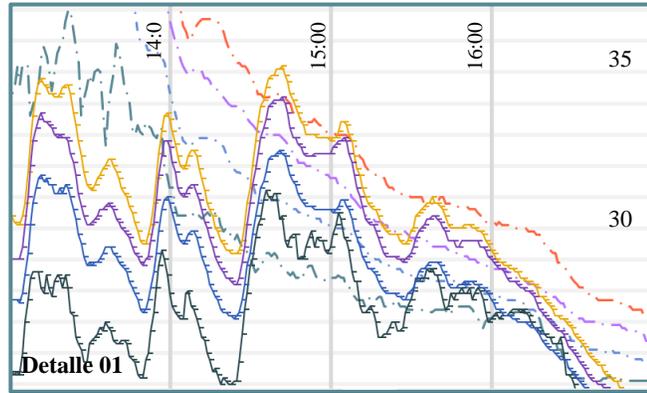
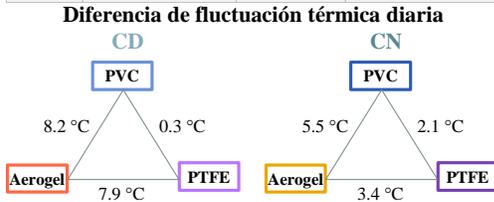
Distribución de temperatura sobre la superficie exterior del material en un cielo despejado y nublado | Temporada cálida



Gráfica 22. Distribución de la temperatura sobre la superficie exterior del material en un CD y CN de abril. Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

La temperatura, en la superficie exterior, es menor en el módulo con PVC que los módulos restantes, durante los días con CD y CN. Por el contrario, la temperatura es mayor en el módulo con aerogel que en los demás.

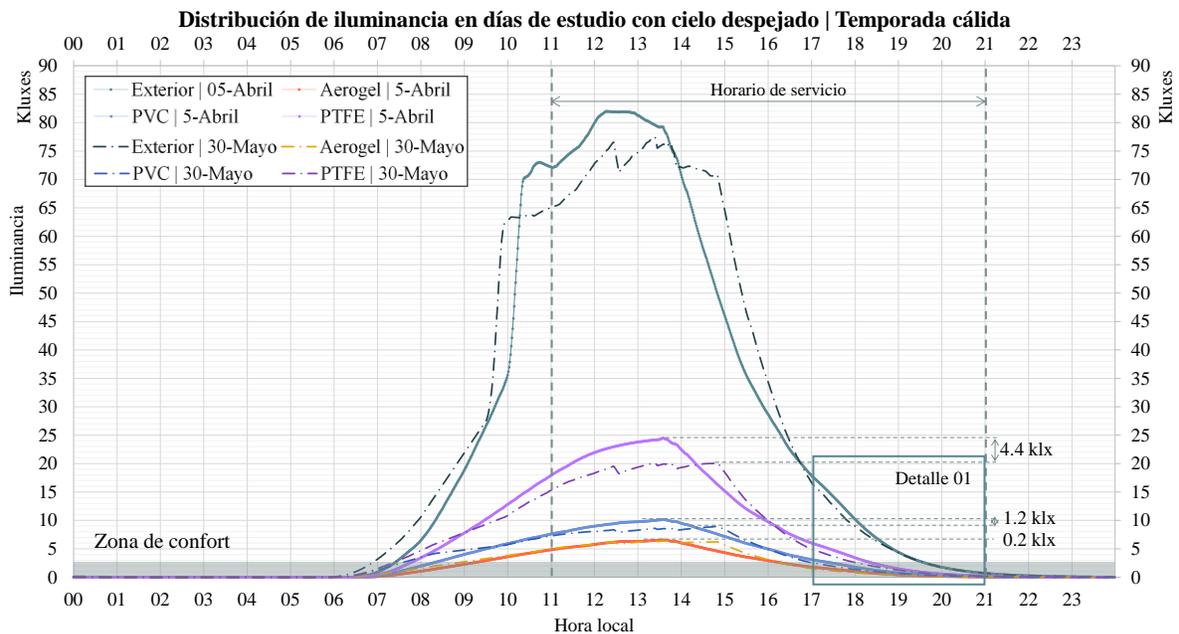
MÓDULO		Temp. Máx.	Fluctuación diaria
CD= 05 de abril	Aerogel	50.0 °C	47.0 °C
	PVC	42.1 °C	38.8 °C
	PTFE	43.5 °C	39.1 °C
CN= 02 de abril	Aerogel	38.8 °C	28.9 °C
	PVC	33.3 °C	23.4 °C
	PTFE	36.0 °C	25.5 °C



Gráfica 23. Detalle de la distribución de temperatura y la diferencia de fluctuaciones térmicas diarias en CD y CN de abril. Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

5.2.2 Comportamiento lumínico.

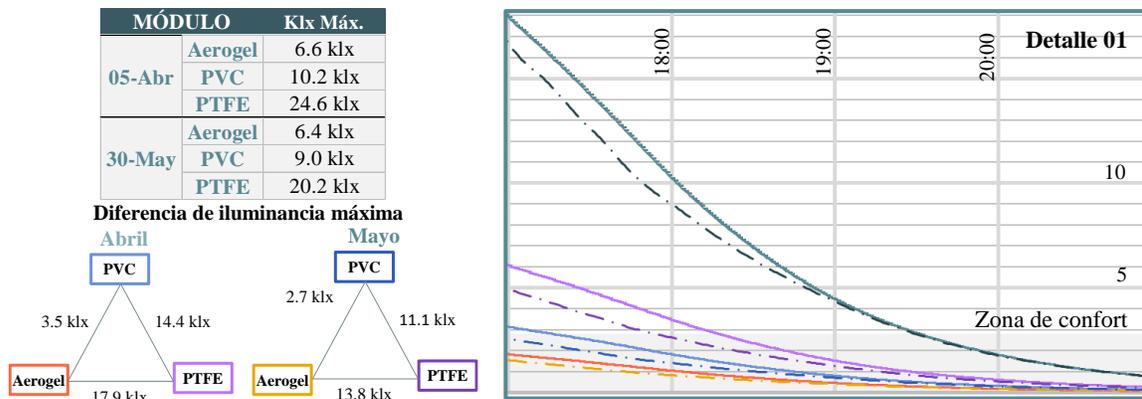
La distribución de la iluminancia en el exterior tiene una tendencia a incrementar y disminuir de manera uniforme, durante el día con CD. Mientras tanto, la distribución de la iluminancia en los módulos de prueba tiene una menor aceleración en el amanecer-atardecer que en el atardecer-anocheecer. Por lo tanto, la iluminancia máxima, en los módulos, se presenta una hora después que en el exterior (ver *Gráfica 24*). Los días representativos de CD en la temporada cálida son el 05 de abril y 30 de mayo.



Gráfica 24. Comparación de la distribución de iluminancia de los módulos de prueba en días con CD, temporada cálida. Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

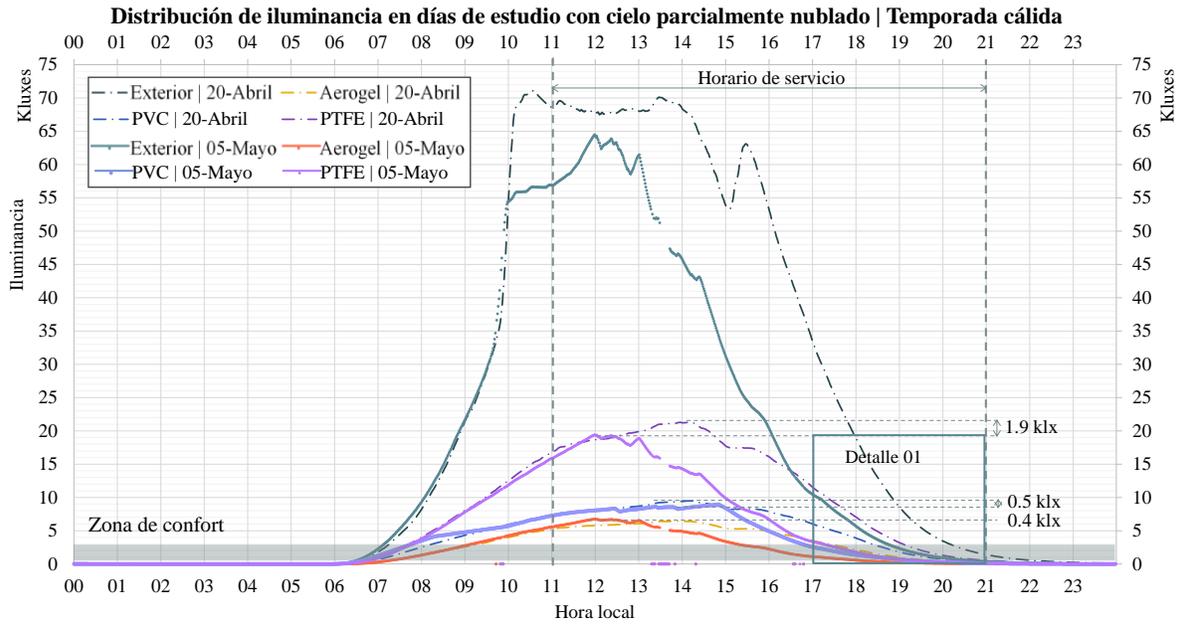
El 05 de abril, la iluminancia se encuentra dentro de la ZCE por 211 min en el aerogel, 178 min en el PVC y 156 min en el PTFE, representando el 35.2, 29.7 y 26 % del horario de servicio, respectivamente. La iluminancia se encuentra debajo de la ZCE por 91 min en el aerogel, 55 min en el PVC y 12 min en el PTFE. El cambio de la iluminancia, en el módulo con aerogel, muestra un ritmo menor y uniforme durante el día que los módulos restantes. La iluminancia máxima presenta la menor diferencia entre el valor máximo de confort en el módulo con aerogel (3.59 klx); mientras que, la mayor diferencia se presenta en el módulo con PTFE (21.56 klx).

El 30 de mayo, la iluminancia se encuentra dentro de la ZCE por 195 min en el módulo con aerogel, 190 min en el PVC y 168 min en el PTFE, representando el 32.5, 31.7 y 28 % del horario de servicio, respectivamente. La iluminancia se encuentra debajo de la ZCE por 101 min en el aerogel, 63 min en el PVC y 24 min en el PTFE. El cambio de la iluminancia, en el módulo con PTFE, incrementa de manera considerable en el amanecer; a mediodía presenta variaciones evidentes y en el atardecer desciende a un ritmo mayor que en los módulos restantes. La iluminancia máxima presenta la menor diferencia entre el valor máximo de confort en el aerogel (3.4 klx); mientras que, la mayor diferencia se presenta en el módulo con PTFE (17.2 klx) (ver *Gráfica 25*).



Gráfica 25. Detalle de la distribución de iluminancia y diferencia de valores máximos en días con CD, temporada cálida. Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

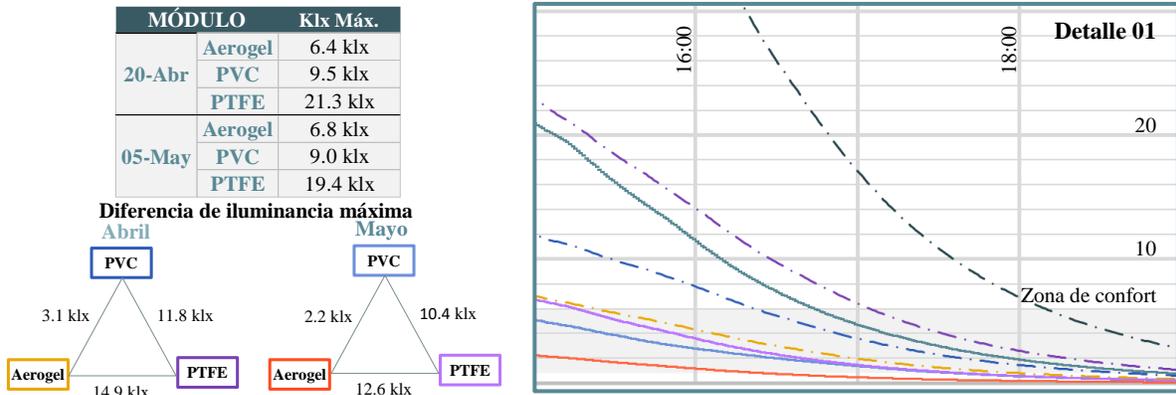
La distribución de la iluminancia interior en un CPN muestra un comportamiento irregular por las variaciones en el mediodía y atardecer y, en el horario de servicio, la distribución comienza a descender (ver *Gráfica 26*). Los días representativos de CPN en la temporada cálida son el 20 de abril y 05 de mayo.



Gráfica 26. Comparación de la distribución de iluminancia de los módulos de prueba en días con CPN, temporada cálida. Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

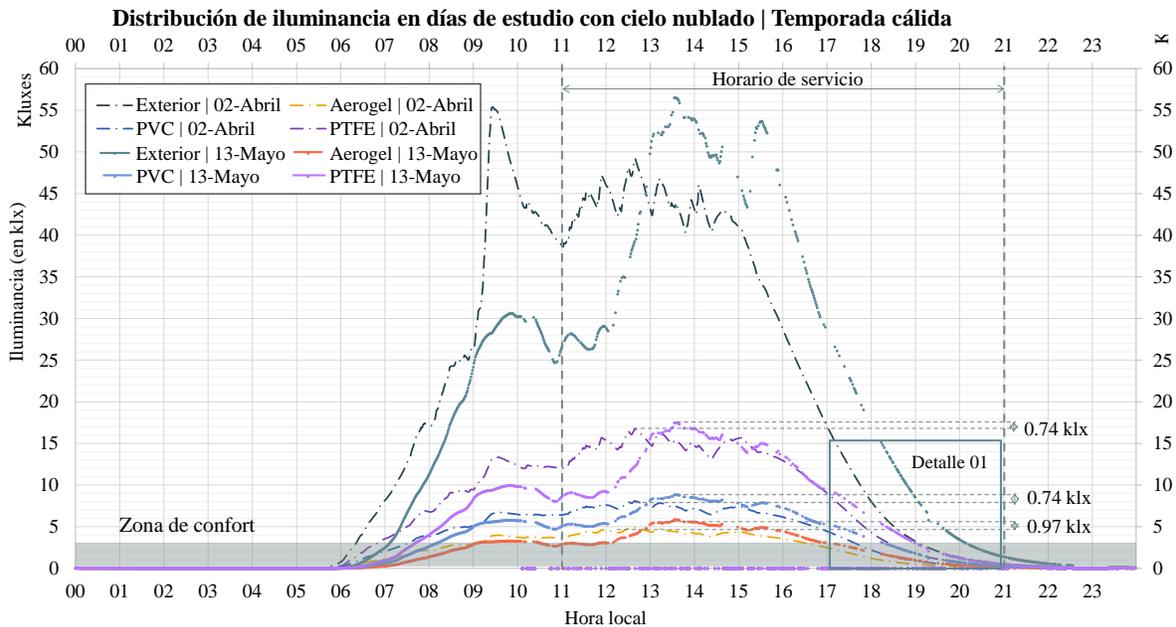
El 20 de abril, la iluminancia se encuentra dentro de la ZCE por 177 min en el módulo con aerogel, 155 min en el PVC y 116 min en el PTFE, representando el 29.5, 25.8 y 19.3 % del horario operativo, respectivamente. La iluminancia está debajo de la ZCE por 40 min en el aerogel y 2 min en el PVC. La iluminancia máxima, en el módulo con aerogel, tiene la menor diferencia con el valor máximo de confort (3.4 klx); mientras que, en el PTFE, se presenta la mayor diferencia (18.3 klx).

El 05 de mayo, la iluminancia se encuentra dentro de la ZCE por 207 min en el aerogel, 181 min en el PVC y 164 min en el PTFE, en el horario de servicio. La iluminancia está debajo de la ZCE por 136 min en el aerogel, 99 min en el PVC y 60 min en el PTFE. La iluminancia máxima, en el aerogel, tiene la menor diferencia con el valor máximo óptimo (3.8 klx); mientras que, en el PTFE, ocurre lo contrario (16.4 klx) (ver *Gráfica 27*).



Gráfica 27. Detalle de la distribución de iluminancia y diferencia de valores máximos en días con CPN, temporada cálida. Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

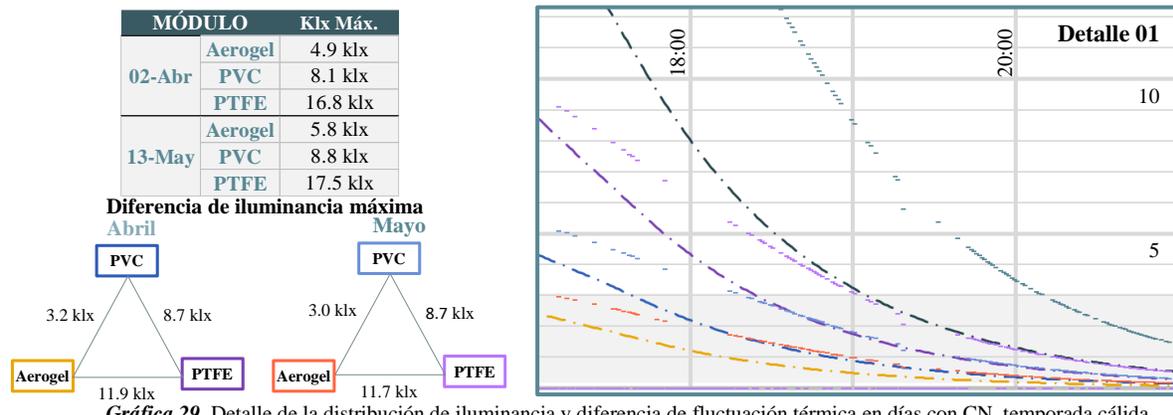
La distribución de la iluminancia interior tiene un incremento en las variaciones durante el día con CN, por lo que la distribución irregular es mayor que en los demás tipos de cielo (ver *Gráfica 28*). Los días representativos de CN en la temporada cálida son el 02 de abril y 13 de mayo.



Gráfica 28. Comparación de la distribución de iluminancia de los módulos de prueba en días con CN en temporada cálida. Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

El 02 de abril, la iluminancia se encuentra dentro de la ZCE por 180 min en el módulo con aerogel, 154 min en el PVC y 152 min en el PTFE, representando el 30, 25.7 y 25.3 % del horario de servicio, respectivamente. La iluminancia permanece debajo de la ZCE por 87 min en el aerogel, 47 min en el PVC y 3 min en el PTFE. La iluminancia máxima, en el módulo con aerogel, presenta la menor diferencia con el valor máximo de confort (1.9 klx); mientras que, en el módulo con PTFE, se presenta la mayor diferencia (13.8 klx).

El 13 de mayo, la iluminancia se encuentra dentro de la ZCE por 237 min en el módulo con aerogel, 159 min en el PVC y 116 min en el PTFE, representando el 39.5, 26.5 y 19.3 % del horario de servicio, respectivamente. La iluminancia permanece debajo de la ZCE por 41 min en el aerogel. La iluminancia tiene una mayor distribución uniforme en el módulo con aerogel que en los módulos restantes. La iluminancia máxima, en el módulo con aerogel, presenta la menor diferencia con el valor máximo de confort (2.8 klx); mientras que, en el módulo con PTFE, se presenta la mayor diferencia (14.5 klx) (ver *Gráfica 29*).



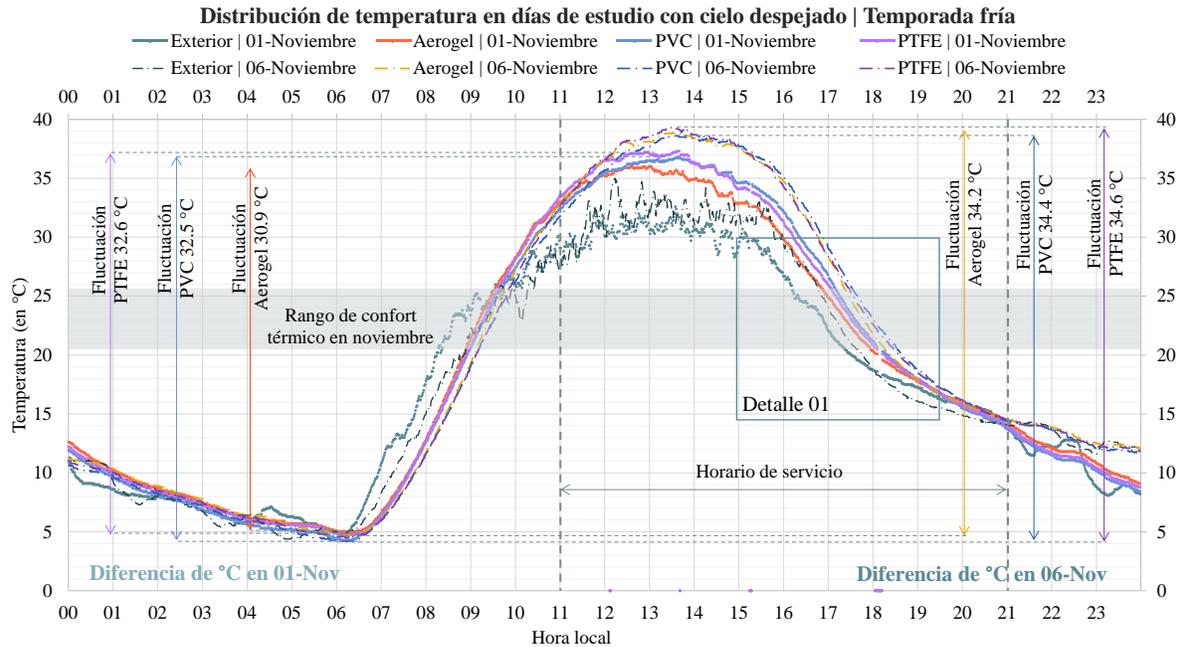
Gráfica 29. Detalle de la distribución de iluminancia y diferencia de fluctuación térmica en días con CN, temporada cálida. Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

5.3 La cubierta durante la temporada fría

Al igual que el análisis anterior, las mediciones registradas durante la temporada fría son analizadas para caracterizar y comparar las condiciones térmicas y lumínicas en los días representativos de cada tipo de cielo (correspondientes a los meses de noviembre y diciembre). Por lo tanto, el procedimiento para obtener la caracterización del comportamiento térmico y lumínico de las cubiertas translúcidas en la temporada cálida es semejante al análisis de la temporada cálida.

5.3.1 Comportamiento térmico.

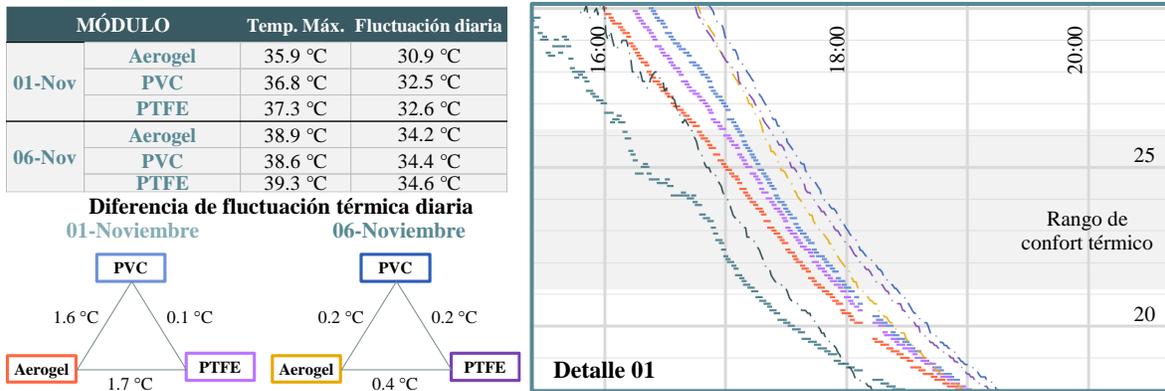
La distribución de la temperatura en días con CD de la temporada fría es similar entre los módulos durante el amanecer y, en el horario de servicio, la temperatura comienza a disminuir de manera similar y uniforme (ver *Gráfica 30*). Los días identificados como CD en la temporada fría son el 01 y 06 de noviembre.



Gráfica 30. Comparación de la distribución de temperatura de los módulos de prueba en días con CD, temporada fría. Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

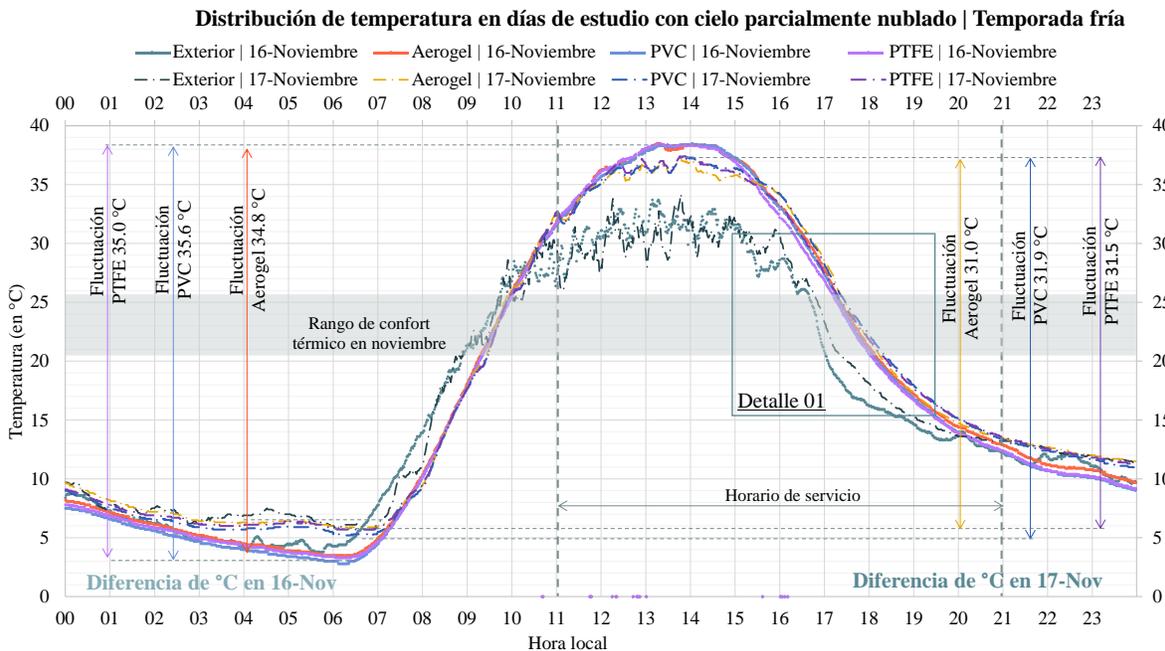
El 01 de noviembre, la temperatura permanece dentro de la ZCT por 67 min en el módulo con aerogel, 53 min en el PVC y 59 min en el PTFE, representando el 11.2, 8.8 y 9.8 % del horario operativo, respectivamente. La temperatura se encuentra debajo de la ZCT por 185 min en el aerogel y 181 min en el PVC y PTFE. La temperatura máxima, en el aerogel, presenta la menor diferencia con la ZCT (10.6 °C); mientras que, en el PTFE, se presenta la mayor diferencia (11.9 °C).

El 06 de noviembre, la temperatura permanece dentro de la ZCT por 54 min en el aerogel y 61 min en el PVC y PTFE, representando el 9 y 10.2 % del horario operativo, respectivamente. La temperatura permanece debajo de la ZCT por 162 min en el aerogel, 145 min en el PVC y 150 min en el PTFE. La temperatura máxima, en el PVC, tiene la menor diferencia con la ZCT (13.2 °C); mientras que, en el PTFE, se presenta la mayor diferencia (13.9 °C) (ver *Gráfica 31*).



Gráfica 31. Detalle de la distribución de temperatura y diferencia de fluctuación térmica en días con CD, temporada fría. Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

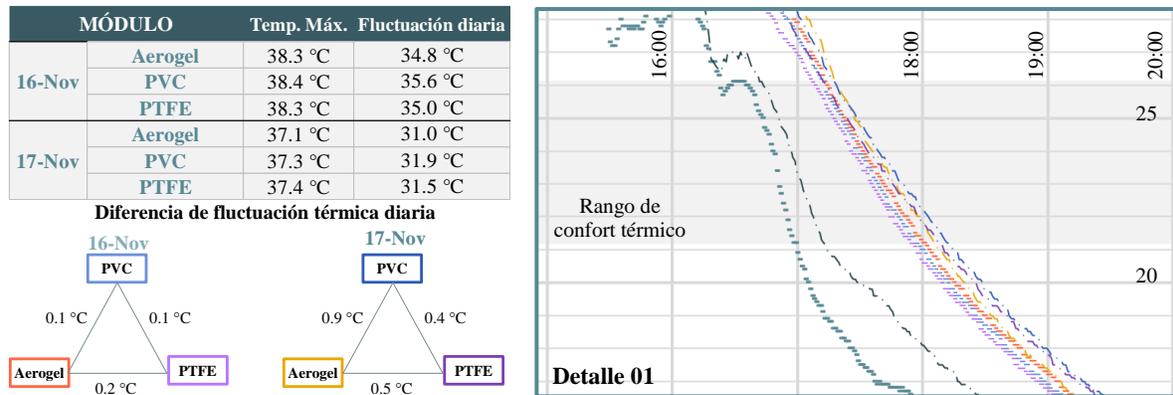
La temperatura en el interior de los módulos tiene un comportamiento similar durante el amanecer en un CPN; en el mediodía, el comportamiento es irregular y, en el atardecer, la caída es considerablemente rápida (ver *Gráfica 32*). Los días identificados como CPN en la temporada fría son el 16 y 17 de noviembre.



Gráfica 32. Comparación de la distribución de temperatura de los módulos de prueba en días con CPN, temporada fría. Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

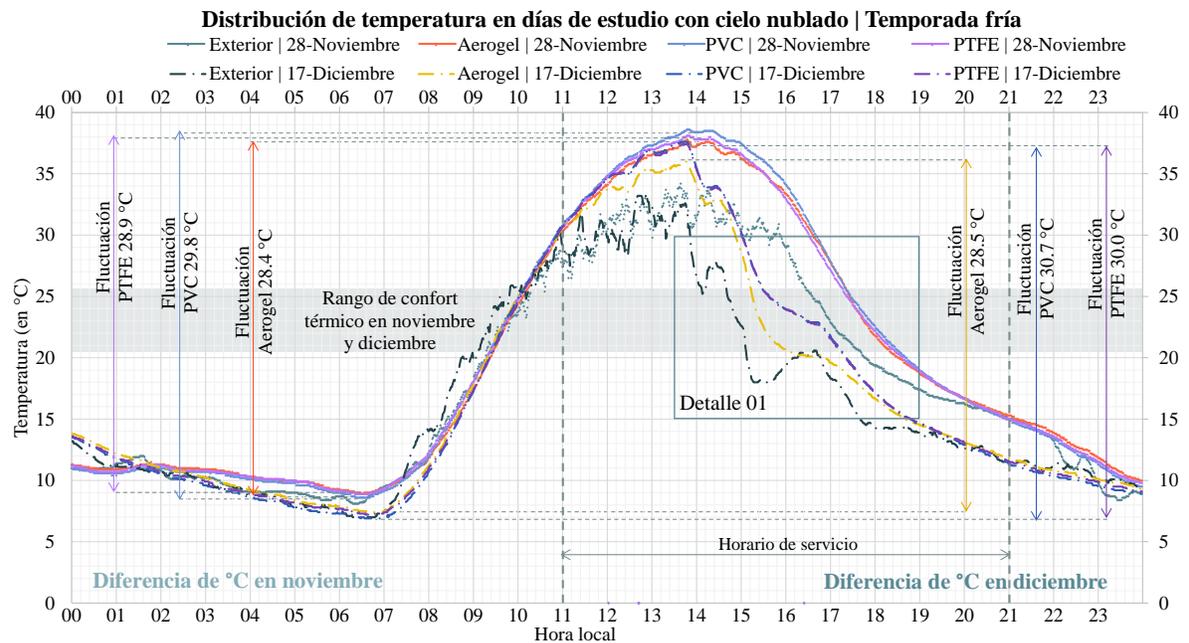
El 16 de noviembre, la temperatura permanece dentro de la ZCT por 52 min en el aerogel y PTFE y 50 min en el PVC (representa el 8.7 y 8.3 % del horario operativo, respectivamente). La temperatura se encuentra debajo de la ZCT por 170 min en el aerogel, 174 min en el PVC y 176 en el PTFE. La temperatura máxima, en los módulos, presenta una diferencia con la ZCT de 13.1 °C.

El 17 de noviembre, la temperatura permanece dentro de la ZCT por 52 min en el módulo con aerogel, 59 min en el PVC y 62 min en el PTFE (el 8.7, 9.8 y 10.3 % del horario operativo, respectivamente). La temperatura permanece debajo de la ZCT por 164 min en el aerogel, 157 min en el PVC y 160 min en el PTFE. La temperatura máxima, en el módulo con aerogel, tiene la menor diferencia con la ZCT (con 11.7 °C); mientras que, en el módulo con PTFE, se presenta la mayor diferencia (con 12.0 °C) (ver *Gráfica 33*).



Gráfica 33. Detalle de la distribución de temperatura y diferencia de fluctuación térmica en días con CPN, temporada fría. Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

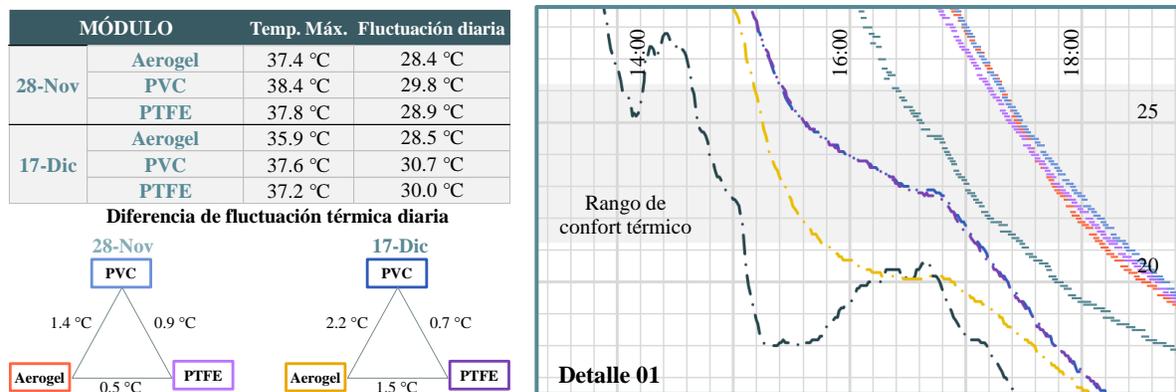
La temperatura interior, en los días representativos de un CN de la temporada fría, muestra un incremento y decremento evidente durante el día. Además, la temperatura durante el horario operativo muestra un comportamiento irregular y los valores máximos disminuyen (ver *Gráfica 34*). Los días identificados como CN son el 28 de noviembre y 17 de diciembre.



Gráfica 34. Comparación de la distribución de temperatura de los módulos de prueba en días con CN, temporada fría. Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

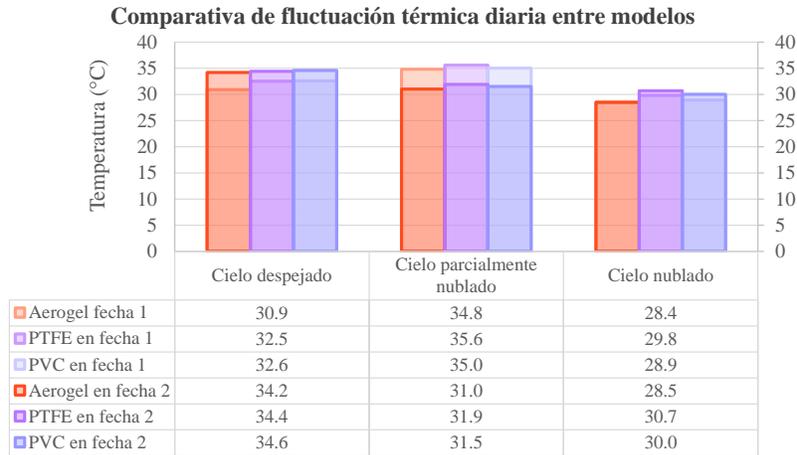
El 28 de noviembre, la temperatura permanece dentro de la ZCT por 61 min en el aerogel y 72 min en el PVC y 73 min en el PTFE, representando el 10.2, 12 y 12.2 % del horario operativo, respectivamente. La temperatura permanece debajo de la ZCT por 157 min en el aerogel, 145 min en el PVC y 150 min en el PTFE. La temperatura máxima, en el aerogel, presenta la menor diferencia con la ZCT (con 12.4 °C); mientras que, en el PVC, se presenta la mayor diferencia (13.2 °C).

El 17 de diciembre, la temperatura permanece dentro de la ZCT por 58 min en el aerogel y 107 min en el PVC y 106 min en el PTFE, representando el 9.7, 17.8 y 17.7 % del horario operativo, respectivamente. La temperatura permanece debajo de la ZCT por 289 min en el aerogel, 223 min en el PVC y 224 min en el PTFE. La temperatura máxima, en el aerogel, tiene la menor diferencia con la ZCT (10.6 °C); mientras que, en el PVC, se presenta la mayor diferencia (12.2 °C) (ver *Gráfica 35*).



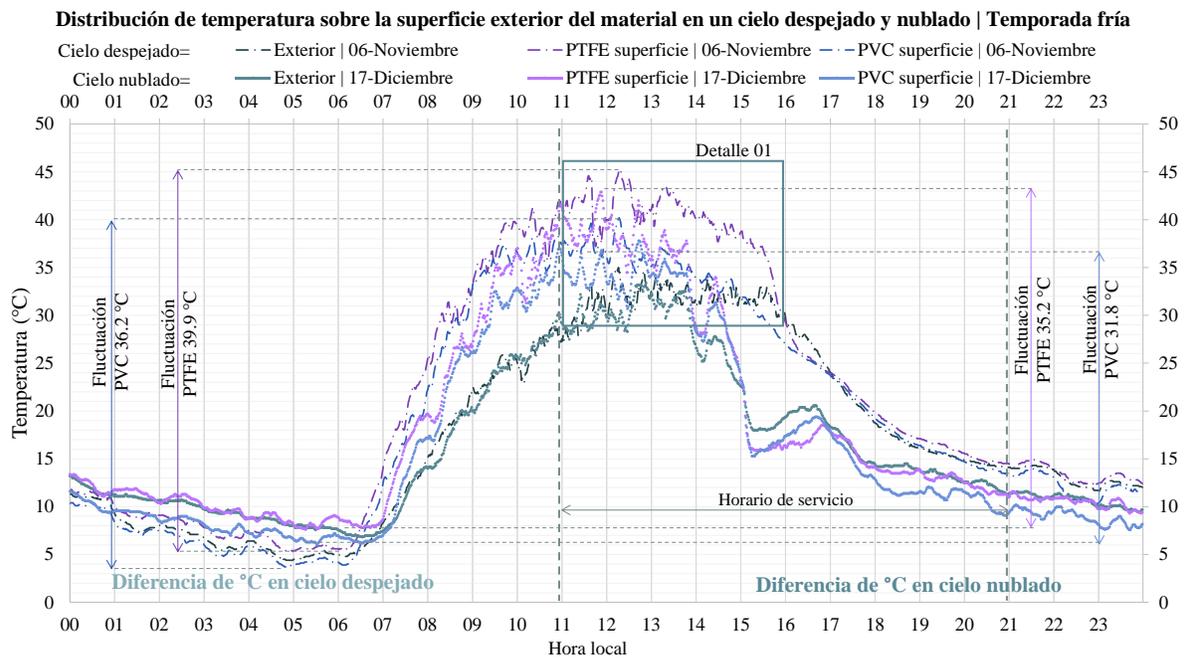
Gráfica 35. Detalle de la distribución de temperatura y diferencia de fluctuación térmica en días con CN, temporada fría. Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

La fluctuación térmica diaria, en los módulos, tiene una mínima diferencia en los tipos de cielo que en la temporada cálida (ver *Gráfica 36*). La fluctuación térmica diaria es similar en los módulos con PVC y PTFE, durante los días con cielo despejado y nublado. La fluctuación térmica es menor en el módulo con aerogel, con un valor promedio de 31.3 °C. La fluctuación térmica diaria promedio, en el aerogel, es de 32.5 °C en cielos despejados; 32.9 °C en cielos parcialmente nublados y 28.4 °C en cielos nublados.



Gráfica 36. Comparación de la fluctuación térmica diaria del interior de los módulos en la temporada fría. Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

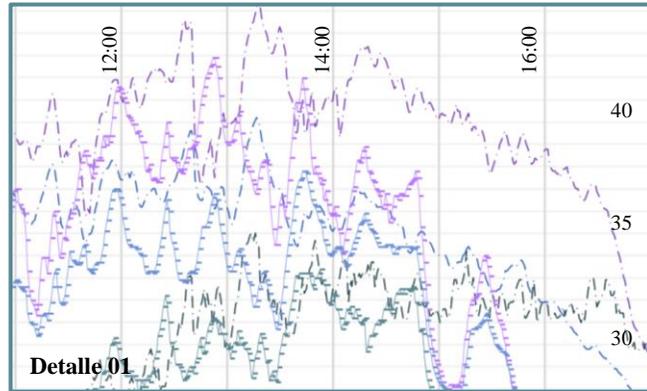
La temperatura, en el amanecer-mediodía, es mayor en la superficie exterior de la cubierta que en el exterior; mientras que, en el mediodía-atardecer, ocurre lo contrario. La temperatura, en un cielo nublado, es mayor en la superficie exterior de la cubierta que en el exterior, durante el horario operativo (ver *Gráfica 37* *Gráfica 38*). Los días que se seleccionaron para analizar la distribución de temperatura en la superficie exterior de la cubierta de los módulos son el 06 de noviembre (CD) y el 17 de diciembre (CN).



Gráfica 37. Distribución de temperatura en la superficie exterior del material en un CD y CN de temporada fría. Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

La distribución de la temperatura durante los días analizados es menor en el módulo con PVC respecto al módulo con PTFE. Sin embargo, la temperatura máxima y fluctuación térmica diaria es mayor en el módulo con PTFE respecto al módulo con PVC y el exterior.

MÓDULO		Temp. Máx.	Fluctuación diaria
CD= 06 de nov	PVC	39.9 °C	36.2 °C
	PTFE	45.3 °C	39.9 °C
CN= 17 de dic	PVC	37.8 °C	31.8 °C
	PTFE	42.9 °C	35.2 °C



Diferencia de fluctuación térmica diaria

Cielo despejado

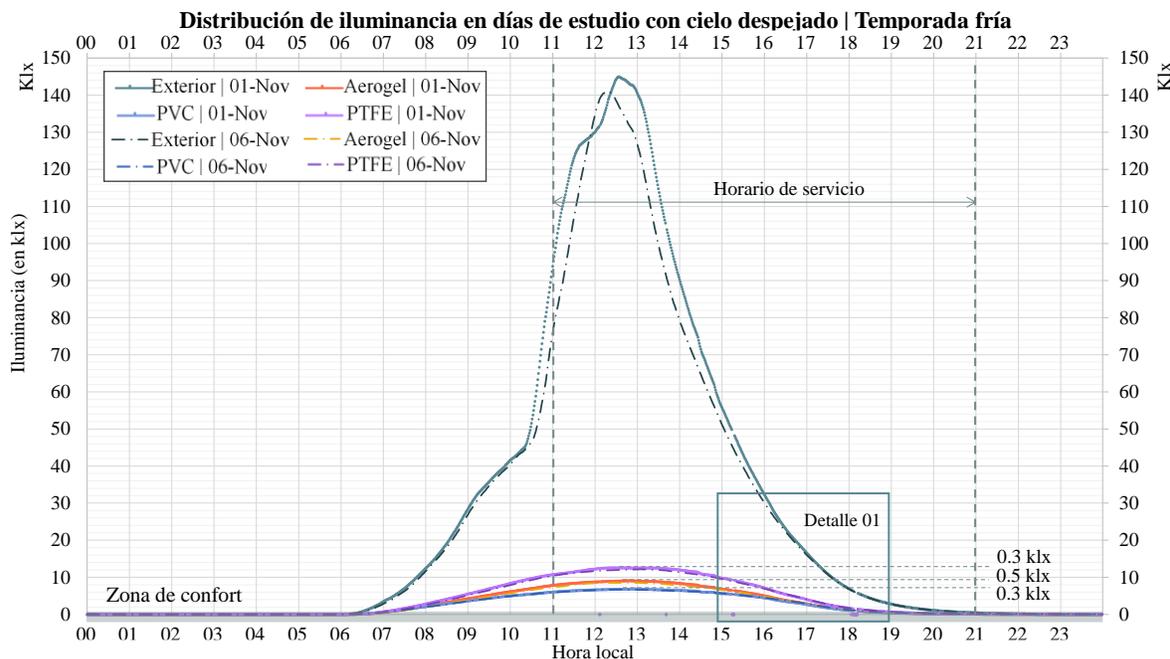
Cielo nublado

PVC	3.7 °C	PTFE	PVC	3.4 °C	PTFE
-----	--------	------	-----	--------	------

Gráfica 38. Distribución de temperatura en la superficie exterior del material en un CD y CN, temporada fría. Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

5.3.2 Comportamiento lumínico.

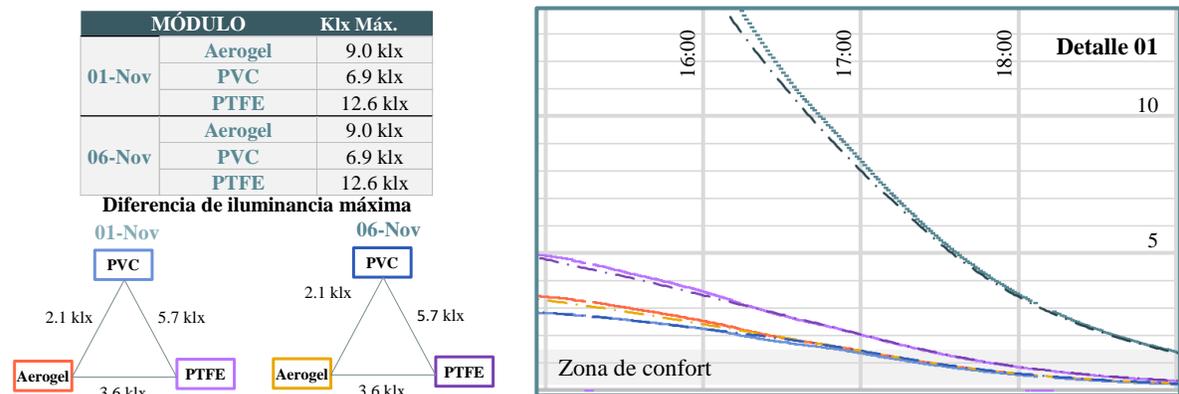
La distribución de la iluminancia en el exterior tiene una tendencia a incrementar y disminuir de manera uniforme y simétrica, durante el día con CD. Mientras tanto, la distribución de la iluminancia interior tiene un incremento y caída similar. La iluminancia máxima en los módulos se presenta media hora después que en el exterior y la distribución de la iluminancia es uniforme durante el horario operativo (ver Gráfica 39). Los días representativos de CD en la temporada fría son el 01 y 06 de noviembre.



Gráfica 39. Comparación de la distribución de iluminancia de los módulos de prueba en días con CD en temporada fría. Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

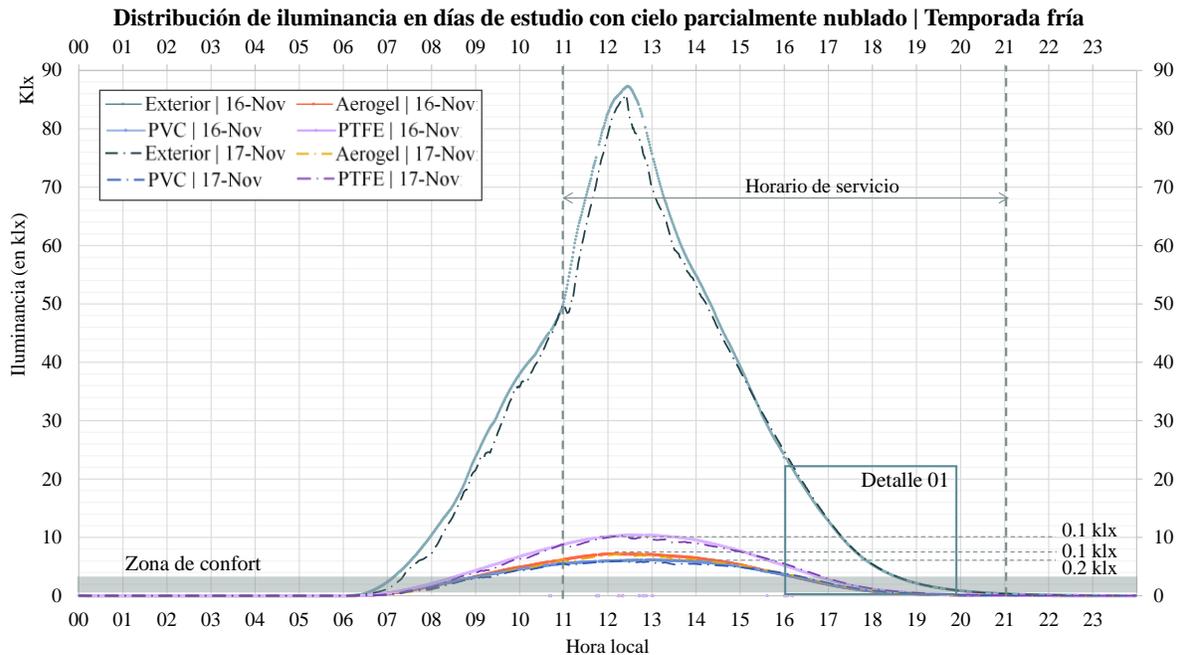
El 01 de noviembre, la iluminancia se encuentra dentro de la ZCE por 149 min en el módulo con aerogel, 151 min en el módulo con PVC y 144 min en el módulo con PTFE, representando el 24.8, 25.2 y 24 % del horario de servicio, respectivamente. La iluminancia se encuentra debajo de la ZCE por 88 min en el aerogel, 92 min en el PVC y 66 min en el PTFE. El cambio de la iluminancia, en el módulo con PVC, muestra un ritmo menor y uniforme durante el día que los módulos restantes. La iluminancia máxima, en el módulo con PVC, presenta la menor diferencia con el valor máximo de confort (3.9 klx); mientras que, en el módulo con PTFE, se presenta la mayor diferencia (9.6 klx).

El 06 de noviembre, la iluminancia se encuentra dentro de la ZCE por 156 min en el aerogel, 157 min en el PVC y 152 min en el PTFE, representando el 26, 26.2 y 25.3 % del horario de servicio, respectivamente. La iluminancia se encuentra debajo de la ZCE por 87 min en el aerogel y PVC y 65 min en el PTFE. La iluminancia máxima, en el PVC, presenta la menor diferencia con el valor máximo de confort (3.7 klx); mientras que, en el PTFE, se presenta la mayor diferencia (9.2 klx) (ver *Gráfica 40*).



Gráfica 40. Detalle de la distribución de iluminancia y diferencia de valores máximos en días con CD en temporada fría
Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

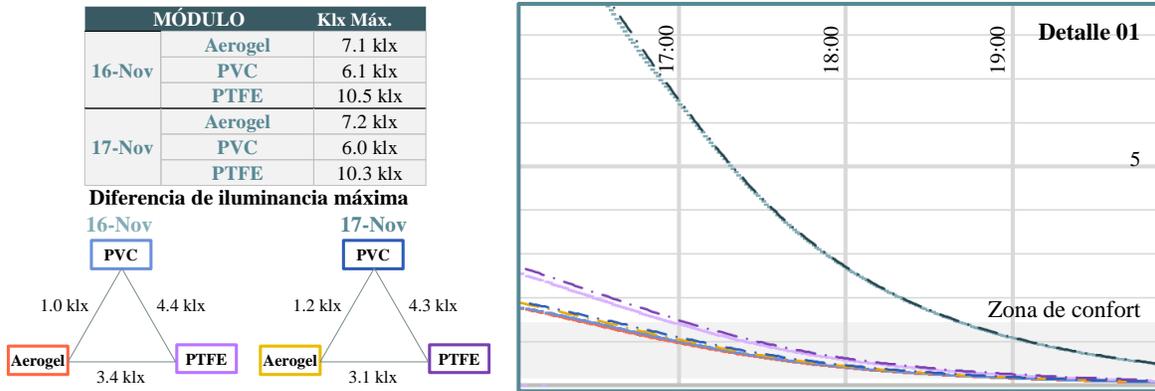
La distribución de la iluminancia interior en un CPN muestra una evidente uniformidad y simetría durante el día; además, se muestran valores semejantes entre los dos días de estudio (ver *Gráfica 41*). Los días representativos de CPN en la temporada fría son el 16 y 17 de noviembre.



Gráfica 41. Comparación de la distribución de iluminancia de los módulos de prueba en días con CPN en temporada fría. Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

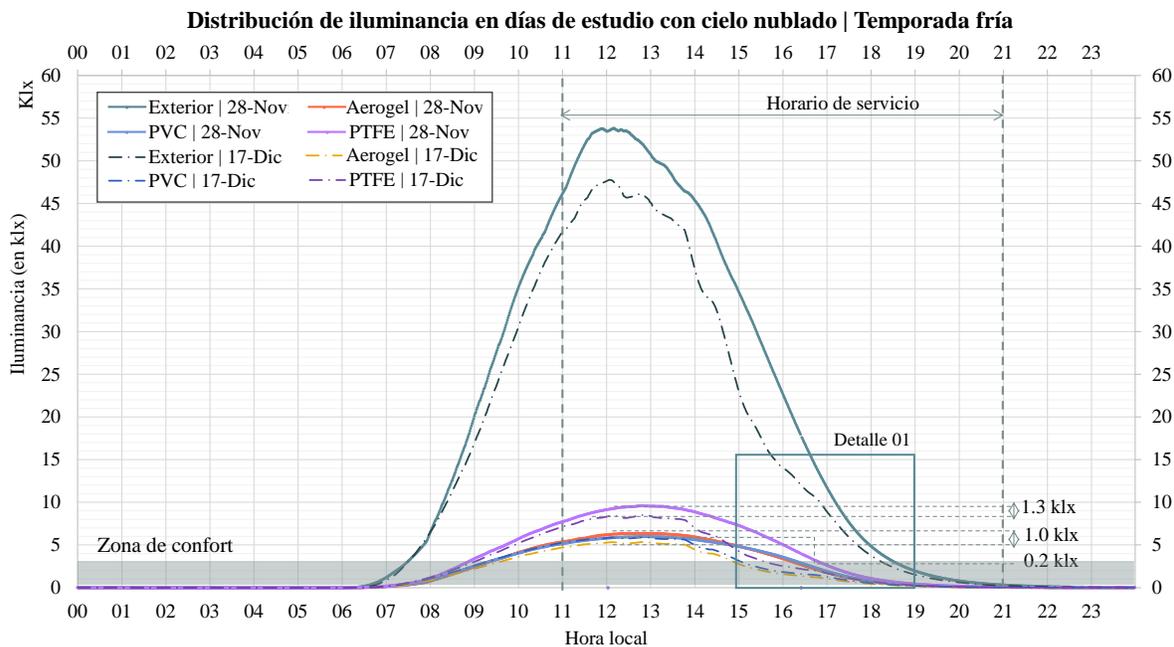
El 16 de noviembre, la iluminancia se encuentra dentro de la ZCE por 164 min en el aerogel, 163 min en el PVC y 155 min en el PTFE, representando el 27.3, 27.2 y 25.8 % del horario operativo, respectivamente. La iluminancia se encuentra debajo de la ZCE por 115 min en el aerogel, 113 min en el PVC y 91 min en el PTFE. La iluminancia máxima, en el PVC, presenta la menor diferencia con el valor máximo de confort (3.1 klx); mientras que, en el PTFE, se presenta la mayor diferencia (7.4 klx).

El 17 de noviembre, la iluminancia se encuentra dentro de la ZCE por 161 minutos en el módulo con aerogel, 160 minutos en el PVC y 154 minutos en el PTFE, representando el 26.8, 26.7 y 25.7 % del horario de servicio, respectivamente. La iluminancia se encuentra debajo de la ZCE por 110 min en el aerogel, 107 min en el PVC y 87 min en el PTFE. La iluminancia máxima, en el módulo con PVC, presenta la menor diferencia con el valor máximo de confort (3.0 klx); mientras que, en el módulo con PTFE, se presenta la mayor diferencia (7.3 klx) (ver *Gráfica 42*).



Gráfica 42. Detalle de la distribución de iluminancia y diferencia de valores máximos en días con CPN en temporada fría
Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

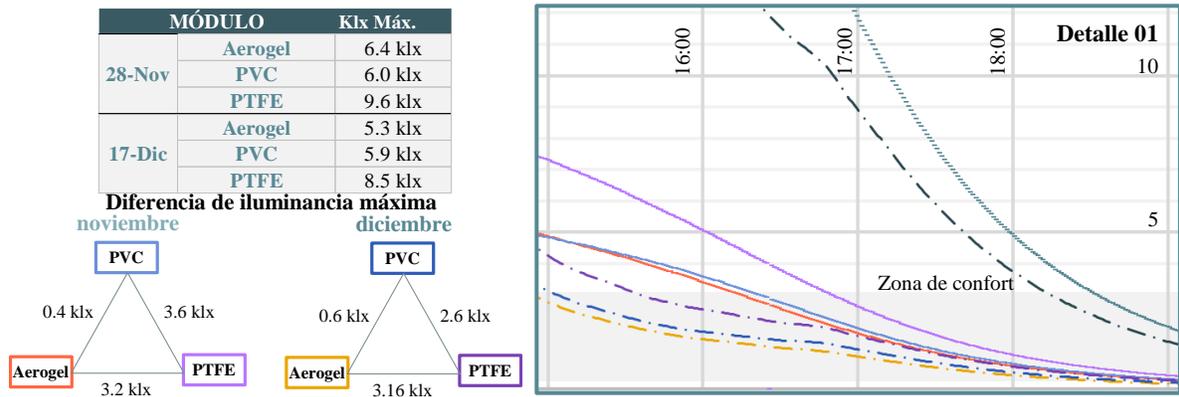
La distribución de la iluminancia interior tiene una evidente uniformidad y simetría durante el día con CN (ver *Gráfica 43*). Los días representativos de CN en la temporada fría son el 28 de noviembre y el 17 de diciembre.



Gráfica 43. Comparación de la distribución de iluminancia de los módulos de prueba en días con CN en temporada fría.
Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

El 28 de noviembre, la iluminancia se encuentra dentro de la ZCE por 164 min en el aerogel, 162 min en el PVC y 156 min en el PTFE, representando el 27.3, 27 y 26 % del horario de servicio, respectivamente. La iluminancia se encuentra debajo de la ZCE por 121 min en el aerogel, 116 min en el PVC y 95 min en el PTFE. La iluminancia máxima, en el PVC, presenta la menor diferencia con el valor máximo de confort (de 3.0 klx); mientras que, en el PTFE, se presenta la mayor diferencia (de 6.6 klx).

El 17 de diciembre, la iluminancia se encuentra dentro de la ZCE por 212 min en el módulo con aerogel, 214 min en el PVC y 202 min en el PTFE, representando el 35.3, 35.7 y 33.7 % del horario de servicio, respectivamente. La iluminancia se encuentra debajo de la ZCE por 155 min en el aerogel, 142 min en el PVC y 122 min en el PTFE. La iluminancia máxima, en el módulo con aerogel, presenta la menor diferencia con el valor máximo de confort (de 2.3 klx); mientras que, en el módulo con PTFE, se presenta la mayor diferencia (de 5.5 klx) (ver *Gráfica 44*).



Gráfica 44. Detalle de la distribución de iluminancia y diferencia de valores máximos en días con CN en temporada fría. Elaboración propia con datos obtenidos de la estación meteorológica instalada en sitio 2022.

5.4 Análisis del desempeño térmico y lumínico de los materiales

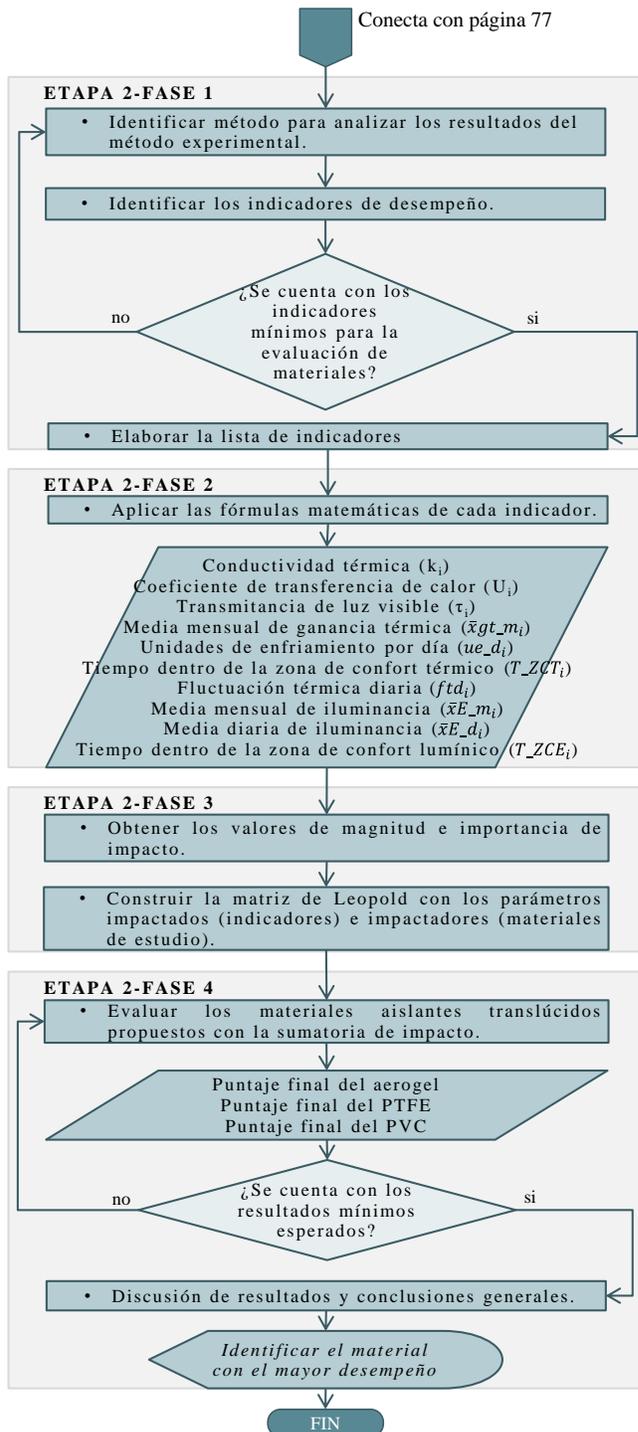


Figura 38. Diagrama de flujo de procesos para evaluar los materiales de estudio, a partir de la matriz de Leopold. Elaboración propia.

identificar el material translúcido con el mayor desempeño, por medio de la comparación de puntajes finales.

La segunda etapa del flujo de procesos diseña y elabora una herramienta de evaluación de materiales aislantes translúcidos, para analizar los resultados del método experimental, desarrollado en 4 fases (ver *Figura 38*).

En la primera fase, se identifican los indicadores de desempeño que influyen en un sistema envolvente y son alterados con la propuesta de diferentes opciones de materiales. En la segunda fase, se aplican las fórmulas matemáticas de los indicadores para obtener los valores a partir de los resultados obtenidos en el método experimental y sus respectivos valores de referencia. En la tercera fase, se obtiene los valores de impacto (magnitud y valoración) a partir de la comparación de valores de los indicadores y de referencia. En la cuarta fase, se evalúan los materiales translúcidos propuestos para una cubierta de estructura curva en la matriz de Leopold.

Finalmente, se desarrollan las conclusiones generales para interpretar e

5.4.1 Identificación de indicadores de desempeño

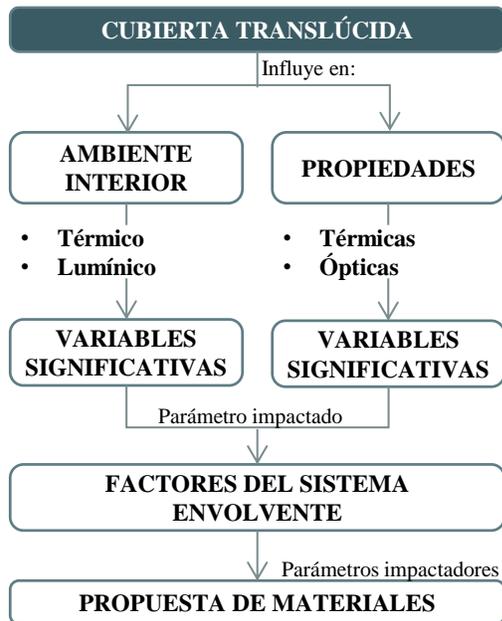


Figura 39. Interrelación de parámetros de evaluación.
Elaboración propia con datos obtenidos de Dellavedova (2016).

De acuerdo con Papadopoulos (2005), los indicadores muestran un valor objetivo de materiales aplicados en la construcción, para determinar una selección adecuada. Los parámetros que influyen de manera significativa en una envolvente arquitectónica son el ambiente interior y las propiedades del sistema envolvente. La propuesta de diferentes materiales para elementos del sistema envolvente, como una cubierta translúcida, interviene en los parámetros anteriores (ver *Figura 39*). Por lo tanto, se implementan indicadores que miden el desempeño, para relacionar los valores óptimos de los parámetros y el rendimiento individual de cada uno

de los materiales propuestos.

De acuerdo con los alcances de la investigación, los indicadores de desempeño de materiales propuestos se dividen en tres categorías, los cuales miden el aspecto térmico y lumínico de un sistema envolvente. La primera categoría evalúa las propiedades físicas básicas de los materiales propuestos, como es la relación entre la conductividad térmica de un superaislante y el material; la relación entre el coeficiente de transferencia de calor de un superaislante y el material y la relación entre la transmisión de iluminancia de un superaislante y el material. La segunda categoría evalúa la calidad del ambiente térmico interior, cómo es el tiempo dentro de la zona de confort térmico durante el horario operativo; la cantidad de unidades de enfriamiento durante el horario operativo y la relación entre la fluctuación térmica diaria del módulo experimental y el óptimo. La última categoría evalúa la calidad del ambiente lumínico interior, cómo es el tiempo dentro de la zona de confort lumínico durante el horario operativo y el tiempo debajo de la zona de confort térmico durante el horario operativo (ver *Tabla 15*).

Tabla 15. Lista de indicadores de desempeño para la evaluación de materiales aislantes translúcidos en la matriz de Leopold.

A. PROPIEDADES FÍSICAS											
A.1 Propiedades térmicas											
a)	Conductividad térmica (k_t)		b)	Coeficiente de transferencia de calor (valor U_t)							
A.2 Propiedades ópticas											
a)	Transmitancia de luz visible (τ_t)										
B. CALIDAD DEL AMBIENTE TÉRMICO INTERIOR											
B.1 Tiempo promedio diario dentro de la zona de confort térmico (T_{ZCT_i})											
a)	Enero	c)	Marzo	e)	Mayo	g)	Julio	i)	Septiembre	k)	Noviembre
b)	Febrero	d)	Abril	f)	Junio	h)	Agosto	j)	Octubre	l)	Diciembre
B.2 Tiempo dentro de la zona de confort térmico (T_{ZCT_i})											
a)	Temporada cálida en CD		c)	Temporada cálida en CN		e)	Temporada fría en CPN				
b)	Temporada cálida en CPN		d)	Temporada fría en CD		f)	Temporada fría en CN				
B.3 Unidades de enfriamiento por día (ue_{d_i})											
a)	Temporada cálida en CD		c)	Temporada cálida en CN		e)	Temporada fría en CPN				
b)	Temporada cálida en CPN		d)	Temporada fría en CD		f)	Temporada fría en CN				
B.4 Fluctuación térmica diaria (ftd_i)											
a)	Temporada cálida en CD		c)	Temporada cálida en CN		e)	Temporada fría en CPN				
b)	Temporada cálida en CPN		d)	Temporada fría en CD		f)	Temporada fría en CN				
C. CALIDAD DEL AMBIENTE LUMÍNICO INTERIOR											
C.1 Tiempo promedio diario dentro de la zona de confort lumínico (T_{ZCE_i})											
a)	Enero	c)	Marzo	e)	Mayo	g)	Julio	i)	Septiembre	k)	Noviembre
b)	Febrero	d)	Abril	f)	Junio	h)	Agosto	j)	Octubre	l)	Diciembre
C.2 Tiempo dentro de la zona de confort lumínico (T_{ZCE_i})											
a)	Temporada cálida en CD		c)	Temporada cálida en CN		e)	Temporada fría en CPN				
b)	Temporada cálida en CPN		d)	Temporada fría en CD		f)	Temporada fría en CN				
C.3 Tiempo promedio diario debajo de la zona de confort lumínico (T_{DZCE_i})											
a)	Enero	c)	Marzo	e)	Mayo	g)	Julio	i)	Septiembre	k)	Noviembre
b)	Febrero	d)	Abril	f)	Junio	h)	Agosto	j)	Octubre	l)	Diciembre
C.4 Tiempo debajo de la zona de confort lumínico (T_{DZCE_i})											
a)	Temporada cálida en CD		c)	Temporada cálida en CN		e)	Temporada fría en CPN				
b)	Temporada cálida en CPN		d)	Temporada fría en CD		f)	Temporada fría en CN				

Fuente: Elaboración propia. Simbología: CD=Cielo despejado, CPN=Cielo parcialmente nublado y CN=Cielo nublado.

Los valores de referencia son datos obtenidos de investigaciones previas que establecen condiciones térmicas, lumínicas u operativas, para el funcionamiento adecuado de un espacio o sistema envolvente de una construcción (ver *Tabla 16*). De acuerdo con Baetens (2013), Dowson et al. (2011), los materiales superaislantes (transparentes o translúcidos) tienen una conductividad térmica entre 0.004 y 0.014 W/m²·K, un valor U menor a 1 W/m²·K y una transmitancia de luz visible mayor al 50 %. Los valores térmicos y lumínicos óptimos para un edificio de uso comercial son retomados de Auliciems (2007) y USGBC (2022). El horario operativo de referencia se obtiene a partir del horario que aparece con mayor frecuencia en un conjunto de edificios comerciales, consultados de manera aleatoria. Los valores óptimos de fluctuación térmica diaria se definieron a partir del valor máximo de confort del mes correspondiente y la temperatura mínima promedio en el módulo de referencia (PVC), durante la temporada cálida (con 11 °C) y fría (con 6 °C).

Tabla 16. Valores de referencia para el proceso de evaluación.

	TEMPORADA CÁLIDA				TEMPORADA FRÍA			
		a				a		
Conductividad térmica de un superaislante (k_{ref})	0.004	a	0.014	W/m ² ·K	0.004	a	0.014	W/m ² ·K
Coeficiente de transferencia de calor de un superaislante (U_{ref})	< 1			W/m ² ·K	< 1			W/m ² ·K
Transmitancia de luz visible (τ_{ref})	> 50			%	> 50			%
Rango de confort térmico (ZCT)	22.00	a	27.00	°C	20.40	a	25.40	°C
Rango de confort lumínico (ZCE)	0.30	a	3.0	klx	0.30	a	3.0	klx
Cantidad de minutos durante el horario operativo (T_{oper})	600							
Fluctuación térmica diaria (Min. de 11 y 6 °C a las 6 h) (ftd_{ref})	11.00	a	16.00	°C	14.40	a	19.40	°C

Fuente: Elaboración propia con datos de Auliciems y Szokolay (2007); Dowson et al. (2011); Baetens (2013); USGBC 2022 (2022).

Los valores de los indicadores se calculan con las fórmulas de la *Tabla 17* y los valores de referencia de la *Tabla 16*. Los indicadores k_i , *valor* U_i y τ_i se calculan con la (Ec. 5.1), (Ec. 5.2) y (Ec. 5.3) y miden la relación entre las propiedades térmicas y ópticas de un superaislante y el material de estudio. Los indicadores \bar{T}_{ZCT_i} , T_{ZCT_i} , \bar{T}_{ZCE_i} y T_{ZCE_i} se calculan con la (Ec. 5.4) y (Ec. 5.7) y miden el tiempo dentro de la zona de confort térmico y lumínico, durante el horario operativo. El indicador ue_{d_i} se calcula con la (Ec. 5.5) y obtiene las unidades de enfriamiento, durante el horario operativo. El indicador ftd_i se calcula con la (Ec. 5.6) y mide la relación entre la fluctuación térmica diaria del módulo experimental y el óptimo. Por último, los indicadores \bar{T}_{DZCE_i} y T_{DZCE_i} se calculan con la (Ec. 5.8) y miden el tiempo debajo de la zona de confort lumínico, durante el horario operativo.

Tabla 17. Fórmulas matemáticas para obtener el valor de los indicadores.

MÉTRICA	DEFINICIÓN	FÓRMULAS
Conductividad térmica (k_i)	Diferencia entre la conductividad térmica del material y un material superaislante, en [W/m ² ·K] (Yunus A. y Afshin J. 2015, 19).	(Ec. 5.1) $k_{ref} - k_m$ donde k_{ref} Conductividad térmica de un material superaislante, k_m Conductividad térmica del material de estudio (proporcionado por el proveedor).
Coefficiente de transferencia de calor (valor U_i)	Coefficiente global de transferencia de calor del material de estudio, en [W/m ² ·K] (Morales Ramírez 2019, 73).	(Ec. 5.2) $U_{ref} - \frac{1}{\left(\frac{1}{h_e} + \frac{e^n}{k^n} + \frac{1}{h_i}\right)}$ donde h_e Coeficiente de convección del aire exterior en techos (34.06 W/m ² ·K), h_i Coeficiente de convección del aire interior en techos (17.03 W/m ² ·K), e Espesor del material, k Conductividad térmica.
Transmitancia de luz visible (τ_i)	Relación entre la luz transmitida a través del material y la luz incidente, en [%] (Yunus A. y Afshin J. 2015, 736).	(Ec. 5.3) $\tau_{ref} - \frac{\tau_{int}}{\tau_{ext}}$
Tiempo promedio diario dentro de la zona de confort térmico (\bar{T}_{ZCT_i})	Tiempo total dentro de la zona de confort térmico durante el día promedio del mes de estudio, en el horario operativo, en [min] (Quintela del Río 2019, 46).	(Ec. 5.4) $\sum_{n \geq ZCT}^{max} \chi_n$
Tiempo dentro de la zona de confort térmico (T_{ZCT_i})	Tiempo total dentro de la zona de confort térmico durante el día de estudio, en el horario operativo, en [min] (Quintela del Río 2019, 46).	
Unidades de enfriamiento (ue_{d_i})	Sumatoria de diferencias entre la media horaria de ganancia térmica interior y el valor máximo óptimo del día de estudio, durante el horario operativo, en [°C] (Zeevaert Alcántara 2020, 113).	(Ec. 5.5) $\sum_{n=11}^{n=21} ZCT^{max} - \chi_n$
Fluctuación térmica diaria (ftd_i)	Diferencia entre la temperatura máxima y la temperatura mínima del día de estudio, en [°C] (García Villalobos 2011, 103).	(Ec. 5.6) $temp_{max} - temp_{min}$
Tiempo promedio diario dentro de la zona de confort lumínico (\bar{T}_{ZCE_i})	Tiempo total dentro de la zona de confort lumínico durante el día promedio del mes de estudio, en el horario operativo, en [min] (Quintela del Río 2019, 46).	(Ec. 5.7) $\sum_{n \geq ZCE}^{max} \chi_n$
Tiempo dentro de la zona de confort lumínico (T_{ZCE_i})	Tiempo total dentro de la zona de confort lumínico durante el día de estudio, en el horario operativo, en [min] (Quintela del Río 2019, 46).	
Tiempo promedio diario debajo de la zona de confort lumínico (\bar{T}_{DZCE_i})	Tiempo total debajo de la zona de confort lumínico durante el día promedio del mes de estudio, en el horario operativo, en [min] (Quintela del Río 2019, 46).	(Ec. 5.8) $\sum_{n < ZCE}^{max} \chi_n$
Tiempo debajo de la zona de confort lumínico (T_{DZCE_i})	Tiempo total dentro de la zona de confort lumínico durante el día de estudio, en el horario operativo, en [min] (Quintela del Río 2019, 46).	

Fuente: Elaboración propia con fórmulas obtenidas de Yunus A. y Afshin J. (2015); Morales Ramírez (2019); Quintela del Río (2019); Zeevaert Alcántara (2020); García Villalobos (2011).

Tabla 18. Valores de los indicadores, obtenidos del modelo experimental.

			TEMPORADA CÁLIDA						TEMPORADA FRÍA					
			CD		CPN		CN		CD		CPN		CN	
			Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
AEROGEL	A	A1.							-0.009 W/m ² ·K					
		A2.							-2.15 W/m ² ·K					
		A3.	39 %						36 %					
	B	B1.	60 min	60 min	60 min	120 min	120 min	120 min	120 min	60 min	60 min	120 min	120 min	60 min
		B2.	146 min		93 min		140 min		61 min		52 min		60 min	
		B3.	-70 °C		-80 °C		1 °C		-27 °C		-33 °C		-28 °C	
		B4.	34 °C		34 °C		20 °C		33 °C		33 °C		29 °C	
	C	C1.	180 min	180 min	180 min	240 min	240 min	300 min	240 min	180 min	180 min	180 min	180 min	120 min
		C2.	203 min		192 min		209 min		153 min		163 min		188 min	
		C3.	120 min	120 min	120 min	60 min	60 min	120 min	120 min	120 min	60 min	120 min	120 min	180 min
		C4.	96 min		88 min		64 min		88 min		113 min		138 min	
	PIFE	A	A1.							-0.236 W/m ² ·K				
A2.									-5 W/m ² ·K					
A3.			16 %						28 %					
B		B1.	60 min	60 min	120 min	120 min	60 min	120 min	60 min	60 min	120 min	120 min	120 min	60 min
		B2.	29 min		82 min		113 min		60 min		57 min		90 min	
		B3.	-74 °C		-81 °C		-11 °C		-32 °C		-29 °C		-35 °C	
		B4.	37 °C		36 °C		23 °C		34 °C		33 °C		30 °C	
C		C1.	180 min	120 min	120 min	120 min	60 min	180 min	120 min	120 min	120 min	120 min	180 min	180 min
		C2.	162 min		140 min		134 min		148 min		155 min		179 min	
		C3.	120 min	120 min	120 min	60 min	60 min	60 min	60 min	60 min	120 min	120 min	120 min	120 min
		C4.	18 min		30 min		2 min		88 min		89 min		109 min	
PVC		A	A1.							-0.166 W/m ² ·K				
	A2.								-4.93 W/m ² ·K					
	A3.		31 %						35 %					
	B	B1.	60 min	60 min	120 min	120 min	60 min	120 min	60 min	50 min	120 min	120 min	60 min	60 min
		B2.	148 min		81 min		121 min		57 min		55 min		90 min	
		B3.	-61 °C		-67 °C		-4 °C		-30 °C		-30 °C		-37 °C	
		B4.	35 °C		33 °C		22 °C		33 °C		34 °C		30 °C	
	C	C1.	120 min	180 min	180 min	120 min	120 min	240 min	180 min	180 min	180 min	120 min	180 min	180 min
		C2.	184 min		168 min		157 min		154 min		162 min		188 min	
		C3.	180 min	120 min	120 min	60 min	60 min	60 min	60 min	60 min	120 min	180 min	120 min	120 min
		C4.	59 min		51 min		24 min		90 min		110 min		129 min	

Fuente: Elaboración propia.

5.4.2 Matriz de Leopold

De acuerdo con Dellavedova (2016), la matriz de Leopold es un método cualitativo de causa-efecto, que evalúa el impacto de diversas alternativas en un espacio real. El impacto de cada alternativa es la intensidad de alteración producida y se determina a partir de la magnitud e importancia. La magnitud (M) es una estimación objetiva y se mide en una escala ascendente de 1 a 10, antecedido de un signo + o -, si el impacto es positivo o negativo. La importancia (I) es una estimación subjetiva y se mide en una escala ascendente de 1 a 10.

La magnitud del impacto se determina de dos maneras. En primer lugar, la magnitud de k_i , U_i , τ_i , ue_{di} , T_{ZCT_i} , \bar{T}_{ZCT_i} , T_{ZCE_i} , \bar{T}_{ZCE_i} , T_{DZCE_i} y \bar{T}_{DZCE_i} se obtiene de la regla de proporcionalidad. El valor comparativo, para k_i y U_i , es el indicador con el mayor resultado; para τ_i , es el valor de τ_{ref} , para ue_{di} , T_{ZCT_i} , \bar{T}_{ZCT_i} , T_{ZCE_i} y \bar{T}_{ZCE_i} , es el valor T_{oper} y para T_{DZCE_i} y \bar{T}_{DZCE_i} , es la referencia T_{oper} (con signo negativo), los cuales tienen un valor de 10. En segundo lugar, la magnitud de ftd_i se obtiene de la diferencia de valores. La diferencia es entre la ftd_{ref} y el valor del material, dividido entre 2 (ver Tabla 19).

Tabla 19. Valoración de la magnitud del impacto de cada indicador.

			TEMPORADA CÁLIDA						TEMPORADA FRÍA					
			CD		CPN		CN		CD		CPN		CN	
			Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
AEROGEL	A	A1.							-1					
		A2.							-4					
		A3.	-8						-7					
	B	B1.	1	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1
		B2.	2		2		2		1		1		1	
		B3.	-1		-1		2		1		-1		1	
		B4.	-9		-9		-2		-7		-7		-5	
	C	C1.	3	3	3	4	4	5	4	3	3	3	3	2
		C2.	3		3		3		3		3		3	
		C3.	-2	-2	-2	-1	-1	-2	-2	-1	-2	-2	-2	-3
		C4.	-2		-1		-1		-1		-2		-2	
	PIFE	A	A1.							-10				
A2.									-10					
A3.			-3						-6					
B		B1.	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	2	1
		B2.	2		1		2		1		1		1	
		B3.	-1		-1		1		-1		1		-1	
		B4.	-10		-10		-4		-7		-7		-5	
C		C1.	3	2	2	2	1	3	2	2	2	2	3	3
		C2.	3		2		2		2		3		3	
		C3.	-2	-2	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-2	-2	-2
		C4.	1		-1		2		-1		-1		-2	
PVC		A	A1.							-7				
	A2.								-10					
	A3.		-6						-7					
	B	B1.	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1
		B2.	2		1		2		1		1		1	
		B3.	-1		-1		1		-1		1		-1	
		B4.	-9		-9		-3		-7		-7		-5	
	C	C1.	2	3	3	2	2	4	3	3	3	2	3	3
		C2.	3		3		3		3		3		3	
		C3.	-3	-2	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-3	-2	-2
		C4.	-1		-1		1		-1		-2		-2	

Fuente: Elaboración propia.

La importancia del impacto se determina por medio de tres criterios. El primero considera la intensidad (IN); el segundo, la extensión (EX) y el tercero, la relación causa-efecto (EF). La importancia del impacto de cada indicador se calcula de la ecuación (Ec. 5.9), a partir de la escala de medición de la *Tabla 20*.

(Ec. 5.9)

$$I = (IN + EX + EF)/2$$

donde

I importancia del impacto,
IN intensidad del impacto,

EX extensión del impacto,
EF efecto del impacto.

Tabla 20. Escala de medición para la importancia de impacto.

INTENSIDAD (IN)	Baja	1	Representa una modificación mínima del indicador considerado.
	Media	2	
	Alta	4	Provoca alteraciones en algunos de los indicadores.
	Muy alta	8	
	Total	10	Provoca una modificación casi total del indicador.
EXTENSIÓN (EX)	Puntual	1	Produce un efecto localizado.
	Parcial	2	Tiene una incidencia apreciable en el indicador.
	Extenso	4	
	Total	6	Se detecta de manera general en el indicador.
CAUSA-EFECTO (EF)	Indirecto	1	Supone una incidencia a un indicador con otro.
	Directo	4	Incide de manera inmediata en el indicador.

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de Dellavedova (2016).

La *Tabla 21* muestra los valores de importancia de cada indicador. El aerogel incide de manera inmediata y con muy alta intensidad en las propiedades térmicas (valor U) de la cubierta respecto a los demás materiales; mientras que, en las propiedades ópticas (transmitancia), la intensidad del impacto es baja. Por el contrario, el PTFE incide de manera inmediata y con muy alta intensidad en las propiedades ópticas de la cubierta respecto a los demás materiales; mientras que, en las propiedades térmicas, la intensidad del impacto es baja. El PVC incide de manera inmediata y con una misma intensidad (media) en las propiedades térmicas y ópticas de la cubierta.

Tabla 21. Valoración de la importancia del impacto de cada indicador.

		TEMPORADA CÁLIDA						TEMPORADA FRÍA						
		CD		CPN		CN		CD		CPN		CN		
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
AEROGEL	A	A1.	10											
		A2.	9											
		A3.	6						6					
	B	B1.	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
		B2.	9		9		9		9		9		9	
		B3.	6		8		5		8		8		6	
		B4.	8		8		5		8		8		8	
	C	C1.	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
		C2.	9		9		9		9		9		9	
		C3.	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
		C4.	8		8		8		8		8		8	
	PTFE	A	A1.	6										
A2.			6											
A3.			9						9					
B		B1.	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
		B2.	9		9		9		9		9		9	
		B3.	8		8		5		8		8		6	
		B4.	8		8		6		8		8		8	
C		C1.	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
		C2.	9		9		9		9		9		9	
		C3.	8	8	8	6	6	6	8	6	8	8	8	8
		C4.	6		6		8		6		6		8	
PVC		A	A1.	7										
	A2.		6											
	A3.		6						6					
	B	B1.	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
		B2.	9		9		9		9		9		9	
		B3.	6		8		5		8		8		8	
		B4.	8		8		6		8		8		8	
	C	C1.	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
		C2.	9		9		9		9		9		9	
		C3.	8	8	8	6	6	6	6	6	8	8	8	8
		C4.	6		6		6		6		8		8	

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 6.

Resultados y conclusiones

6.1 Discusión de resultados

6.1.1 Resultados del modelo experimental.

Una adecuada caracterización térmica y lumínica del espacio interior permite conocer el rendimiento de los materiales en edificios de uso comercial, para hacer más eficiente la regulación térmica e iluminación natural. El espacio debe considerar los requerimientos del tipo de construcción y de los usuarios durante un periodo mínimo de un año, para estudiar su comportamiento en las diferentes estaciones del año y condiciones de cielo.

La temperatura promedio (T_m) es menor en el interior del módulo de prueba con aerogel que en los módulos restantes. La temperatura promedio máxima ($T_m \text{ máx.}$) es menor en el módulo con aerogel; mientras que, en el módulo con PTFE es mayor, con una diferencia promedio anual de 1.6 °C. Además, T_m es menor en el módulo con aerogel; mientras que, en el módulo con PTFE es mayor, con una diferencia promedio anual de 0.5 °C. La mayor diferencia de temperaturas, entre la $T_m \text{ máx.}$ del módulo con aerogel y del módulo con PTFE, se presenta en marzo con un promedio de 3.5 °C (ver *Tabla 22*).

Tabla 22. Caracterización de la variable T_m de los módulos de prueba.

VARIABLE	DESCRIPCIÓN		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
T_m	Promedio máximo de temperaturas ($T_m \text{ máx.}$) durante el mes de estudio, en [°C].	AEROGEL	28.3	37.0	40.1	43.8	42.5	39.7	36.0	38.8	37.3	38.4	36.1	36.6	
		PTFE	30.4	39.9	43.6	44.9	43.6	40.7	39.0	38.4	39.9	38.4	39.0	37.3	37.6
		PVC	30.5	39.7	42.6	42.2	40.3	37.9	36.2	37.7	36.2	37.8	36.7	38.3	
T_m	Promedio mínimo de temperaturas ($T_m \text{ mín.}$) durante el mes de estudio, en [°C].	AEROGEL	18.5	17.2	19.1	22.9	22.4	21.0	20.3	19.5	17.7	18.0	15.6	16.2	
		PTFE	19.5	17.1	18.9	22.0	21.8	20.7	20.5	19.1	17.6	17.9	15.5	15.9	
		PVC	19.7	17.2	19.1	22.2	21.9	20.8	20.5	19.2	17.7	18.0	15.6	16.0	
T_m	Promedio de temperaturas (T_m) durante el mes de estudio, en [°C].	AEROGEL	23.9	19.0	21.4	24.1	24.8	23.1	22.7	21.7	21.9	21.6	18.4	18.0	
		PTFE	26.4	19.6	22.2	24.1	24.9	23.3	23.6	22.5	22.2	21.7	18.5	17.9	
		PVC	26.6	19.5	21.9	23.2	23.9	22.6	22.8	22.4	21.6	21.4	18.4	18.0	

Fuente: Elaboración propia

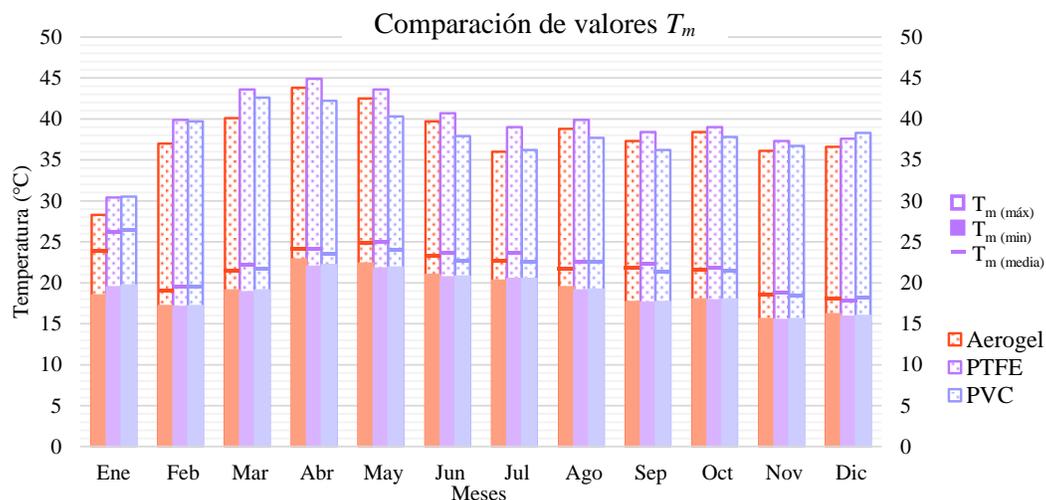


Figura 40. Comparación de valores T_m entre los módulos de prueba, en los meses de estudio. Elaboración propia.

La temperatura promedio (T_h , T_d y F_d) en el módulo con aerogel es menor a diferencia de la temperatura en los demás módulos, durante las temporadas de estudio. La temperatura máxima promedio (T_h) es menor en el interior del módulo con aerogel; mientras que, en el módulo con PTFE es mayor, con una diferencia promedio entre ellos de 1.4 °C. Asimismo, la fluctuación térmica diaria (F_d) es menor en el módulo con aerogel; mientras que, en el módulo con PTFE es mayor, con una diferencia promedio de 1.7 °C. La temperatura en el interior de los módulos varía más entre ellos en los días con cielo nublado que en los días restantes de la temporada cálida; mientras que, en los cielos parcialmente nublados, la variación es menor que en los días restantes de la temporada fría (ver *Tabla 23*).

Tabla 23. Caracterización de la variable T_h , T_d y F_d de los módulos de prueba.

VARIABLE	DESCRIPCIÓN		TEMPORADA CÁLIDA			TEMPORADA FRÍA		
			CD	CPN	CN	CD	CPN	CN
T_h	Promedio máximo de temperaturas de 60 minutos durante el día de estudio, en [°C].	AEROGEL	42.20	43.30	31.10	35.90	38.30	36.90
		PTFE	44.40	44.40	33.80	37.70	38.30	37.70
		PVC	41.50	41.50	32.10	36.80	38.30	37.90
	Promedio mínimo de temperaturas de 60 minutos durante el día de estudio, en [°C].	AEROGEL	9.50	9.40	12.70	8.30	3.40	5.90
		PTFE	9.00	10.60	12.30	8.10	3.20	5.60
		PVC	8.70	10.30	12.10	8.00	3.00	5.20
T_d	Promedio de temperaturas durante el día de estudio, en [°C].	AEROGEL	22.80	24.00	19.60	19.10	17.20	18.30
		PTFE	22.90	23.90	20.20	19.30	16.90	18.20
		PVC	21.90	23.00	19.80	19.00	16.80	18.40
F_d	Diferencia entre la temperatura máxima y la temperatura mínima de un día de estudio, en [°C].	AEROGEL	32.70	32.40	18.40	27.60	34.90	31.00
		PTFE	35.30	33.80	21.50	29.20	35.10	32.10
		PVC	32.80	31.20	20.00	28.70	35.30	32.70

Fuente: Elaboración propia

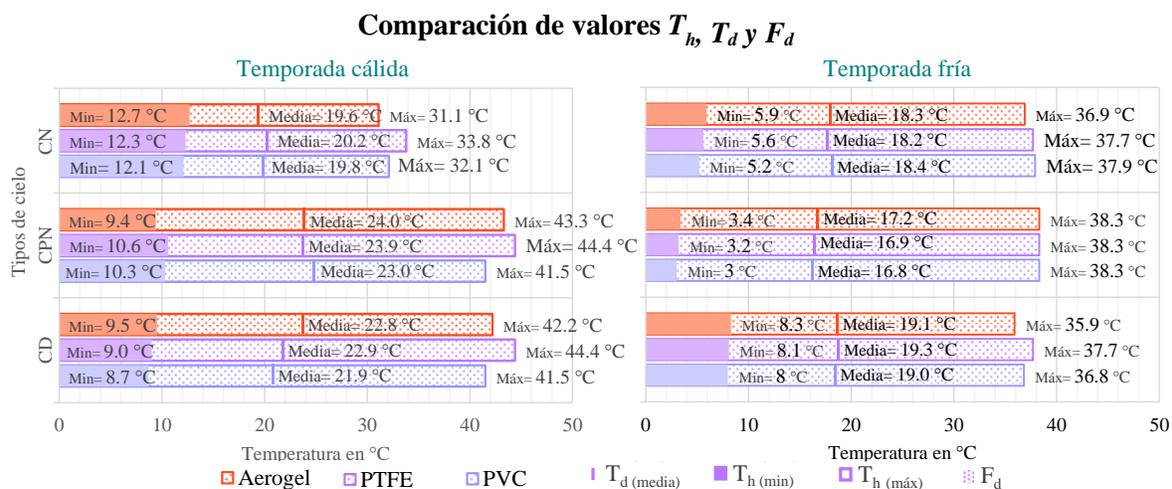


Figura 41. Comparación de valores T_h , T_d y F_d entre los módulos de prueba, en las temporadas de estudio.

Elaboración propia

La temperatura se encuentra por más tiempo dentro del rango de confort en el módulo con aerogel, durante el horario operativo de un edificio comercial en las temporadas de estudio, con un tiempo promedio de 92 minutos de 600 minutos, solamente un 15.3 %. El tiempo promedio del módulo es 1 min mayor que en el PVC y 4 min mayor que en el PTFE. La temperatura de los módulos, en los días con cielo despejado, permanece por más tiempo dentro del rango de confort que en los días con cielo parcialmente nublado, durante las temporadas de estudio (ver *Gráfica 15*, *Gráfica 17*, *Gráfica 19*, *Gráfica 30*, *Gráfica 32* y *Gráfica 34*).

La iluminancia es mayor en el interior del modelo con PTFE que en los modelos restantes, durante el año (ver *Tabla 24*). La iluminancia promedio máxima (E_m máx.) es más alta en este modelo que en el modelo con PVC, con una diferencia máxima de 15 klx en abril y mínima de 1.4 klx en enero. Asimismo, la iluminancia promedio (E_m) es mayor en el modelo con PTFE que en el modelo con PVC, con una diferencia promedio anual de 2.8 klx. Esto se debe a que, la transmitancia del PTFE es mayor que en los demás.

Tabla 24. Caracterización de la variable E_m de los módulos de prueba.

VARIABLE	DESCRIPCIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
E_m	Promedio máximo de iluminancia global de 6 a 20 horas durante el mes de estudio, en [klx] (E_m máx.).	AEROGEL	8.4	7.4	7.5	6.2	6.0	4.0	4.0	6.2	10.0	9.6	8.5	5.9
		PTFE	9.8	9.8	10.3	21.2	18.3	12.8	13.5	10.2	14.7	12.4	11.9	9.0
		PVC	5.9	5.6	5.6	9.3	8.2	6.5	7.3	5.2	7.3	6.6	6.7	5.8
	Promedio de iluminancia global de 6 a 20 horas durante el mes de estudio, en [klx] (E_m).	AEROGEL	4.9	4.4	4.2	3.7	3.7	2.4	2.4	3.4	5.7	5.5	4.6	3.6
		PTFE	5.4	5.6	5.6	10.9	9.7	6.1	7.8	5.7	7.2	7.0	6.0	5.4
		PVC	3.8	3.8	3.6	5.5	4.8	3.6	4.5	3.0	4.4	4.0	4.1	3.8

Fuente: Elaboración propia

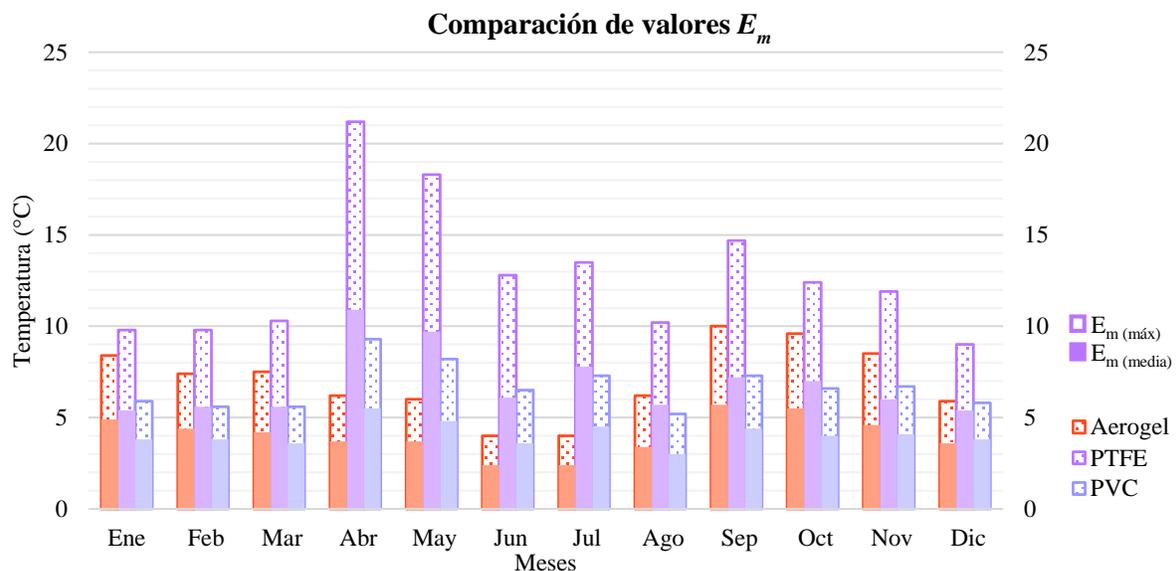


Figura 42. Comparación de valores E_m entre los módulos de prueba, en los meses de estudio.

Elaboración propia

La iluminancia es mayor en el interior del modelo con PTFE que en los modelos restantes, durante las temporadas de estudio (ver *Tabla 25*). La iluminancia promedio máxima (E_h) es mayor en el módulo con PTFE que en el módulo con PVC, con una diferencia promedio de 8.3 klx y máxima de 15.4 klx en cielos despejados de la temporada cálida. Asimismo, la iluminancia promedio (E_d) es mayor en el módulo con PTFE que en el módulo con PVC, con una diferencia máxima de 7.2 klx en abril y mínima de 0.5 klx en enero.

Tabla 25. Caracterización de la variable E_h y E_d de los módulos de prueba.

VARIABLE	DESCRIPCIÓN		TEMPORADA CÁLIDA			TEMPORADA FRÍA		
			CD	CPN	CN	CD	CPN	CN
E_h	Promedio máximo de iluminancia global de 60 minutos durante el día de estudio, en [klx].	AEROGEL	6.4	6.4	5.1	8.6	7.3	5.9
		PTFE	21.8	19.7	16.1	11.9	10.8	9.1
		PVC	9.3	9.0	8.1	6.7	6.1	6.0
E_d	Promedio de iluminancia global de 6 a 20 horas durante el día de estudio, en [klx].	AEROGEL	2.8	3.0	2.7	4.7	4.1	3.3
		PTFE	9.0	9.1	8.5	6.6	5.9	5.0
		PVC	4.3	4.5	4.5	3.9	3.7	3.5

Fuente: Elaboración propia.

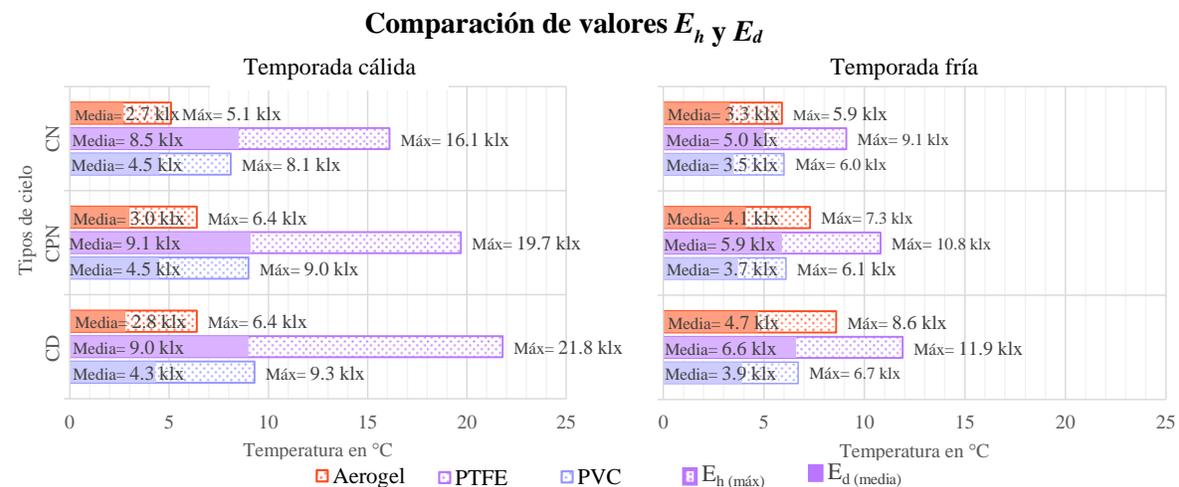


Figura 43. Comparación de valores E_h y E_d entre los módulos de prueba, en las temporadas de estudio. Elaboración propia

La iluminancia se encuentra por más tiempo dentro del rango de confort en el módulo con aerogel, durante el horario operativo de un edificio comercial en las temporadas de estudio, con un tiempo promedio anual de 184 minutos, es decir, el 30.7 %. El tiempo promedio del módulo es 16 min mayor que en el PVC y 32 min mayor que en el PTFE. La iluminancia del módulo, en los días con cielo nublado, permanece por más tiempo dentro del rango de confort que en los días con cielo parcialmente nublado, durante las temporadas de estudio (ver *Gráfica 24*, *Gráfica 26*, *Gráfica 28*, *Gráfica 39*, *Gráfica 41* y *Gráfica 43*).

La distribución de la iluminancia presenta una mayor uniformidad (disminución de variaciones durante el día) en el módulo con aerogel en comparación con los módulos restantes, pues funciona como un filtro de luz natural. La distribución uniforme de la iluminancia en este módulo aumenta considerablemente en los tres tipos de cielo de la temporada cálida. Asimismo, la iluminancia en el módulo es mayor en la temporada fría que en la temporada cálida; mientras que, la iluminancia en los módulos restantes ocurre lo contrario.

6.1.2 Resultados de la matriz de Leopold.

La matriz de Leopold realiza un análisis numérico del impacto de los materiales en cada indicador (factores que pertenecen al sistema envolvente). La sumatoria (Σ) de las filas, en el análisis de magnitud, permite identificar los indicadores más afectados por los materiales; mientras que, la Σ de las columnas permite identificar el material de estudio con el mayor impacto negativo (valores negativos) o positivo (valores positivos) en los factores del sistema envolvente. La Σ de las filas y columnas, en el análisis de importancia, permite clasificar el efecto de los materiales en cada indicador, por medio del porcentaje total:

Tabla 26. Clasificación de la importancia de impacto.

CONCEPTO	ESCALA	DESCRIPCIÓN
CO	< 25 %	El efecto del impacto es irrelevante o compatible.
M	≥ 25 y < 50 %;	El efecto del impacto es moderado.
S	≥ 50 y < 75 %	El efecto del impacto es severo.
C	≥ 75 %.	El efecto del impacto es crítico.

Fuente: Elaboración propia.

El aerogel es el material con el mejor desempeño que los materiales restantes, en la sumatoria del grupo A (propiedades físicas de la cubierta). El material causó el menor impacto negativo en los indicadores del grupo A, con una magnitud de -20 y un efecto crítico del 75 %. El indicador “conductividad térmica” tiene el menor impacto negativo y efecto crítico, con un valor de -1; mientras que, en la “transmitancia” ocurre lo contrario, con un valor de -8. El desempeño del aerogel es 24 % mejor que el PVC y 21 % mejor que el PTFE (ver *Tabla 27, Grupo A*).

El aerogel es el material con el mejor desempeño que los materiales restantes, en la sumatoria del grupo B (condiciones térmicas del espacio interior). El material causó el menor impacto negativo en los indicadores del grupo B, con una magnitud de -10 y un efecto crítico del 78 %. El “tiempo dentro de la zona de confort térmico” (inciso a) es el indicador con el mayor impacto positivo y efecto crítico, con un valor de 2; mientras que, en la “fluctuación térmica diaria” (inciso a) el impacto es negativo, con un valor de -9. El desempeño del aerogel es 2 % mejor que el PVC y 3 % mejor que el PTFE (ver *Tabla 27, Grupo B*).

El aerogel es el material con el mejor desempeño que los materiales restantes, en la sumatoria del grupo C (condiciones lumínicas del espacio interior). El material causó el mayor impacto positivo en los indicadores del grupo C, con una magnitud de 27 y un efecto crítico del 83 %. El “tiempo promedio diario dentro de la ZCE” (inciso f) es el indicador con el mayor impacto positivo y efecto crítico, con un valor de 5; mientras que, en el “tiempo promedio diario debajo de la ZCE” (inciso l) el impacto es negativo, con un valor de -3. El desempeño del aerogel es 1 % mejor que el PVC y el PTFE (ver *Tabla 27, Grupo C*).

El aerogel es el material con el menor impacto negativo que los demás materiales, en la sumatoria de los factores del sistema envolvente. El material ocasionó el menor impacto negativo en el sistema envolvente, con una magnitud total de -4 y un efecto severo del 80 %. El “tiempo promedio diario dentro de la ZCE” (inciso f) es el indicador con el mayor impacto positivo y efecto crítico, con un valor de 5; mientras que, en la “fluctuación térmica diaria” (inciso a), el impacto es negativo y de efecto crítico, con un valor de -9. El desempeño de la membrana de aerogel es 2 % mejor que el PVC y 3 % mejor que el PTFE (ver *Tabla 27, TOTAL FACTORES DEL SISTEMA ENVOLVENTE*).

La fluctuación térmica diaria (inciso b) es el indicador más afectado por los materiales de estudio, en la sumatoria de las filas de la matriz. El PTFE provocó el mayor impacto negativo en el indicador, con una magnitud de -10 y un efecto crítico del 80 %. El impacto ocasionado fue mayor en los días con cielo parcialmente nublado de la temporada cálida que en los tipos de cielo restantes de las temporadas de estudio. La diferencia de fluctuaciones térmicas diaria entre los módulos de prueba y los tipos de cielo es más evidente en la temporada cálida que en la temporada fría. El efecto ocasionado incide de manera indirecta en el interior del modelo, con una intensidad muy alta y de percepción general (ver *Tabla 27*).

El tiempo promedio diario dentro de la ZCE, durante el horario operativo, (inciso f) es el indicador menos afectado por los materiales de estudio, en la sumatoria de las filas de la matriz. El aerogel provocó el mayor impacto positivo en el indicador, con una magnitud de 5 y un efecto crítico del 90 %. El tiempo promedio de la iluminancia, en junio, es de 5 horas dentro de la ZCE, durante el horario operativo. Junio representa la temporada de lluvias, con una mayoría de días con cielo parcialmente nublados. El efecto ocasionado incide de manera directa en el interior, con una intensidad muy alta y de percepción general.

De acuerdo con lo anterior, los materiales no convencionales ocasionan el menor impacto negativo en los factores del sistema envolvente que el PVC (material comparativo), con una magnitud de -15 y un efecto crítico del 79 %. El desempeño total de los materiales no convencionales es 1 % mejor que el PVC, lo que no es estadísticamente significativo pues representa: 70 min más dentro de la ZCT durante el año, 25 min más dentro de la ZCT durante los 12 días de estudio, 30 min más dentro de la ZCE durante el año y 30 min menos debajo de la ZCE durante el año, en promedio.

En consecuencia, se sugiere considerar el porcentaje mínimo aceptable para seleccionar el material aislante translúcido. El porcentaje mínimo aceptable para las propiedades térmicas y ópticas de los materiales es del 10 %, esto quiere decir que la conductividad térmica, el coeficiente de transferencia de calor y la transmitancia de luz visible es igual a un material superaislante. En el caso de las condiciones térmicas y lumínicas, el porcentaje mínimo aceptable es del 34 y 20 % respectivamente, esto quiere decir que el tiempo promedio dentro de la zona de confort es de 300 minutos, lo que representa el 50 % del horario operativo, y la fluctuación térmica diaria se encuentra en el límite mínimo de los valores de referencia. Por lo tanto, el porcentaje total mínimo aceptable es del 25 %.

La *matriz de selección de materiales aislantes translúcidos* es una herramienta de evaluación para la toma de decisiones durante la etapa conceptual del diseño. Esto permite que el arquitecto compare el desempeño térmico y lumínico de diferentes materiales con el mismo objetivo, para obtener el mayor aprovechamiento de luz natural, condiciones térmicas y lumínicas dentro de los valores de referencia y alto rendimiento energético en las cubiertas de edificios de uso comercial en la ZMCM, durante el horario operativo.

Tabla 27. Matriz de selección de materiales aislantes translúcidos para cubiertas translúcidas.

CONDICIÓN INTERIOR			MATERIALES PROPUESTOS				IMPACTO TOTAL DE LOS TIM's		Material comparativo		IMPACTO FINAL	
			TIM's no convencionales						PVC			
			Aerogel	PTFE	M	I	M	I	M	I	M	I
A. PROPIEDAD	A.1 P. térmicas	a) Conductividad térmica (k)	-1	10	-10	6	-11	16	-7	7	-18	23
		b) Coef. de transferencia de calor (valor U)	-4	9	-10	6	-14	15	-10	6	-24	21
	A.2 P. ópticas	a) Transmitancia (τ) en temporada cálida	-8	6	-3	9	-11	15	-6	6	-17	21
		b) Transmitancia (τ) en temporada fría	-7	6	-6	9	-13	15	-7	6	-20	21
TOTAL (PROPIEDADES)			-20	30	-29	30	-49	60	-30	25	-79	85
Porcentajes (%)			-51%	75%	-72%	74%	-61%	74%	-75%	63%	-66%	70%
B. CONDICIÓN TÉRMICA DEL AMBIENTE INTERIOR	B1. Tiempo promedio diario dentro de la ZCT (\bar{T}_{ZCT_i})	a) Enero	1	9	1	9	2	17	1	9	3	26
		b) Febrero	1	9	1	9	2	17	1	9	3	26
		c) Marzo	1	9	2	9	3	17	2	9	5	26
		d) Abril	2	9	2	9	4	17	2	9	6	26
		e) Mayo	2	9	1	9	3	17	1	9	4	26
		f) Junio	2	9	2	9	4	17	2	9	6	26
		g) Julio	2	9	1	9	3	17	1	9	4	26
		h) Agosto	1	9	1	9	2	17	1	9	3	26
		i) Septiembre	1	9	2	9	3	17	2	9	5	26
		j) Octubre	2	9	2	9	4	17	2	9	6	26
		k) Noviembre	2	9	2	9	4	17	1	9	5	26
		l) Diciembre	1	9	1	9	2	17	1	9	3	26
	B2. Tiempo dentro de la zona de confort térmico (T_{ZCT_i})	a) Temporada cálida en CD	2	9	2	9	5	17	2	9	7	26
		b) Temporada cálida en CPN	2	9	1	9	3	17	1	9	4	26
		c) Temporada cálida en CN	2	9	2	9	4	17	2	9	6	26
		d) Temporada fría en CD	1	9	1	9	2	17	1	9	3	26
		e) Temporada fría en CPN	1	9	1	9	2	17	1	9	3	26
		f) Temporada fría en CN	1	9	1	9	2	17	1	9	4	26
	B3. Unidades de enfriamiento (ue _{di})	a) Temporada cálida en CD	-1	6	-1	8	-2	13	-1	6	-3	19
		b) Temporada cálida en CPN	-1	8	-1	8	-3	15	-1	8	-4	23
		c) Temporada cálida en CN	2	5	1	5	3	9	1	5	4	14
		d) Temporada fría en CD	1	8	-1	8	0	15	-1	8	0	23
		e) Temporada fría en CPN	-1	8	1	8	0	15	1	8	1	23
		f) Temporada fría en CN	1	6	-1	6	0	11	-1	8	0	19
	B4. Fluctuación térmica diaria (ftdi)	a) Temporada cálida en CD	-9	8	-10	8	-19	15	-9	8	-29	23
		b) Temporada cálida en CPN	-9	8	-10	8	-19	15	-9	8	-27	23
		c) Temporada cálida en CN	-2	5	-4	6	-6	10	-3	6	-9	16
		d) Temporada fría en CD	-7	8	-7	8	-14	15	-7	8	-21	23
e) Temporada fría en CPN		-7	8	-7	8	-14	15	-7	8	-21	23	
f) Temporada fría en CN		-5	8	-5	8	-10	15	-5	8	-15	23	
TOTAL (CONDICIÓN TÉRMICA)			-10	233	-18	236	-28	469	-15	236	-44	705
Porcentajes (%)			-3%	78%	-6%	79%	-5%	78%	-5%	79%	-5%	78%
C. CONDICIÓN LUMÍNICA DEL AMBIENTE INTERIOR	C1. Tiempo promedio diario dentro de la ZCE (\bar{T}_{ZCE_i})	a) Enero	3	9	3	9	6	18	2	9	8	27
		b) Febrero	3	9	2	9	5	18	3	9	8	27
		c) Marzo	3	9	2	9	5	18	3	9	8	27
		d) Abril	4	9	2	9	6	18	2	9	8	27
		e) Mayo	4	9	1	9	5	18	2	9	7	27
		f) Junio	5	9	3	9	8	18	4	9	12	27
		g) Julio	4	9	2	9	6	18	3	9	9	27
		h) Agosto	3	9	2	9	5	18	3	9	8	27
		i) Septiembre	3	9	2	9	5	18	3	9	8	27
		j) Octubre	3	9	2	9	5	18	2	9	7	27
		k) Noviembre	3	9	3	9	6	18	3	9	9	27
		l) Diciembre	2	9	3	9	5	18	3	9	8	27
	C2. Tiempo dentro de la ZCE (T_{ZCE_i})	a) Temporada cálida en CD	3	9	3	9	6	18	3	9	9	27
		b) Temporada cálida en CPN	3	9	2	9	6	18	3	9	8	27
		c) Temporada cálida en CN	3	9	2	9	6	18	3	9	8	27
		d) Temporada fría en CD	3	9	2	9	5	18	3	9	8	27
		e) Temporada fría en CPN	3	9	3	9	5	18	3	9	8	27
		f) Temporada fría en CN	3	9	3	9	6	18	3	9	9	27
	C3. Tiempo promedio diario debajo de la ZCE (\bar{T}_{DZCE_i})	a) Enero	-2	8	-2	8	-4	15	-3	8	-7	23
		b) Febrero	-2	8	-2	8	-4	15	-2	8	-6	23
		c) Marzo	-2	8	-2	8	-4	15	-2	8	-6	23
		d) Abril	-1	8	-1	6	-2	13	-1	6	-3	19
		e) Mayo	-1	8	-1	6	-2	13	-1	6	-3	19
		f) Junio	-2	8	-1	6	-3	13	-1	6	-4	19
		g) Julio	-2	8	-1	8	-3	15	-1	6	-4	21
		h) Agosto	-1	8	-1	6	-2	13	-1	6	-3	19
		i) Septiembre	-2	8	-2	8	-4	15	-2	8	-6	23
		j) Octubre	-2	8	-2	8	-4	15	-3	8	-7	23
k) Noviembre		-2	8	-2	8	-4	15	-2	8	-6	23	
l) Diciembre		-3	8	-2	8	-5	15	-2	8	-7	23	
C3. Tiempo debajo de la ZCE (T_{DZCE_i})	a) Temporada cálida en CD	-2	8	1	6	-1	13	-1	6	-2	19	
	b) Temporada cálida en CPN	-1	8	-1	6	-2	13	-1	6	-3	19	
	c) Temporada cálida en CN	-1	8	2	8	1	15	1	6	2	21	
	d) Temporada fría en CD	-1	8	-1	6	-3	13	-1	6	-4	19	
	e) Temporada fría en CPN	-2	8	-1	6	-3	13	-2	8	-5	21	
	f) Temporada fría en CN	-2	8	-2	8	-4	15	-2	8	-6	23	
TOTAL (CONDICIÓN LUMÍNICA)			27	297	21	281	48	578	23	279	70	857
Porcentajes (%)			7%	83%	6%	83%	7%	80%	6%	78%	7%	81%
TOTAL (FACTORES DEL SISTEMA ENVOLVENTE)			-4	560	-25	547	-15	553	-23	540	-17	549
Porcentajes (%)			-1%	80%	-4%	78%	-2%	79%	-3%	77%	25%	78%

Fuente: Elaboración propia

6.2 Conclusiones

La presente investigación obtuvo tres logros importantes. El primer logro fue diseñar y construir los módulos de prueba y un equipo de monitoreo durante la pandemia de COVID-19, debido a las dificultades que se presentaron, como acceder a los laboratorios en la UNAM y comprar materiales en establecimientos. Esto demuestra que, independientemente de las condiciones, es posible desarrollar un método experimental para estudiar materiales. El siguiente logro fue crear una importante base de datos local de iluminación global y temperatura durante un ciclo climatológico (un año), desde abril del 2021 hasta marzo del 2022. La implementación de estaciones meteorológicas en sitio permite realizar mediciones de parámetros específicos que requiere la investigación, los cuales pueden ser otorgados y utilizados en diversas investigaciones. Esto demuestra la importancia de realizar mediciones de parámetros meteorológicos en sitio. El tercer logro fue desarrollar una matriz de decisión para seleccionar materiales aislantes translúcidos, de acuerdo con los requerimientos térmico y lumínicos de los usuarios para edificios de uso comercial. La matriz es una herramienta de evaluación destinada a arquitectos y a diseñadores de la construcción, para comparar el desempeño de diferentes materiales con un mismo objetivo durante la etapa conceptual del diseño arquitectónico. Esto permitió continuar con la demostración de la eficiencia energética de los materiales aislantes translúcidos en el interior de los espacios.

Los tres módulos de prueba fueron diseñados y construidos para comparar el comportamiento térmico y lumínico de los tres materiales de estudio (el aerogel, PTFE y PVC) en cubiertas de estructura curva y gran claro. El emplazamiento de los módulos se proyectó en una gráfica solar para analizar y eliminar las obstrucciones por sombra de cualquier elemento. El sistema envolvente de los módulos no aisló la suficiente energía térmica del exterior para mantener las condiciones térmicas estables en el interior, como sucede en una caja adiabática. Esto ocasionó un aumento considerable de energía térmica en el interior de los módulos, similar a un invernadero, presentando resultados de temperatura inesperados, como son los altos niveles de temperatura en el interior de los módulos respecto al ambiente, pues se esperaba que la temperatura interior fuera considerablemente menor y constante respecto al ambiente durante el día. Sin embargo, el método experimental cumplió su objetivo principal, debido a que el fenómeno ocurre de manera similar en los tres módulos.

Los módulos lograron tener las mismas características, dimensiones y condiciones ambientales, por lo que fueron adecuados para analizar los materiales de estudio.

Se instaló una estación meteorológica en el sitio para medir y registrar en tiempo real la temperatura, humedad relativa e iluminancia global en la superficie de la cubierta, en el interior de los módulos y en el exterior. Las mediciones fueron registradas y almacenadas minuto a minuto en el módulo de adquisición de datos, durante un ciclo climatológico. Es importante considerar la cantidad de mediciones recabadas de cada parámetro. Por ende, la base de datos fue analizada en un programa especializado (MATLAB, versión R2021b para uso académico) para procesar el volumen de datos generados. El programa generó diagramas de líneas y contornos de una matriz bidimensional y tablas para elaborar un resumen estadístico horario y mensual de los parámetros de medición. Asimismo, el análisis de datos, en gráficas de líneas, permitió observar, identificar y clasificar los días de estudio a partir de los niveles máximos de iluminancia y la distribución de iluminancia. El programa permitió ordenar sistemáticamente los datos por fecha, hora, tipo de parámetro y de módulo; procesar la información para realizar el análisis climático; observar los cambios de los parámetros durante un ciclo climatológico y definir los periodos de estudio.

El comportamiento térmico y lumínico se analizó en periodos mensuales y días representativos de las temporadas cálida y fría, para cada material de estudio. La caracterización del comportamiento térmico y lumínico del aerogel es muy importante, debido a las condiciones meteorológicas de la ZMCM y su variabilidad de temperatura e iluminancia diurna. Por lo tanto, el análisis del aerogel es de interés nacional para aplicar medidas de ahorro energético en cubiertas de estructura curva en edificios de uso comercial y de interés mundial por la aportación de información del material en construcciones de México. Los días de estudio son útiles para analizar de manera específica varios parámetros, en cambio, el análisis anual es indispensable para observar y caracterizar el comportamiento general de los materiales y aminorar el sesgo de información.

A partir de la caracterización térmica y lumínica en el interior de los módulos, se desarrolló la matriz de decisión para evaluar los materiales de estudio. Los indicadores de desempeño relacionaron los datos obtenidos de la caracterización del comportamiento térmico y lumínico de cada material con los valores óptimos obtenidos de la literatura. La

implementación de los 10 indicadores fue suficiente para evaluar el desempeño térmico y lumínico de los materiales y realizar una comparación entre ellos.

El aerogel fue identificado como el material con el mejor desempeño térmico y lumínico en la matriz de decisión. La regulación térmica es mayor en el módulo con aerogel respecto a los demás durante el periodo de estudio, por presentar los valores más bajos en la temperatura promedio máxima, fluctuación térmica diaria y temperatura promedio mensual y diaria. Asimismo, la uniformidad de la distribución de iluminancia es mayor en el interior del módulo con aerogel que los demás módulos durante el periodo de estudio, por lo que el material funciona como un filtro de luz natural.

El aerogel tiene mejor desempeño en días con cielo nublado que en un cielo despejado o parcialmente nublado, debido a que la iluminancia se encuentra por más tiempo dentro de la ZCE y menos tiempo debajo de la ZCE, durante el horario operativo, y las unidades de enfriamiento (durante el horario operativo) y la fluctuación térmica diaria son menores. El desempeño del aerogel, en días con cielo nublado, es mayor en la temporada cálida que en la temporada fría.

De acuerdo con los resultados de la matriz de decisión, las condiciones térmicas y lumínicas en el interior del módulo con aerogel no mostraron mejorías considerables respecto al módulo con PVC (elemento comparativo). El desempeño térmico del módulo con aerogel es 2 % mejor que en el módulo con PVC; mientras que, en el desempeño lumínico, el módulo con aerogel es 1 % mejor que en el módulo con PVC. El desempeño térmico y lumínico del material disminuyó en la zona de estudio respecto a otros sitios geográficos donde se estudió el material. Por lo tanto, el desempeño del aerogel depende de la posición geográfica, las condiciones meteorológicas y arquitectónicas. Esto demuestra que, el aerogel estudiado en la presente investigación no podría ser viable en la ZMCM por la considerable variación de temperatura e iluminancia diurna que se presenta en la zona de estudio y no es adecuado para el uso en exteriores, debido al desgaste que se reportó en las fotografías durante el periodo de estudio. Sin embargo, el trabajo está incompleto debido a la falta de parámetros de evaluación y no es concluyente por la falta de evaluaciones en otros lugares geográficos.

La herramienta de evaluación permitió obtener conclusiones referentes a los tipos de cielo en las temporadas de estudio y el ciclo climatológico:

- Cielo despejado: el tiempo dentro de la ZCT, en la temporada cálida, es mayor que en los tipos de cielo restantes; mientras que, en la temporada fría, permanece por menos tiempo. La fluctuación térmica diaria aumenta considerablemente en el interior de los módulos de prueba. El tiempo dentro de la ZCE, en la temporada cálida, es mayor que en los tipos de cielo restantes.
- Cielo parcialmente nublado: el tiempo dentro de la ZCT, en la temporada cálida, es menor que en los tipos de cielo restantes. Las unidades de enfriamiento aumentan considerablemente en los módulos de prueba.
- Cielo nublado: la fluctuación térmica diaria disminuye considerablemente en el interior de los módulos de prueba. Las unidades de enfriamiento, en la temporada cálida, disminuyen considerablemente en los módulos de prueba. El tiempo dentro de la ZCE, en la temporada fría, es mayor que en los tipos de cielo restantes. El tiempo debajo de la ZCE, en la temporada fría, es mayor que en los demás; mientras que, en la temporada cálida, permanece por menos tiempo.
- En junio: la temperatura e iluminancia, en los módulos de prueba, permanecen por más tiempo dentro de la zona de confort térmico y lumínico, durante el horario operativo de un edificio de uso comercial. Los tipos de cielos que predominan en este mes son parcialmente nublados y nublados.

Los resultados de la matriz de selección de materiales aislantes translúcidos validaron la hipótesis de investigación. Se comprobó que, los materiales aislantes translúcidos son estrategias de sistema pasivo que mejoraron las condiciones térmicas y lumínicas en el interior de los módulos respecto al material convencional. Sin embargo, la mejoría de los TIM's no es estadísticamente significativo. El desempeño térmico del aerogel es 2 % mejor que el PVC y 3 % mejor que el PTFE; mientras que, en el desempeño lumínico, el aerogel es 1 % mejor que el PVC y el PTFE. Por lo tanto, la membrana de aerogel es 2 % mejor que el PVC y 3 % mejor que el PTFE, por causar el menor impacto negativo en el sistema envolvente.

La hipótesis y objetivos, planteados originalmente, se cumplieron de manera satisfactoria. Por lo tanto, los objetivos fueron adecuados para comprobar la hipótesis de investigación y así afirmar que los materiales aislantes translúcidos mejoran el comportamiento térmico y lumínico. Esto demuestra la importancia de estudiar nuevos materiales para su aplicación en edificaciones, aprovechar la luz natural en el interior de los espacios y, posteriormente, comprobar que ayuden a disminuir las pérdidas/ganancias térmicas y así aminorar las emisiones de CO₂ respecto a los materiales convencionales. De manera simultánea, la aplicación de tecnologías de materiales proporciona las condiciones térmicas y ópticas adecuadas para el usuario y ayuda a atenuar el cambio climático.

Las aportaciones de la investigación se enfocan en caracterizar el espacio interior de los módulos de prueba y desarrollar una herramienta de diseño, para comparar materiales aislantes translúcidos en cubiertas con estructura curva, ubicados en la ZMCM:

1. La creación de una importante *base de datos local* de iluminancia global y temperatura, que pueden ser otorgados y utilizados para diversas investigaciones.
2. Caracterización del *comportamiento térmico y lumínico* del aerogel (material aislante translúcido no convencional) en un módulo de prueba, con información medida en sitio durante un ciclo climatológico.
3. La implementación de *indicadores de desempeño térmico y lumínico* en herramientas de evaluación de materiales.
4. El desarrollo de una *matriz de selección de materiales aislantes translúcidos* para identificar el material con el mayor desempeño térmico y lumínico, de acuerdo con los requerimientos de temperatura e iluminancia interior de un edificio de uso comercial, destinado a diseñadores de la construcción y arquitectos.
5. Promover la importancia del *estudio de materiales aislantes translúcidos* para aumentar la eficiencia energética de cubiertas de estructura curva y gran claro en la ZMCM.

6.3 Trabajo a futuro

Para mejorar la *matriz de selección de materiales aislantes translúcidos*, se propone complementar la evaluación con parámetros de costos, el ambiente interior (como el aspecto acústico, calidad de aire, higrotérmico e iluminación), propiedades físicas del sistema envolvente (como la densidad, resistencia mecánica, valor G, absorción acústica, entre otros.) y su impacto en el ambiente y la salud pública.

Para mejorar la caracterización del *comportamiento lumínico* de los materiales, se sugiere analizar los valores superiores a la ZCE en la herramienta de evaluación. Por lo tanto, es importante considerar el parámetro “tiempo de probabilidad de deslumbramiento en iluminación natural (DGP)”, de acuerdo con la norma prEN 14501 y EN 17037.

Para continuar con el análisis de eficiencia energética de los materiales aislantes translúcidos en el interior de los espacios, se propone estudiar la posible disminución en el consumo energético por la iluminación artificial y sistemas de climatización en edificios de uso comercial.

Debido a que la posición geográfica y las condiciones meteorológicas influyen en el desempeño del aerogel, se propone estudiar la viabilidad del material en un clima cálido subhúmedo, como Mérida, Yucatán, pues la variación de temperatura diurna es menor respecto al sitio de estudio en la ZMCM (meteoblue 2023). Por lo tanto, se espera que el desempeño térmico y lumínico del aerogel sea más eficiente en comparación con la ZMCM.

Uno de los problemas que se observaron en los módulos de prueba fue el desgaste de los materiales. El aerogel tuvo el mayor grado de degradación por la radiación solar en la ZMCM. Por lo tanto, se sugiere analizar el tipo de radiación que responde al deterioro de los materiales aislantes translúcidos en ambientes controlados o expuestos y correlacionar los resultados con el desempeño lumínico. Asimismo, se sugiere realizar un análisis más específico en los cambios físicos de los materiales, como el color, densidad, flexibilidad, etc.

Debido al desgaste que presentó el aerogel en la investigación, se sugiere continuar con el desarrollo del material, así como los productos con aerogel, para su aplicación en exteriores, donde la variación de temperatura diurna es similar a la ZMCM.

Anexo A. Centros comerciales en la ZMCM

Tabla A.1 Nuevos centros comerciales en etapa de construcción y en proceso de construcción durante el 2019 y 2021.

No.	Desarrolladora o financiera	Nombre	Año de apertura	Ubicación / Ciudad	Entidad	Tipo	Estatus	Configuración espacial
1	Mexico Retail Properties	Portal Xochimilco	ND	Xochimilco	CDMX	Power center	Preconstrucción	Techado
2		Insurgentes	2022	CDMX		ND		ND
3		Puerta Tacubaya	2022	Miguel Hidalgo		Usos mixtos		ND
1	Mexico Retail Properties	Portal Britania	2019	CDMX	CDMX	Power center	Construcción	Techado
2		Portal Centenario	2021	Alvaro Obregón		Community Center		Techado
3		Puerta Oriente	2022	CDMX		Usos mixtos		ND
4	Grupo/Fibra Danhos	Parque Tepeyac	2021	Gustavo A. Madero	CDMX	ND	Construcción	Techado
5	E-Group/Fibra Uno	Mitikah	2021	Benito Juárez		Luxury Fashion Mall		Techado
6		Distrito Santa Fe	2022	Cuajimalpa		Luxury Fashion Mall		Abierto
7	GICSA	Paseo Metepec	2021	Metepec	Edo. Méx.	Regional Mall	Construcción	Techado
8		Paseo Coapa	2021	Coapa	CDMX	ND		Techado
9		Plazas Outlet Sur	2021	CDMX	CDMX	Outlet Town Center		Abierto
10		Lomas Altas	2019	Miguel Hidalgo		ND		Techado
11		Paseo Xochimilco	2020	Xochimilco	Edo. Méx.	Fashion Mall		Abierto
12		Galerías Metepec	2021	Metepec		Mallertainment		Techado
13	Sordo Madaleno	Expansión Plaza Satélite	2018	Satélite	CDMX	Comercial	Techado	
14	Grupo CAABSA	Centro Iztapalapa	2020	Iztapalapa		Fashion Center	Techado	
15	Grupo DLG	Puerta Aragón	2021	Gustavo A Madero		Lifestyle	Abierto	
16	Fibra Plus	Espacio Condesa	2021	Hipódromo Condesa		Movicenter (Uso Mixto)	Techado	
17	ALHEL/Grupo Televisa	Foro Azteca	2021	Coyoacán		Fashion mall	Abierto	
18	Estrategia Urbana / Grupo INDI	Patio Martin Carrera	2022	Villa Gustavo A. Madero		Movicenter	Techado	

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de páginas de internet de los desarrolladores y la revista Real Estate Market & Lifestyle (2018).

Nota: Los recuadros de color gris representan los inmuebles en etapa de preconstrucción. ND se refiere a información no disponible.

Anexo B. Calibración de estaciones meteorológicas

Realizado por: Mtro. en Instrumentación Carlos Javier Solís Oviedo
Ced. Prof. 13363665

A continuación, se muestra la calibración de las estaciones meteorológicas que miden la temperatura, humedad e iluminancia del ambiente. Así como tres sensores que miden la temperatura superficial. Las cuatro estaciones tienen las mismas características físicas, desde el mismo circuito hasta la misma estructura. Los tres sensores de temperatura superficial también tienen las mismas características. Por lo anterior, es apropiado comparar sus mediciones cuando están instaladas en diferentes espacios. Estos instrumentos de medición están basados en la revisión de la literatura, están probados y ajustados [1].

Se desarrolló un sistema de adquisición de datos, que recibe, ajusta, almacena y envía cada minuto la información de 7 sensores de temperatura, 4 sensores de humedad y 4 sensores de iluminancia. Este sistema recibe las señales de los sensores con el protocolo de comunicación I^2C , las procesa y las envía a un módulo externo por *radiofrecuencia*. A su vez se almacena la información en memorias *SD* con el protocolo de comunicación *SPI*. Este sistema se alimenta de baterías conectadas a celdas solares. Su diseño permite tomar mediciones continuas durante un año, soportando las condiciones del clima.

Anexo B.1 Calibración de sensores de Humedad y Temperatura

La calibración de los sensores de temperatura y humedad está basada en comparar y ajustar sus mediciones con las mediciones de un instrumento calibrado bajo la acreditación *ISO/IEC 17025:2017 #93752* [2].

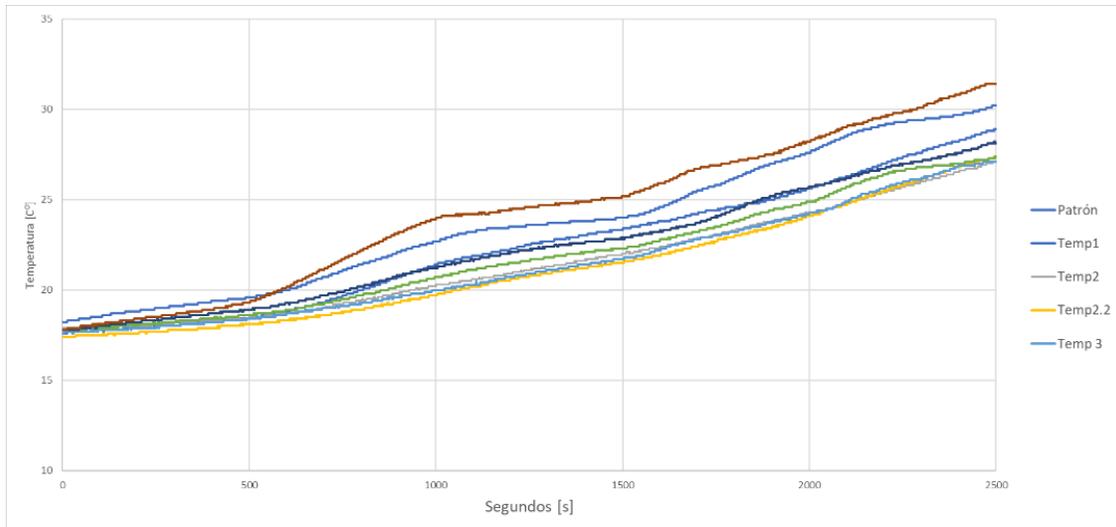
El sensor utilizado para medir la temperatura y humedad es el DHT22 [3], con los siguientes datos técnicos:

- Sensor digital.
- Resolución: 0.1 [C°]; 0.1 [%RH].
- Rango: -40 [C°] a 80 [C°]; 0 [%RH] a 100 [%RH].
- Alimentación: 3.3[V] – 6 [V].

El instrumento *patrón* utilizado para la calibración:

- Modelo: UNI-T UT333.
- Serie: C203013698.
- Resolución: 0.1 [C°], 0.1 [%RH].
- Rango: -10 [C°] a 60 [C°], 0 [%RH] a 100 [%RH].
- Certificado de calibración: #5474 acreditación *ISO/IEC 17025:2017 #93752* [2].

Se diseñó un banco de pruebas, donde se modificó la temperatura gradualmente, desde los 18° hasta los 32° y la humedad relativa desde un 22% hasta 62%. Los datos obtenidos de la calibración de los sensores de temperatura se muestran en la *Gráfica B.1*.



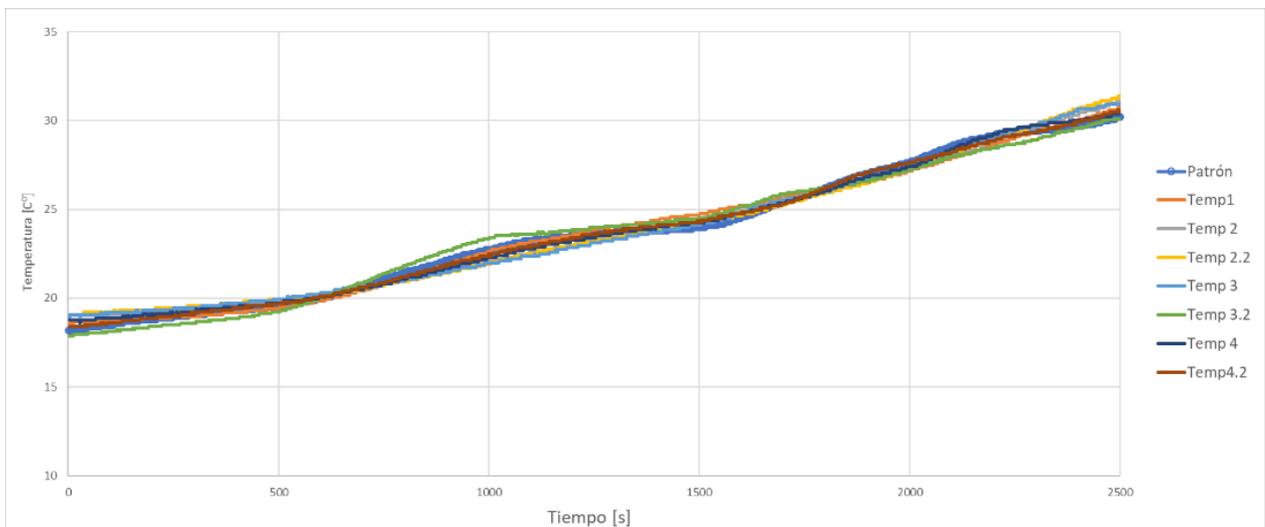
Gráfica B.1 Datos obtenidos de los sensores de temperatura, sin calibrar.

Las ecuaciones utilizadas para el ajuste de *offset* y *escala* de los sensores de temperatura se muestran en la **Tabla B.1**.

Tabla B.1 Ecuaciones para la calibración de las señales de los sensores de temperatura.

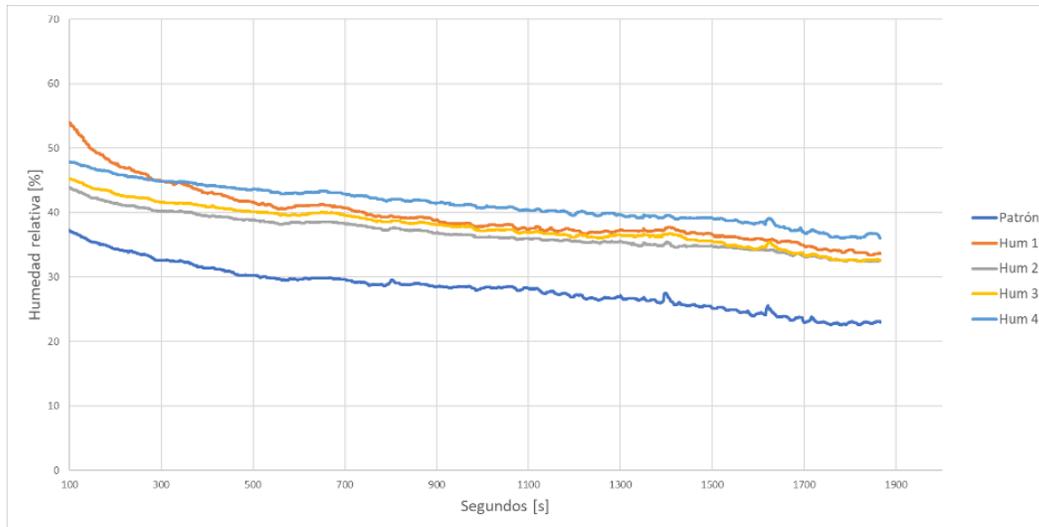
VARIABLE	ECUACIÓN PARA AJUSTAR OFFSET Y ESCALA
Temp 1	$(1.0758)x - 0.3869$
Temp 2	$(1.3098)x - 4.4024$
Temp 2.2	$(1.2266)x - 2.2537$
Temp 3	$(1.2597)x - 3.2208$
Temp 3.2	$(0.8965)x + 1.9187$
Temp 4	$(1.2212)x - 2.9851$
Temp 4.2	$(1.1754)x - 2.5401$

Los datos calibrados de los sensores de temperatura se muestran en la **Gráfica B.2**.



Gráfica B.2 Datos obtenidos de los sensores de temperatura, calibrados.

En la **Gráfica B.3** se muestran las señales de los sensores de humedad, sin calibración.



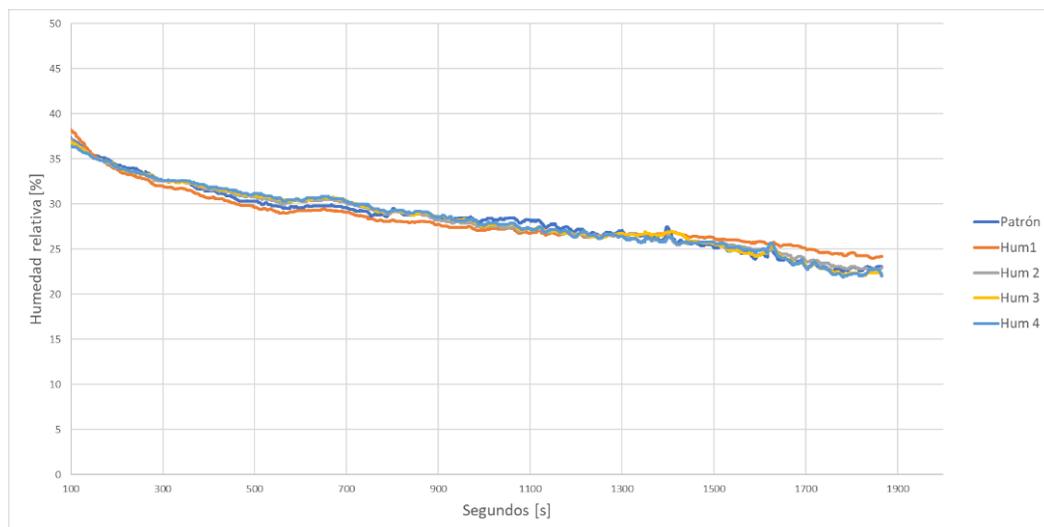
Gráfica B.3 Datos obtenidos de los sensores de humedad, sin calibrar.

Las ecuaciones utilizadas para el ajuste de *offset* y *escala* de la humedad relativa se muestran en la **Tabla B.2**.

Tabla B.2 Ecuaciones para la calibración de las señales de los sensores de humedad.

VARIABLE	ECUACIÓN PARA AJUSTAR OFFSET Y ESCALA
Hum 1	$(-0.0063)x + 44.281$
Hum 2	$(1.0875)x - 2.2073$
Hum 3	$(1.1515)x - 15.301$
Hum 4	$(1.0595)x - 5.834$

Los datos calibrados de los sensores de humedad se muestran en la **Gráfica B.4**.



Gráfica B.4 Datos obtenidos de los sensores de humedad, calibrados.

Con base en los resultados de la calibración, se encuentra que el error máximo global en las temperaturas es de $\pm 0.9^\circ$, y en las humedades de $\pm 3.3\%$.

Anexo B.2 Acondicionamiento del sensor de luz

La calibración de los sensores de iluminancia está basada en la comparación y ajuste de sus mediciones con las del sensor LI210R Photometric sensor LI-COR [4].

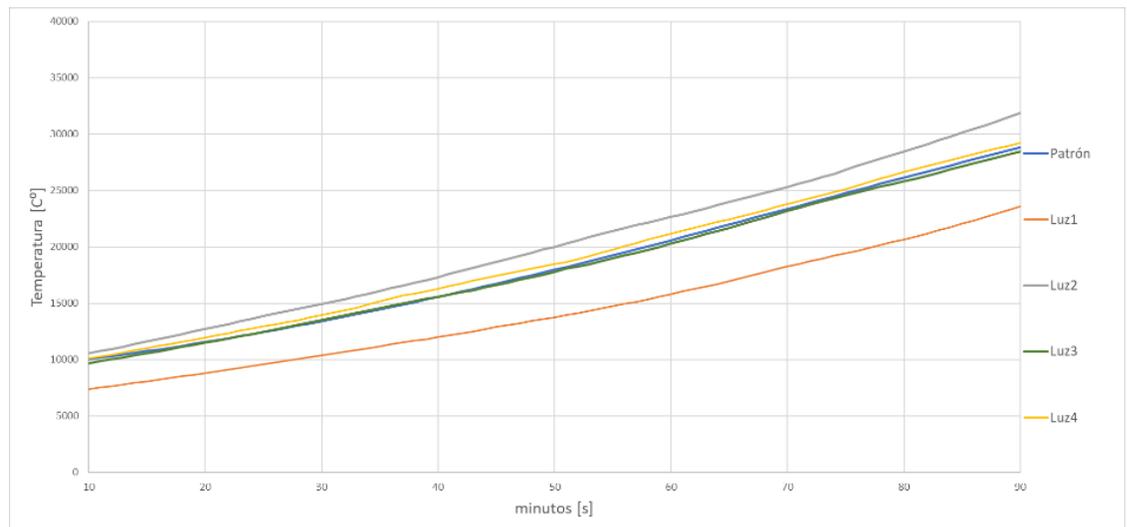
El sensor utilizado para medir la iluminancia es el MAX44009 [5], con los siguientes datos técnicos:

- Voltaje de 1.7 [V] a 3.6 [V].
- Señales digitales por protocolo I^2c .
- Rango: de 0.045 [Lux] a 188000 [Lux].
- Resolución: 16 bits (2.8 [Lux]).

La señal del sensor LI210R se acondicionó con un amplificador operacional no inversor con una ganancia de 820. Después se convirtió su señal de analógica a digital con un ADC de 16 [bits]. Las características del sensor son:

- LI210R Photometric sensor LI-COR.
- 10 [mV] por 100 [klux].
- Resolución: 1[uV].

En la *Grafica B.5* se muestran las señales de los sensores de iluminancia global, sin calibración.



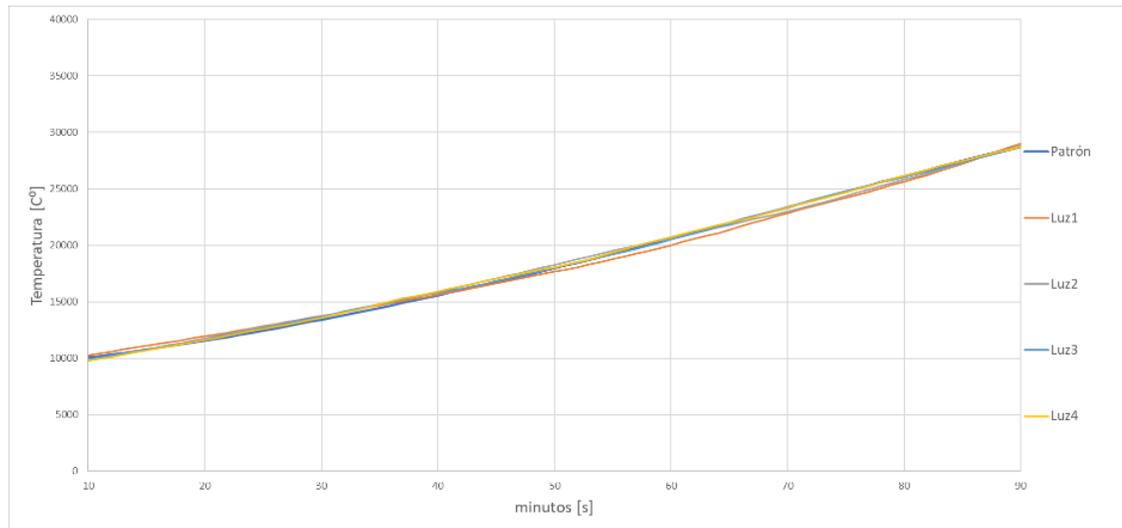
Grafica B.5 Datos obtenidos de los sensores de iluminancia, sin calibrar.

Las ecuaciones utilizadas para el ajuste de offset y escala de la iluminancia global se muestran en la *Tabla B.3*.

Tabla B.3 Ecuaciones para la calibración de las señales de los sensores de iluminancia global.

VARIABLE	ECUACIÓN PARA AJUSTAR OFFSET Y ESCALA
Luz 1	$(1.1567)x + 1737$
Luz 2	$(0.8939)x + 373.64$
Luz 3	$(1.0016)x + 188.84$
Luz 4	$(0.9914)x - 240.55$

Los datos calibrados de los sensores de iluminancia global se muestran en la *Grafica B.6*.



Grafica B.6 Datos obtenidos de los sensores de iluminancia, calibrados.

Con base en los resultados de la calibración, se encuentra que el error máximo global de la iluminancia es de ± 513 [Lux].

Referencias

- [1] R. Hernández, C. Fernández, P. Baptista. Metodología de la Investigación. 6a. ed. Mc Graw Hill. 2014. Pp.12.
- [2] JD Calibraciones. Certificado de calibración #5474. Laboratorio de Metrología Termohigrómetros. México. Certificado conforme a la acreditación ISO/IEC 17025:2017. 2021.
- [3] Adafruit. Enero 2021. DHT22. [Datasheet de sensor]. Disponible: <https://www.adafruit.com/product/385#technical-details>
- [4] LI-COR Enero 2023. LI-210R Photometric Sensor. [Datos técnicos]. Disponible: <https://www.licor.com/env/products/light/photometric>.
- [5] Analog Devices. Enero 2023. MAX44009. [Datasheet de sensor]. Disponible: <https://www.analog.com/en/products/max44009.html#product-overview>.

Bibliografía

- Abdul Mujeebu, Muhammad, Noman Ashraf, y Abdulkarim Alsuwayigh. 2016. “Energy performance and economic viability of nano aerogel glazing and nano vacuum insulation panel in multi-story office building”. *Energy* 113 (octubre): 949–56. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.136>.
- Adafruit. 2021. “DHT22”. <https://www.adafruit.com/product/385#technical-details>.
- Aerogel Technologies. 2022. “Thermal Wrap™ 3.5-mm Blanket”. Cabot® Aerogel. 2022. <http://www.buyaerogel.com/>.
- AIA (American Institute of Architects). 1974. *Energy conservation in building design*. USA.
- Alonso, L., C. Bedoya, B. Lauret, y F. Alonso. 2013. “F²TE³: sistema de cerramiento transparente, ligero, de altas prestaciones energéticas que permite el diseño con formas libres”. *Informes de la Construcción* 65 (532): 443–56. <https://doi.org/10.3989/ic.12.068>.
- AMP (Animación y Promoción del Medio), y FVS (Fundación Vida Sostenible). 2011. *Guía de buenas prácticas energéticas en galerías y centros comerciales. Madrid Ahorra con Energía*. Madrid, España: Gráficas Arias Montano, S.A. www.madrid.org.
- Analog Devices. 2023. “MAX44009”. <https://www.analog.com/en/products/max44009.html#product-overview>.
- Arias Orozco, Silvia, y Carlos David Ávila Ramírez. 2004. *La iluminación natural en la Arquitectura (en climas semitemplados)*. Editado por Biblioteca Digital wdg.biblio y Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco, México. <https://hdl.handle.net/20.500.12104/73673>.
- ASHRAE (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers). 2017. *ANSI/ASHRAE Standard 55-2017 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta, GA, EUA: ANSI (American National Standards Institute). www.ashrae.org/standards.
- ASHRAE (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), AIA (American Institute, America), IESNA (Illuminating Engineering Society of North America), USGBC (U.S. Green Building Council), y U.S. Department of Energy. 2011. *Advanced energy design guide for medium to big box retail buildings : achieving 50% energy savings toward a net zero energy building*. Atlanta, GA, EUA: ASHRAE. www.ashrae.org.
- Atawa H, Mohamed, Ahmed Al-Kattan, y Ahmed Elwan. 2015. “Research Article Towards Nano Architecture: Nanomaterial in Architecture - a Review of Functions and Applications”. *International Journal of Recent Scientific Research* 6 (4): 3551–64. <http://www.recentscientific.com>.
- ATIGA (Alianza Tecnológica Intersectorial de Galicia). 2016. “Estado del Arte de Materiales Inteligentes”. *Oportunidades Industria 4.0 en Galicia*, noviembre de 2016. <https://www.atiga.es/industria-4-0-2020/>.
- Augustyniak, M J. 2009. “Tensotherm Insulated Tension Membrane”. *Birdair, Inc.* Nueva York, EUA. <https://www.birdair.com/membrane/insulated-translucent-membrane/>.
- Auliciems, Andris, y Steven Vajk Szokolay. 2007. *Thermal Comfort*. Editado por Steven V. Szokolay. *Design Tools and Techniques*. 2a ed. Australia: PLEA (Passive and Low Energy Architecture International) NOTE 3.
- Ávila Ramírez, David Carlos, y Silvia Arias Orozco. 2015. “La envolvente arquitectónica y su influencia en la iluminación natural”. Editado por Claudia Muñoz Sanguinetti. *Hábitat Sustentable* 5 (1): 44–53. <https://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/article/view/1811>.
- Babbie, Earl R. 2016. *The Practice of Social Research*. 14a ed. Boston, MA, EUA: South-Western.
- Baetens, Ruben. 2013. “High performance thermal insulation materials for buildings”. En *Nanotechnology in Eco-Efficient Construction*, editado por F Pacheco-Torgal, M V Diamanti, A Nazari, y C-G. Granqvist, 188–206. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Woodhead Publishing.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9780857098832.2.188>.

- Baker, Paul. 2008. "Thermal Performance of Traditional Windows". *Technical Paper*. 1. Edinburgh, Escocia: Technical Conservation Group. www.historic-scotland.gov.uk.
- Balcomb, J. Douglas, y Robert W. Jones. 1988. "Workbook for Workshop on Advanced Passive Solar Design". En *Passive Solar Architecture*. Bled, Yugoslavia.
- Banham, Reyner. 1969. *Architecture of the Well-tempered Environment*. Chicago, EUA: University of Chicago Press.
- Barajas, Heidi Lasley, Noam Chomsky, y Donald Macedo. 2001. "Chomsky on Miseducation". Editado por Planeta. *Contemporary Sociology* 30 (6): 640. <https://doi.org/10.2307/3089040>.
- Benton, Tim. 2007. *The villas of Le Corbusier and Pierre Jeanneret, 1920-1930*. Editado por Birkhauser Verlag AG. Rev. Ext. Basel, Suiza.
- Birdair. 2014. "Insulated Tensioned Membrane". *Tensile Architectural Structures*. Amherst, NY, EUA. www.birdair.com.
- . 2021a. "Projects". 2021. https://www.birdair.com/projects/?wpv-wpcf-estatus=completed&wpv-wpcf-fabric-type%5B%5D=insulated-tensioned-membrane%2C&wpv_aux_current_post_id=33&wpv_view_count=591-TCPID33.
- . 2021b. "Sustentabilidad". 2021. <https://www.birdair.com/technology/sustainability/>.
- Boubekri, Mohamed. 2008a. "Introduction". En *Daylighting, Architecture and Health*, editado por Mohamed Boubekri, 1–8. Oxford, EUA: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-6724-1.00025-7>.
- . 2008b. "Psychology of lighting". En *Daylighting, Architecture and Health*, editado por Mohamed Boubekri, 87–109. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-6724-1.00005-1>.
- British Standards Institution. 2021. *BS EN 12464-1:2021 Light and lighting. Lighting of work places Indoor work places*. Bruselas, Belgica: CEN (Comité Europeo de Normalización). <https://www.en-standard.eu/bs-en-12464-1-2021-light-and-lighting-lighting-of-work-places-indoor-work-places/>.
- Buen Rodríguez, Odón de. 2009. *Greenhouse Gas Emission Baselines and reduction potentials from buildings in México*. Editado por Peter Graham, Jenny Yamamoto, y Chen Nan. Paris, Francia: UNEP (United Nations Environment Programme). <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/31006/SBCI-Mexicoreport.pdf>.
- Bullon i Lahuerta, Joan Manuel, y Ma Ángela del Castillo Alarcos. 2010. *Observación Solar*. Editado por Antares Producción & Distribución. ApEA (Asociación para la Enseñanza de la Astronomía). www.apea.es.
- Buratti, Cinzia, y Elisa Moretti. 2011. "Transparent insulating materials for buildings energy saving: experimental results and performance evaluation". En *Third International Conference on Applied Energy*, 1421–32. Perugia, Italia.
- Butcher, Ken Bonnie Craig, y CIBSE (Chartered Institution of Building Services Engineers). 2015. *Environmental Design: Cibse Guide A (versión 8a edición)*. 8a ed. Londres: CIBSE. <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpEDCIBSE1/environmental-design-cibse>.
- Capezzuto, Dave, y Alex Oltmanns. 2015. "Las renovaciones de la casa de campo John J. Dillon culminaron con Birdair". *Birdair*. EUA. <https://www.birdair.com/john-j-dillon-field-house-renovations-capped-off-with-birdair/>.
- Carlos. 2014. "EER, COP, SEER y SCOP: Midiendo la eficiencia del aire acondicionado". Nergiza. el 26 de febrero de 2014. <https://nergiza.com/eer-cop-seer-y-scop-midiendo-la-eficiencia-del-aire-acondicionado/>.
- Carlos, Jorge S., y Helena Corvacho. 2015. "Evaluation of the performance indices of a ventilated double

- window through experimental and analytical procedures: SHGC-values”. *Energy and Buildings* 86 (enero): 886–97. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.002>.
- Casabianca, Gabriela, y Sabrina Mandel. 2018. *Jornadas de construcción sustentable 2017. Sistemas de Iluminación Natural y Artificial Eficientes*. Editado por APra (Agencia de Protección Ambiental). Buenos Aires, Argentina. <https://buenosaires.gob.ar/agenciaambiental>.
- Casini, Marco. 2016. “Advanced insulating materials”. En *Smart Buildings*, 127–77. N.Y., EUA: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100635-1.00004-6>.
- CEI (Comité Español de Iluminación), IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía), y CSCAE (Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España). 2005. *Guía técnica para el aprovechamiento de la luz natural en la iluminación de edificios. Informes IDAE*. 1a ed. Vol. 1. Madrid, España: IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía). www.idae.es.
- Cerdá Talón, Mercedes. 2019. “Membranas para estructuras superficiales tensadas”. Universidad Politécnica de Valencia.
- Chatellier Lorentzen, Diego, y Michael McNeil. 2019. “Consumo de electricidad de edificios no residenciales en México: la importancia del sector de servicios”. *Cuaderno de la CONUEE. Número 3/Nuevo Ciclo*, abril de 2019. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/455552/cuaderno3nvciclo_2.pdf.
- Chen, Youming, Yaling Xiao, Siqian Zheng, Yang Liu, y Yupeng Li. 2018. “Dynamic heat transfer model and applicability evaluation of aerogel glazing system in various climates of China”. *Energy* 163 (noviembre): 1115–24. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.158>.
- CIE (International Commission on Illumination). 2004. *Spatial distribution of daylight — CIE standard general sky*. CIE. <https://www.iso.org/standard/38608.html>.
- CONAFOVI (Comisión Nacional de Fomento a la Vivienda). 2006. *Guía para el uso eficiente de la energía en la vivienda*. Editado por Arroyo+Cerda. 1a ed. México. www.conafovi.gob.mx.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2018. “Mapa interactivo de SIGACUA (Sistema de Información Geográfica de Acuíferos y Cuencas)”. Ciudad de México, México: Gobierno de México. <https://sigagis.conagua.gob.mx/aprovechamientos/>.
- Cotana, Franco, Anna Laura Pisello, Elisa Moretti, y Cinzia Buratti. 2014. “Multipurpose characterization of glazing systems with silica aerogel: In-field experimental analysis of thermal-energy, lighting and acoustic performance”. *Building and Environment* 81 (noviembre): 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.06.014>.
- Creswell, John W. 2009. *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches*. 3a ed. EUA: SAGE Publications Ltd. [http://www.mim.ac.mw/books/John W. Creswell’s Research Design 3rd Ed.pdf](http://www.mim.ac.mw/books/John%20W.%20Creswell%27s%20Research%20Design%203rd%20Ed.pdf).
- Cromer, Alan H. 1996. *Física para las ciencias de la vida*. Editado por Reverté. 2a ed. Barcelona, España.
- Cuce, Erdem, Pinar Mert Cuce, Christopher J. Wood, y Saffa B. Riffat. 2014. “Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: A comprehensive review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 34 (junio): 273–99. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.017>.
- Da, Yan, y Hong Tianzhen. 2018. “Definition and Simulation of Occupant Behavior in Buildings”. EBC Annex 66. *International Energy Agency*. [http://www.annex66.org/sites/default/files/2018FinalReport/Annex 66 Final Report - read.pdf](http://www.annex66.org/sites/default/files/2018FinalReport/Annex%2066%20Final%20Report%20-%20read.pdf).
- Dellavedova, Maria Gabriela. 2016. “Guía Metodológica Para La Elaboración De Una Evaluación De Impacto Ambiental”. *Programa de Investigaciones del Taller No. 17*. 1a ed. Buenos Aires, Argentina.
- Department of Trade and Industry. 2006. “Materials Innovation and Growth Team”. URN 06/651. *A strategy for Materials*. Reino Unido: Materials UK. <http://www.matuk.co.uk/>.

- Dietz, A. 1979. "Materials for solar energy collectors". Editado por Sayigh. *Solar Energy Applications in Buildings*.
- Dollens, Dennis. 2003. *De lo digital a lo analógico*. Barcelona, España: Gustavo Gili. <https://rebiun.baratz.es/rebiun/record/Rebiun06208375>.
- Dowson, Mark, David Harrison, Salmaan Craig, y Zachary Gill. 2011. "Improving the thermal performance of single-glazed windows using translucent granular aerogel". *International Journal of Sustainable Engineering* 4 (3): 266–80. <https://doi.org/10.1080/19397038.2011.558931>.
- EPA (US Environmental Protection Agency). 2009. "Energy Efficiency as a Low-Cost Resource for Achieving Carbon Emissions Reductions, National Action Plan for Energy Efficiency". Washington, D.C.: EPA. 2009. http://www.epa.gov/cleanenergy/%0Adocuments/suca/ee_and_carbon.pdf.
- Fanger, P.O. 1970. *Thermal Comfort: analysis and applications in environmental engineering*. Copenhagen, Dinamarca: Danish Technical Press. <https://archive.org/details/thermalcomfortan0000fang>.
- Flores Larsen, Silvana, Luis Rengifo, Lorena Gómez Paz, y Ovidio Gómez de la Lastra. 2010. "Simulación térmica de un edificio de oficinas con doble fachada vidriada en la ciudad de Salta". *AVERMA (Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente) vol. 14*, 2010. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/99880>.
- Fuentes Freixanet, Víctor Armando. 1984. *Arquitectura bioclimática*. Ciudad de México, México: Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco.
- García Valladores, Octavio, y Isaac Pilatowsky Figueroa. 2017. *Aplicaciones térmicas de la energía solar en los sectores residencial, servicio e industrial*. Editado por Juan Tonda Mazón. 1a ed. Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Energías Renovables. <http://www.fordecyt.ier.unam.mx/pdf/pdfTermoSolar.pdf>.
- García Villalobos, Ilse. 2011. "La vegetación como sistema térmico en la naturación extensiva de cubiertas." Universidad Nacional Autónoma de México. <http://132.248.9.195/ptd2012/enero/0676168/Index.html>.
- Garduño, René. 1998. *El veleidoso clima. La Ciencia para Todos*. 2a ed. Vol. 127. Ciudad de México, México: Fondo de Cultura Económica. http://biblioteca.uttijuana.edu.mx/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=2306&shelfbrowse_itemnumber=3893.
- Gasca-Zamora, José. 2017. "Centros comerciales de la Ciudad de México: el ascenso de los negocios inmobiliarios orientados al consumo". *EURE (Santiago)* 43 (130): 73–96. <https://doi.org/10.4067/s0250-71612017000300073>.
- Giugliano, Paolo. 2003. "Technical guideline to permanent tensile architectures". 1a ed. Mehler Technologies. <https://pdf.archiexpo.com/pdf/mehler-texnologies/technical-guideline-to-permanent-tensile-architectures/64886-221589.html>.
- Givoni, Baruch. 1969. *Man, Climate and Architecture*. 1a ed. Ámsterdam, Países Bajos; Londres, Reino Unido; Nueva York, EUA: Elsevier Publishing Company Limited. <https://archive.org/search.php?query=external-identifiaer%3A%22urn%3Aoclc%3Arecord%3A1153312588%22>.
- Godoy Muñoz, Alfonso. 2012. "El confort térmico adaptativo: aplicación en la edificación en España". Universidad Politécnica de Cataluña. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/18763/TFM_Alfonso_Godoy_Munoz.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Gómez Mendoza, Leticia. 2014. "Curso de meteorología".
- Google Earth (Versión 9.165.0.1), y INEGI. 2022. "Nezahualcóyotl zona norte, Edo. Méx." Mapa. 2022. <https://earth.google.com/web/search/Nezahualcoyotl,+Nezahualc%C3%B3yotl,+M%C3%A9x./@19.4324941,-99.01693236,2228.79398828a,35084.16603784d,34.99935685y,0h,0t,0r/data=CpABGmYSYAolMHg4NWQxZmNhOTQ2NTc3NDQ5OjB4NzkxZDIzMDcwZmU0Y2Y0OBnF9w8zRWYzQCEzoe6oVr9YwColTmV6YWhlYWx>.

- Groesser, S. N., S. Ulli-Ber, y M. T. Mojtahedzadeh. 2006. “Diffusion Dynamics of Energy Efficient Innovations in the Residential Building Environment: A Conceptual Model”. En *24th International Conference of the System Dynamics Society*, editado por Andreas Größler, 37. Nijmegen, Países Bajos: System Dynamics Society. <http://www.alexandria.unisg.ch/31581/>.
- Guadarrama Gándara, Cecilia Genoveva. 2017. “Luz natural en la arquitectura. Aportaciones científicas, tecnológicas y de diseño”. Universidad Nacional Autónoma México. https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000768332.
- . 2020. “Curso de Aplicaciones Lumínicas”. Ciudad de México, México: Programa de Maestría en Arquitectura, Campo de Tecnologías, UNAM, 2021-1.
- Guadarrama Gándara, Cecilia Genoveva, y Daniel Bronfman Rubli. 2016. “Sobre luz natural en la arquitectura”. *Bitácora arquitectura*, núm. 29 (julio): 76. <https://doi.org/10.22201/fa.14058901p.2015.29.56260>.
- Guillén Guillén, César Armando, Alberto Muciño Vélez, Perla Santa Ana Lozada, y Gemma Verduzco Chirino. 2018. “Análisis de las propiedades térmicas del Arundo Donax (carrizo) y Zea Mays (caña maíz) para su uso como material aislante de cubiertas”. *Academia XXII* 9 (18): 90. <https://doi.org/10.22201/fa.2007252Xp.2018.18.67947>.
- Gutiérrez Chong, Natividad, y Aldair Albarran Ramos. 2018. “Mapa 1 Municipios de la ZMVM”. Proyecto CONACYT. FC-2016/2368. Ciudad de México. <https://juventudes.sociales.unam.mx/mapas/>.
- Hegazy, Ibrahim Rizk. 2020. “Toward energy-efficient governmental buildings in Egypt: investigating the impact of nano aerogel glazing on energy performance”. *International Journal of Low-Carbon Technologies* 15 (1): 17–24. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctz052>.
- Hernandez Sampieri, Roberto, Carlos Fernandez Collado, y Maria del Pilar Baptista Lucio. 2014. *Metodología de la investigación*. 5a ed. Ciudad de México, México: McGraw-Hill.
- Herrera Padilla, Ámbar. 2018. “Por un retail sustentable”. *Retailers Magazine. Innovación, negocios y tecnología*, noviembre de 2018. <https://retailers.mx/malls-4-0-el-siguiente-nivel-energetico-2/>.
- Hoarau, Caroline. 2018. “Los retos”. *Retailers Magazine. Innovación, negocios y tecnología*, noviembre de 2018. <https://retailers.mx/malls-4-0-el-siguiente-nivel-energetico-2/>.
- Hu, Ming. 2015. “The significance of nanotechnology in architectural design”. En *Conferencia ARCC 2015. Architectural Research Centers Consortium. FUTURE of Architectural Research*, editado por Ajla Aksamija, John Haymaker, y Abbas Aminmansour, 90–96. Chicago, Illinois, EUA: Perkins+Will, Universidad de Massachusetts Amherst. <http://www.arcc-arch.org/past-conferences/>.
- Huang, Yu, y Jian-lei Niu. 2015. “Application of super-insulating translucent silica aerogel glazing system on commercial building envelope of humid subtropical climates – Impact on space cooling load”. *Energy* 83 (abril): 316–25. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.02.027>.
- ICACC (Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático), y DGRU (Dirección General de Repositorios Universitarios). 2009. “Atlas Climático Digital de México”. Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México. <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx:8080/ACDM/servmapas>.
- IES (Illuminating Engineering Society). 2021. *ANSI/IES LS-1-22, Lighting Science: Nomenclature and Definitions for Illuminating Engineering*. Nueva York, EUA: ANSI (American National Standards Institute). <https://www.ies.org/standards/definitions/>.
- ISO (International Organization for Standardization). 2002. *ISO 8995-1:2002 Lighting of work places — Part 1: Indoor*. 2a ed. Suiza: ISO/TC 274 - Light and lighting. <https://www.iso.org/standard/28857.html>.
- Jelle, Bjørn Petter, Andrew Hynd, Arild Gustavsen, Dariush Arasteh, Howdy Goudey, y Robert Hart. 2012. “Fenestration of today and tomorrow: A state-of-the-art review and future research opportunities”. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 96 (enero): 1–28. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.08.010>.

- Jensen, K.I., J.M. Schultz, y F.H. Kristiansen. 2004. “Development of windows based on highly insulating aerogel glazings”. *Journal of Non-Crystalline Solids* 350 (diciembre): 351–57. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2004.06.047>.
- Jiangsu VEIK Technology & Materials. 2022. “PTFE architectural membrane solution”. China: VEIK. https://es.made-in-china.com/co_jstxveik/.
- Jones, Wendy, Alistair Gibb, Chris Goodier, Phil Bust, Mo Song, y Jie Jin. 2019. “Nanomaterials in construction – what is being used, and where?” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials* 172 (2): 49–62. <https://doi.org/10.1680/jcoma.16.00011>.
- Junkers. 2017. “SEER Y SCOP: ¿QUÉ MIDEN LOS NUEVOS ESTÁNDARES?” Ahorro de Energía. mayo de 2017. <https://blog.junkers.es/seer-y-scop-que-miden-los-nuevos-estandares/>.
- Kerlinger, Fred N., y Lee B. Howard. 2002. *Investigación del comportamiento. Métodos de investigación en ciencias sociales*. 4a ed. España: McGraw-Hill / Interamericana de México.
- Kistler, S. S. 1931. “Coherent Expanded Aerogels and Jellies”. *Nature* 127 (3211): 741–741. <https://doi.org/10.1038/127741a0>.
- Kittler, R., R. Perez, y S. Darula. 1997. “Sky Classification Respecting Energy-Efficient Lighting, Glare and Control Needs”. *Journal of the Illuminating Engineering Society* 26 (1): 57–68. <https://doi.org/10.1080/00994480.1997.10748167>.
- Kneifel, Joshua. 2010. “Life-cycle carbon and cost analysis of energy efficiency measures in new commercial buildings”. *Energy and Buildings* 42 (3): 333–40. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.09.011>.
- Koeningsberger, O. H., T.G. Ingersoll, Alan Mayhew, y Steven Vajk Szokolay. 1975. *Manual of Tropical Housing and Building: Climate Design*. 1a ed. India: Orient Longman Private Limited.
- Laforge, P, B Souyri, M Fontoynt, y G Achard. 1997. “Simulation of Visual and Thermal Comfort Related To Daylighting and Solar Radiation in Office Buildings”. *Building Simulation*, 1997. <https://www.aivc.org/resource/simulation-visual-and-thermal-comfort-related-daylighting-and-solar-radiation-office>.
- Lebens, Ralph M. 1980. *Passive Solar Heating Design*. 1a ed. Ripple Rd, Barking, Reino Unido: Applied Science Publishers, Ltd.
- Lechner, Norbert. 2015. *Heating, Cooling, Lighting: Sustainable Design Methods for Architects*. 4a ed. Hoboken, Nueva Jersey, Estados Unidos de América: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken. <https://www.wiley.com/en-mx/9781118582428>.
- Leslie, RP, LC Radetsky, y AM Smith. 2012. “Conceptual design metrics for daylighting”. *Lighting Research & Technology* 44 (3): 277–90. <https://doi.org/10.1177/1477153511423076>.
- LI-COR. 2023. “LI-210R Photometric Sensor”. <https://www.licor.com/env/products/light/photometric>.
- Li, Dong, Yangyang Wu, Baichao Wang, Changyu Liu, y Müslüm Arici. 2019. “Optical and thermal performance of glazing units containing PCM in buildings: A review”. *Construction and Building Materials*, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117327>.
- Lira Oliver, Adriana, y Ana Belén Guevara Mon. 2017. “Medición de la reflectancia solar; la reflectancia solar como proceso determinante en la temperatura ambiente de las islas de calor en la climatización natural al interior de las edificaciones.”, 12.
- Liskiewicz, Izabela. 2020. “El aerogel en la arquitectura bioclimática”. Madrid, España: E.T.S. Arquitectura (UPM). <http://oa.upm.es/58006/>.
- Lonas Lorenzo. 2017. “Lonas y Membranas Arquitectónicas”. Productos. Ciudad de México, México. 2017. <https://lonaslorenzo.com.mx/productos/>.
- Maceiras Pinilla, Alejandra. 2017. *Manual Técnico BREEAM ES Nueva Construcción 2015*. 2a ed. Coruña,

- España: BREEAM. <https://breeam.es/manuales-tecnicos/>.
- Martin, C., y M. Watson. 1990. "A field test of the performance of an opaque wall clad with transparent insulation material". ETSU-S-1197-P8. Reino Unido. <https://www.osti.gov/etdweb/biblio/10147177>.
- Martín Monroy, Manuel. 2006. *Manual de la ILUMINACIÓN*. Editado por Ayuntamiento de Las Palmas de Gran Canaria. Vol. 1. Islas Canarias: Universidad de las Palmas de Gran Canaria, Departamento de Construcción Arquitectónica. <https://m2db.files.wordpress.com/2014/09/manual-1-iluminacion.pdf>.
- Martínez Bencardino, Ciro. 2012. *Estadística y Muestreo*. 13a ed. Bogotá: Ecoe Ediciones.
- Martínez Schulte, Dinorah, y Ricardo López Gutierrez. 2016. "La Cuenca de México". Issuu. 2016. https://issuu.com/dinorahmschulte/docs/book_final_-_9no_semestre.compresse.
- Mazria, Edward. 1979. *The Passive Solar Energy Book*. Emmaus, Pennsylvania, Estados Unidos de America: Rodale Press.
- Meadows, Donella H., Jorgen Randers, y Dennis L. Meadows. 2017. "The Limits to Growth (1972)". En *The Future of Nature*, editado por Robin Libby, Sörlin Sverker, y Paul Warde, 101–16. Yale University Press. <https://doi.org/10.12987/9780300188479-012>.
- Mehler Technologies. 2013. "FR 580 TIVOLI". 7213 5260. *Especificaciones del producto*. Alemania: Valmex. <https://www.mehler-technologies.com/en/produkte-archive/fr-580-tivoli/>.
- Mendoza, Elva. 2018. "Medir para eficientar". *Retailers Magazine. Innovación, negocios y tecnología*, noviembre de 2018. <https://retailers.mx/malls-4-0-el-siguiente-nivel-energetico-2/>.
- Meneses Bedoya, Edgar Alonso. 2016. "La representación de la luz natural en el proyecto arquitectónico". Universidad Politécnica de Cataluña. <http://hdl.handle.net/10803/384836>.
- Messick, Samuel. 1993. "Validity". En *Educational Measurement*, 3a ed., 13–104. Nueva York, EUA: American Council on education and Macmillan. <https://eric.ed.gov/?id=ED372105>.
- meteoblue. 2022. "Datos meteorológicos de Bosques de Viena". [history+](https://www.meteoblue.com/es/historyplus). meteoblue AG. 2022. <https://www.meteoblue.com/es/historyplus>.
- meteoblue. 2023. "Datos climáticos y meteorológicos históricos simulados para Mérida". [history+](https://www.meteoblue.com/es/historyplus). meteoblue AG. 2023. <https://www.meteoblue.com/es/historyplus>.
- Meteotest AG, Jan Remund, Stefan Muller, Michael Schmutz, Daniele Barsotti, Pascal Graf, y René Cattin. 2022. *MN-8-logo.png*. Handbook part I: Software. Suiza: Meteotest AG. <https://meteonorm.com/assets/img/MN-8-logo.png>.
- Ministerio de Fomento. 2014. *DA DB-HE / 3 Puentes térmicos*. España: Código Técnico de la Edificación. https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DA-DB-HE-3_Puentes_termicos.pdf.
- Morales Ramírez, José Diego. 2019. *Proyecto arquitectónico de máxima eficiencia energética*. Editado por José Manuel Márquez Corona. 1a ed. Ciudad de México, México: Facultad de Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México. <http://www.librosoa.unam.mx/handle/123456789/2995>.
- Muhammad, Iqbal. 1983. *An Introduction to Solar Radiation*. Estados Unidos de América: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373750-2.X5001-0>.
- Munsell Color Company. 2023a. "About Munsell Color". Munsell Color System. 2023. <https://munsell.com/about-munsell-color/>.
- . 2023b. "Is There a List of Munsell Colors by Name?" Munsell Color System. Color Matching. 2023. <https://munsell.com/faqs/list-of-colors-by-notation-name/>.
- Naciones Unidas. 2018. *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*. (LC/G.2681-P/Rev.3) Santiago, Chile: CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe).

- Navarrete, Fernando. 2019. “Destaca México por mayor afluencia en centros comerciales”. Inmobiliario. el 23 de octubre de 2019. <https://centrourbano.com/2019/08/23/destaca-mexico-mayor-afluencia-centros-comerciales/>.
- Olgay, V. 1967. “Bioclimatic orientation method for buildings”. *International Journal of Biometeorology* 11 (2): 163–74. <https://doi.org/10.1007/BF01426843>.
- Olgay, Victor. 1998. *Arquitectura y clima. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*. 1a ed. Barcelona, España: Gustavo Gili.
- Orlov, D. L., A. G. Chesnokov, A. E. Gorin, y O. A. Emel’yanova. 1998. “Problems of energy efficient glazing”. *Glass and Ceramics* 55 (1–2): 3–7. <https://doi.org/10.1007/BF03180134>.
- Pabón, José Daniel, Jorge Zea, Gloria León, Gonzalo Hurtado, Olga Cecilia González, y José Édgar Montealegre. 2001. “La atmósfera, el tiempo y el clima”. En *El medio ambiente en Colombia*, editado por Pablo Leyva, 2a ed., 34–91. Bogotá, Colombia: IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). <http://hdl.handle.net/20.500.12324/33408>.
- Pacheco-Torgal, Fernando, y J.A. Labrincha. 2013. “The future of construction materials research and the seventh UN Millennium Development Goal: A few insights”. *Construction and Building Materials* 40 (marzo): 729–37. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.007>.
- Pagliaro, Mario, Rosaria Ciriminna, y Giovanni Palmisano. 2009. “Silica-based hybrid coatings”. *Journal of Materials Chemistry* 19 (20): 3116. <https://doi.org/10.1039/b819615j>.
- Paneri, A., I.L. Wong, y S. Burek. 2019. “Transparent insulation materials: An overview on past, present and future developments”. *Solar Energy* 184 (mayo): 59–83. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.091>.
- Papadopoulos, A.M. 2005. “State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments”. *Energy and Buildings* 37 (1): 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.05.006>.
- Parsons, Ken. 2014. *Human Thermal Environments*. 3a ed. Nueva York, EUA: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b16750>.
- Pattini, Andrea Elvira. 2006. “11. Luz natural e iluminación de interiores”. En *Manual de Iluminación Eficiente*, 2–24. Buenos Aires, Argentina: edUTecNe (Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional). <http://www.edutecne.utn.edu.ar/eli-iluminacion/>.
- Quintela del Río, Alejandro. 2019. *Estadística Básica Edulcorada*. bookdown. <https://bookdown.org/aquintela/EBE/>.
- Real Estate Market & Lifestyle. 2018. “RANKING: Centros Comerciales en México 2018”. *Mercado inmobiliario*, el 31 de octubre de 2018. <https://www.realestatemarket.com.mx/articulos/mercado-inmobiliario/comercial/23872-ranking-centros-comerciales-en-mexico-2018>.
- Reim, M., W. Körner, J. Manara, S. Korder, M. Arduini-Schuster, H.-P. Ebert, y J. Fricke. 2005. “Silica aerogel granulate material for thermal insulation and daylighting”. *Solar Energy* 79 (2): 131–39. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.08.032>.
- Rodríguez Velázquez, Juan Alberto, y Cristina Steegmann Pascual. 2013. “Modelos matemáticos”. *Matemáticas 1*. 2013. <http://hdl.handle.net/123456789/125>.
- Ruiz, Álvaro. 2019. “Sistemas activos en arquitectura”. el 9 de abril de 2019. <https://www.alvaroruizarquitectura.com/sistemas-activos-en-arquitectura-n-34-es>.
- Saint-Gobain. 2021. “Lo Esencial en vidrio para fachadas”. Madrid, España: Saint-Gobain Building Glass. <https://www.saint-gobain-glass.es/es/lo-esencial-en-vidrio>.
- Sánchez Benítez, Ricardo. 2017. “Diseño y caracterización de espacios experimentales. Módulo de experimentación del Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura”. Universidad Nacional Autónoma de México. https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000754419.

- Santillana Ramos, Carmelo. 2018. “Lo que gasta un centro comercial”. *Retailers Magazine. Innovación, negocios y tecnología*, noviembre de 2018. <https://retailers.mx/malls-4-0-el-siguiente-nivel-energetico-2/>.
- Sarmiento M. Pedro. 2007. *Energía solar en arquitectura y construcción*. Editado por RiL editores. 1a ed. Santiago, Chile. <https://books.google.com.mx/books?id=0bMTSyEjNIUC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>.
- Schiler, Marc E., y Shweta A. Japee. 1997. “Interior Illuminance, Daylight Controls and Occupant Response”. En *Conference: The Vital Signs project: Dissemination activities*, 120. Los Angeles, California, EUA: Universidad de California Berkeley. https://www.academia.edu/21346171/Interior_Illuminance_Daylight_Controls_and_Occupant_Response.
- Schultz, J. M., K. I. Jensen, y F. H. Kristiansen. 2005. “Super insulating aerogel glazing”. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 89 (2–3): 275–85. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2005.01.016>.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda del Estado de México, y H. Ayuntamiento de Nezahualcóyotl. 2005. *Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Nezahualcóyotl, Estado de México*. Estado de México, México: SEDUO (Secretaría de Desarrollo Urbano y Obra), Gobierno del Estado de México. <https://seduo.edomex.gob.mx/nezahualcoyotl>.
- Secretaría del Trabajo y Previsión Social. 2008. *NOM-025-STPS-2008 Condiciones de iluminación en los centros de trabajo. Diario Oficial de la Federación*. Ciudad de México, México: Comité Consultivo Nacional de Normalización de Seguridad y Salud en el Trabajo.
- SEDATU (Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano), CONAPO (Consejo Nacional de Población), y INEGI (Instituto de Estadística y Geografía). 2018. *Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2015*. 1a ed. México: SEGOB (Secretaría de Gobernación). <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825006792>.
- SENER (Secretaría de Energía), y SIE (Sistema de Información Energética). 2018. “Consumo final de energía eléctrica por sector”. Base de Indicadores de Eficiencia Energética (BIEE). Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE). 2018. <http://www.biee-conuee.net/site/index.php>.
- Serra Florensa, Rafael, y Helena Coch Roura. 2001. *Arquitectura y energía natural*. 1a ed. Barcelona: Edicions UPS (Universidad Politécnica de Cataluña). <http://hdl.handle.net/2099.3/36276>.
- Shannon, Robert E. 1988. *Simulación de sistemas: diseño, desarrollo e implantación*. 1a ed. Ciudad de México, México: Trillas.
- Slessor, Catherine. 1997. *Eco-Tech: Sustainable Architecture and High Technology*. Londres, Gran Bretaña: Thames and Hudson.
- Soler & Palau. 2015. “Los efectos y la velocidad del aire”. Velocidad del aire. México: S&P Sistemas de Ventilación SLU. 2015. <https://www.solerpalau.com/es-es/hojas-tecnicas-velocidad-del-aire/>.
- Soriano Rodríguez, Ana María. 2014. “Diseño y validación de instrumentos de medición”. *Diálogos* 14, 2014. http://redicces.org.sv/jspui/bitstream/10972/2105/1/2_disenoyvalidacion_dialogos14.pdf.
- Sun, Yanyi, Robin Wilson, y Yupeng Wu. 2018. “A Review of Transparent Insulation Material (TIM) for building energy saving and daylight comfort”. *Applied Energy* 226 (septiembre): 713–29. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.094>.
- Szokolay, Steven Vajk. 1980. *Environmental science handbook: for architects and builders*. 1a ed. Londres, Gran Bretaña: Construction Press.
- . 1985. “Passive and low energy design for thermal and visual comfort”. En *Passive and Low Energy Ecotechniques*, 11–28. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-031644-4.50007-2>.

- Tarifa, Enrique Eduardo. 2001. “Teoría de Modelos y Simulación”. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Jujuy.
- Tejeda Martínez, Adalberto, y Gabriel Gómez Azpeitia. 2015. *Prontuario solar de México*. Universidad de Colima, Universidad Veracruzana. 1a ed. Colima, México: Universidad de Colima y Universidad Veracruzana. <http://ww.ucol.mx/publicacionesenlinea/promocion.php?docto=6>.
- Trejo, Leopoldo. 2018. “Centros Comerciales, fenómeno urbano que se afianza en México”. *El Economista: Valores y Dinero*, mayo, 2. <https://www.economista.com.mx/estados/Centros-Comerciales-fenomeno-urbano-que-se-afianza-en-Mexico-20180512-0005.html>.
- Tudela, Fernando. 1982. *Ecodiseño*. Editado por Universidad Autónoma Metropolitana de Xochimilco. 1a ed. Ciudad de México, México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- UO (Universidad de Oregon). 2022. “Sun path chart in Cartesian Coordinates”. Sun path chart program. UO Solar Radiation Monitoring Laboratory. 2022. <http://solarat.uoregon.edu/SunChartProgram.html>.
- USGBC (U.S. Green Building Council). 2022. “EQ Credit: Daylight”. En *LEED v4.1 Building Design and Construction*, 249–52. Estados Unidos de América: USGBC. [https://www.usgbc.org/credits/new-construction-schools-new-construction-retail-new-construction-data-centers-new-2?view=language&return=/credits/New Construction/v4.1](https://www.usgbc.org/credits/new-construction-schools-new-construction-retail-new-construction-data-centers-new-2?view=language&return=/credits/New%20Construction/v4.1).
- Vale, Brenda, y Robert James Dennis Vale. 1991. *Green Architecture: Design for an Energy-conscious Future*. Londres, Gran Bretaña: Little Brown and Company.
- Vanegas Useche, Libardo, y Luz Arias Maya. 2004. “Materiales Compuestos Inteligentes.” *Scientia Et Technica* 10 (25): 143–48. <https://doi.org/10.22517/23447214.7225>.
- Vélez Restrepo, Juan Manuel, y Juan Manuel Jaramillo. 2014. “Contribuciones de la capacitación en el área de materiales”. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín* 13 (25): 65–80. <https://doi.org/10.22395/rium.v13n25a5>.
- Villegas, M A. 1990. “Revisión Aerogeles” 29: 315–29.
- Watson, Donald. 1979. *Energy conservation through building design*. 1a ed. Nueva York, EUA: McGraw-Hill. <https://archive.org/details/energyconservati00wats>.
- Werth, Andrew. 2023. “Virtual Munsell Color Wheel, version 0.5”. Munsell. Andrew Werth. 2023. <http://www.andrewwerth.com/aboutmunsell/>.
- Wigginton, Michael. 2002. *Glass in Architecture*. 1a ed. Phaidon Press.
- Wong, I.L., P.C. Eames, y R.S. Perera. 2007. “A review of transparent insulation systems and the evaluation of payback period for building applications”. *Solar Energy* 81 (9): 1058–71. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.04.004>.
- Yunus A., Cengel, y Ghajar Afshin J. 2015. *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. 5a ed. Estados Unidos de América: McGraw-Hill Education.
- Zeevaert Alcántara, Leonardo B. 2020. “Interacción del medio ambiente y la envolvente arquitectónica. Apuntes”. Ciudad de México.
- Zeiher, Laura C. 1996. *The Ecology of Architecture: A Complete Guide to Creating the Environmentally Conscious Building*. 1a ed. Nueva York, EUA: Watson-Guptill.

Ilustraciones

Índice de figuras

Figura 1. Métodos para evaluar prototipos de acristalamiento a) diagrama esquemático del equipo de monitoreo térmico b) cajas adiabáticas móviles, desarrollada en el Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas de la ETSAM c) plataforma experimental para validar el modelo de transferencia térmica dinámica d) prototipo de acristalamiento con aerogel en el interior, por Buratti y Moretti.	13
Figura 2. Variación del rendimiento energético de edificios construidos bajo la influencia de los códigos de energía y programas.	18
Figura 3. Etapas para gestionar la energía eléctrica, a partir del comportamiento de los ocupantes en edificios.	19
Figura 4. Pasos para elaborar una auditoría energética completa, según una Empresa de Servicios Energéticos.	19
Figura 5. Sistemas activos de una edificación (izquierda) y tabla informativa sobre etiquetas de rendimiento de un sistema de climatización (derecha).	21
Figura 6. Mecanismos de transferencia de calor por medio de estrategias pasivas de control para los periodos extremos del año.	22
Figura 7. Clasificación de materiales aislantes disponibles en el mercado europeo.	32
Figura 8. Tipos de estructuras de los materiales aislantes translúcidos disponibles en el mercado, basados en la pérdida de calor.	33
Figura 9. Comportamiento de la radiación solar a través de un acristalamiento y su clasificación según la estructura del material.	36
Figura 10. Criterios de evaluación para el rendimiento de los materiales aislantes.	37
Figura 11. Cartografía Geoestadística Urbana y Rural de la zona metropolitana de la CDMX.	42
Figura 12. Paso y atenuación de la radiación solar incidente por la atmosfera terrestre. Modelo de balance radiativo terrestre.	44
Figura 13. Tipos de flujos de radiación solar.	44
Figura 14. Condiciones de luminancia (L) en la bóveda celeste con un a) cielo despejado y b) nublado, en la CDMX.	45
Figura 15. Variación angular de la intensidad de radiación difusa, en a) cielo despejado, b) parcialmente nublado y c) nublado.	46
Figura 16. Representación gráfica de los diferentes modelos gráficos.	50
Figura 17. Representación gráfica de los diferentes modelos físicos de simulación.	51
Figura 18. a) Estación meteorológica instalada en sitio y b) software de base de datos climatológicos Meteonorm versión 8.1	55

Figura 19. Localización del municipio Nezahualcóyotl en la ZMCM.	56
Figura 20. Ubicación de la zona de estudio en la zona norte de Nezahualcóyotl y la vista aérea de la cubierta de la vivienda.	56
Figura 21. Análisis de sombras horarias a partir del TSV de los meses representativos (mayo y diciembre), en la zona de estudio.	61
Figura 22. Corte esquemático con los elementos más altos del sitio de estudio.	62
Figura 23. Vista aérea de la vivienda donde se ubica el modelo experimental.	62
Figura 24. Planta arquitectónica del sitio de estudio y la ubicación del área seleccionada.	63
Figura 25. Cortes arquitectónicos del sitio de estudio y el área seleccionada.	64
Figura 26. Relación de las variables independientes y dependientes y las constantes.	66
Figura 27. Definición del tamaño de la muestra para los días de estudio de cada tipo de cielo.	67
Figura 28. Condiciones de diseño para la configuración del espacio experimental e isométrico del módulo experimental.	70
Figura 29. Planta arquitectónica, fachada norte y corte longitudinal del modelo tipo para el método experimental	71
Figura 30. Procesos de construcción de los módulos de prueba.	71
Figura 31. Diagrama de la distribución de sensores en un módulo de prueba.	73
Figura 32. Emplazamiento de los módulos, los ángulos de sombras y la incidencia de rayos solares en el área de estudio.	75
Figura 33. Diagrama de flujo para analizar las mediciones del modelo experimental, a partir del análisis estadístico.	77
Figura 34. Corte arquitectónico transversal de la vivienda con la ubicación del modelo experimental e instrumentación.	79
Figura 35. Reporte fotográfico mensual sobre la superficie exterior de los materiales durante el periodo de estudio.	85
Figura 36. Detalle de fisuras en la superficie exterior de la manta de aerogel.	86
Figura 37. Comparación de colores de las cubiertas respecto a la Tabla de color Munsell, al inicio y final de la experimentación.	87
Figura 38. Diagrama de flujo de procesos para evaluar los materiales de estudio, a partir de la matriz de Leopold.	108
Figura 39. Interrelación de parámetros de evaluación.	109
Figura 40. Comparación de valores T_m entre los módulos de prueba, en los meses de estudio.	116
Figura 41. Comparación de valores T_h , T_d y T_d entre los módulos de prueba, en las temporadas de estudio.	117

Figura 42. Comparación de valores E_m entre los módulos de prueba, en los meses de estudio. 118

Figura 43. Comparación de valores E_h y E_d entre los módulos de prueba, en las temporadas de estudio. 119

Índice de gráficas

Gráfica 1. a) Consumo final de electricidad por sector en México, en 2018 y b) comparación de consumos energéticos con datos del SIE y los calculados por Chatellier y McNeil. 15

Gráfica 2. Consumo de electricidad del sector comercial en México y la línea de tendencia, con datos del Balance Nacional de Energía 2010-2018. 16

Gráfica 3. a) Evolución del espesor del aislante para cubiertas en Europa y b) correlación entre el rendimiento, costo y su participación en el mercado en el sector de materiales aislantes. 31

Gráfica 4. a) Porcentaje de aplicación de materiales aislantes translúcidos en diferentes áreas de 1900-1999 y b) del 2000-2017. 33

Gráfica 5. Rango de conductividad térmica de varios materiales a temperatura ambiente. 34

Gráfica 6. Radiación solar global diaria en un cielo despejado con 20 % de albedo, en la CDMX. 48

Gráfica 7. Rangos de temperatura media mensual y zona de confort térmico mensual. 58

Gráfica 8. Mediciones de humedad relativa mensual, valores máximos, mínimos y rango de confort. 59

Gráfica 9. Mediciones de iluminancia global exterior, media horaria en klx. 60

Gráfica 10. Distribución horaria de valores de iluminancia exterior medidos en el mes de abril en Nezahualcóyotl, Edo. Méx.; correspondiente a un cielo despejado (izquierdo), parcialmente nublado (centro) y nublado (derecho). 68

Gráfica 11. Diferencia de temperatura entre el interior de los módulos de prueba y el exterior. Datos promedio anuales por hora. 80

Gráfica 12. Distribución de la temperatura promedio por hora de los módulos de prueba durante el periodo de estudio. 81

Gráfica 13. Comparación anual de la temperatura media horaria sobre la superficie de los materiales aislantes translúcidos. 82

Gráfica 14. Distribución anual de la iluminancia media horaria mensual interior de los módulos de prueba. 84

Gráfica 15. Comparación de la distribución de temperatura de los módulos de prueba en días con CD, temporada cálida. 88

Gráfica 16. Detalle de la distribución de temperatura y diferencia de fluctuaciones térmicas en días con CD, temporada cálida. 89

Gráfica 17. Comparación de la distribución de temperatura de los módulos de prueba en días con CPN, temporada cálida. 89

Gráfica 18. Detalle de la distribución de temperatura y diferencia de fluctuaciones térmicas en días con CPN, temporada cálida. 90

- Gráfica 19.** Comparación de la distribución de temperatura de los módulos de prueba en días con CN, temporada cálida. 90
- Gráfica 20.** Detalle de la distribución de temperatura y diferencia de fluctuaciones térmicas en días con CN, temporada cálida. 91
- Gráfica 21.** Comparación de la fluctuación térmica diaria del interior de los módulos en la temporada cálida. 92
- Gráfica 22.** Distribución de la temperatura sobre la superficie exterior del material en un CD y CN de abril. 92
- Gráfica 23.** Detalle de la distribución de temperatura y la diferencia de fluctuaciones térmicas diarias en CD y CN de abril. 93
- Gráfica 24.** Comparación de la distribución de iluminancia de los módulos de prueba en días con CD, temporada cálida. 93
- Gráfica 25.** Detalle de la distribución de iluminancia y diferencia de valores máximos en días con CD, temporada cálida. 94
- Gráfica 26.** Comparación de la distribución de iluminancia de los módulos de prueba en días con CPN, temporada cálida. 95
- Gráfica 27.** Detalle de la distribución de iluminancia y diferencia de valores máximos en días con CPN, temporada cálida. 96
- Gráfica 28.** Comparación de la distribución de iluminancia de los módulos de prueba en días con CN en temporada cálida. 96
- Gráfica 29.** Detalle de la distribución de iluminancia y diferencia de fluctuación térmica en días con CN, temporada cálida. 97
- Gráfica 30.** Comparación de la distribución de temperatura de los módulos de prueba en días con CD, temporada fría. 98
- Gráfica 31.** Detalle de la distribución de temperatura y diferencia de fluctuación térmica en días con CD, temporada fría. 99
- Gráfica 32.** Comparación de la distribución de temperatura de los módulos de prueba en días con CPN, temporada fría 99
- Gráfica 33.** Detalle de la distribución de temperatura y diferencia de fluctuación térmica en días con CPN, temporada fría 100
- Gráfica 34.** Comparación de la distribución de temperatura de los módulos de prueba en días con CN, temporada fría. 100
- Gráfica 35.** Detalle de la distribución de temperatura y diferencia de fluctuación térmica en días con CN, temporada fría. 101
- Gráfica 36.** Comparación de la fluctuación térmica diaria del interior de los módulos en la temporada fría 102
- Gráfica 37.** Distribución de temperatura en la superficie exterior del material en un CD y CN de temporada fría. 102

Gráfica 38. Distribución de temperatura en la superficie exterior del material en un CD y CN, temporada fría.	103
Gráfica 39. Comparación de la distribución de iluminancia de los módulos de prueba en días con CD en temporada fría	103
Gráfica 40. Detalle de la distribución de iluminancia y diferencia de valores máximos en días con CD en temporada fría	104
Gráfica 41. Comparación de la distribución de iluminancia de los módulos de prueba en días con CPN en temporada fría	105
Gráfica 42. Detalle de la distribución de iluminancia y diferencia de valores máximos en días con CPN en temporada fría	106
Gráfica 43. Comparación de la distribución de iluminancia de los módulos de prueba en días con CN en temporada fría.	106
Gráfica 44. Detalle de la distribución de iluminancia y diferencia de valores máximos en días con CN en temporada fría.	107

Índice de tablas

Tabla 1. Prototipos elaborados con aerogel para su aplicación en elementos arquitectónicos.	11
Tabla 2. Rangos de confort térmico para la Ciudad de México (Tacubaya (obs)) y formula definida por Auliciems y Szokolay.	24
Tabla 3. Niveles de iluminancia recomendados para edificios de uso comercial.	26
Tabla 4. Criterios de evaluación para el desempeño lumínico de los materiales en una construcción.	39
Tabla 5. Mediciones de temperatura exterior, media mensual en grados Celsius. Media, máximos y mínimos mensuales.	57
Tabla 6. Mediciones de humedad relativa exterior, media mensual en porcentaje. Media, máximos y mínimos mensuales.	58
Tabla 7. Mediciones de iluminancia global en sitio, media horaria en klx. Promedios, máximos y mínimos mensuales.	59
Tabla 8. Definición de variables de investigación.	65
Tabla 9. Mediciones de iluminancia y temperatura de los días de estudio, media horaria en klx y °C.	68
Tabla 10. Propiedades mecánicas, térmicas y ópticas de los materiales de estudio.	69
Tabla 11. Propiedades de los materiales del sistema envolvente.	72
Tabla 12. Especificaciones de los sensores de iluminancia, humedad relativa y temperatura.	73
Tabla 13. Mediciones de temperatura exterior e interior, media horaria en grados Celsius (°C). Media, máximos y mínimos.	80

Tabla 14. Mediciones de iluminancia exterior e interior, media horaria en kilolux (klx). Media, máximos y mínimos.	83
Tabla 15. Lista de indicadores de desempeño para la evaluación de materiales aislantes translúcidos en la matriz de Leopold.	110
Tabla 16. Valores de referencia para el proceso de evaluación.	110
Tabla 17. Fórmulas matemáticas para obtener el valor de los indicadores.	111
Tabla 18. Valores de los indicadores, obtenidos del modelo experimental.	112
Tabla 19. Valoración de la magnitud del impacto de cada indicador.	113
Tabla 20. Escala de medición para la importancia de impacto.	113
Tabla 21. Valoración de la importancia del impacto de cada indicador.	114
Tabla 22. Caracterización de la variable T_m de los módulos de prueba.	116
Tabla 23. Caracterización de la variable T_h , T_d y F_d de los módulos de prueba.	117
Tabla 24. Caracterización de la variable E_m de los módulos de prueba.	118
Tabla 25. Caracterización de la variable E_h y E_d de los módulos de prueba.	119
Tabla 26. Clasificación de la importancia de impacto.	120
Tabla 27. Matriz de selección de materiales aislantes translúcidos para cubiertas translúcidas.	123